UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**OURO E ELEMENTOS INDICADORES NO
REGOLITO DO GARIMPO FAZENDA
PISON – PROCESSOS DE DISPERSÃO E
IMPLICAÇÕES PARA PROSPECÇÃO**

João Henrique Larizzatti

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo
2002

JEOL 20KV 10µm X1,100 39mm

OURO E ELEMENTOS INDICADORES NO REGOLITO DO GARIMPO FAZENDA PISON – PROCESSOS DE DISPERSÃO E IMPLICAÇÕES PARA PROSPECÇÃO

João Henrique Larizzatti

Tese apresentada ao Instituto de Geociências,
da universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor em
Geoquímica dos Processos Exógenos

ORIENTADORA: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

São Paulo

2002

Dedico este trabalho às pessoas que acreditam no potencial mineral brasileiro e no seu uso em benefício de toda a sociedade.

“Enche-te de coragem, caro Mênon, e procura sem receio e sem descanso o que agora não sabes...Uma coisa posso afirmar e provar com palavras e atos: é que nos tornamos melhores se cremos que é nosso dever seguir em busca da verdade desconhecida.”

Sócrates

AGRADECIMENTOS

À minha mulher Núccia e às minhas filhas Daniella e Raquel, pelo apoio, companheirismo, amizade e amor. Vocês tornaram este trabalho possível.

À meus pais, Guy e Eunice, meus primeiros professores, pelo carinho e apoio eternos.

À meus sogros, Carlos e Zélia, por todo o apoio fornecido.

À meu irmão Marcelo, pela impressão do texto.

À profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira, pela orientação dedicada, pela confiança depositada em mim e pelo prazer da convivência.

Ao senhor Hilton Teixeira e Silva (Nêgo Hilton), proprietário do Garimpo Fazenda Pison, pela permissão em trabalhar na área e por todo apoio fornecido.

Aos geólogos Fernando Hugo (Geotapajós) e Douglas Arantes (Arantes & Associados), pelos dados fornecidos e discussões.

À Rio Tinto Desenvolvimento Minerais Ltda., por permitir a amostragem do testemunho de sondagem FFP-1.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, empresa em que trabalho, pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho. Em especial aos colegas de Manaus.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, pela maneira como me recebeu e pela utilização de sua infra-estrutura. Aos professores, funcionários e colegas gostaria de deixar um especial muito obrigado.

À FAPESP, pelo apoio financeiro para trabalhos de campo e de análises laboratoriais (processo número 1999/1537-9).

À CAPES, pela bolsa de estudos e pelo pagamento das passagens aéreas para a realização do estágio na Austrália.

À University of Western Australia, na pessoa do Prof. Dr. David Groves, por me receber como estudante visitante, pelas discussões e por permitir a utilização de toda a infra-estrutura. Ao Prof. Dr. Brendan Griffin e sua equipe pelos ensinamentos e discussões no Centre for Microscopy and Microanalysis (UWA).

Ao Cooperative Research Centre for Landscape Evolution & Mineral Exploration (CSIRO Division of Exploration Geoscience), na pessoa dos Drs. Raymond E. Smith e Charles R. M. Butt, por me receber como pesquisador visitante, me orientar durante todo o estágio e permitir a utilização de seus laboratórios. A todos os colegas do CRCLEME o meu muito obrigado pelo carinho e amizade.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xvi
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xx
I. INTRODUÇÃO.....	1
1. Apresentação.....	1
2. Objetivos.....	2
3. Localização da área.....	3
4. Aspectos fisiográficos e geomorfológicos.....	3
5. Contexto geológico.....	6
5.1. Geologia regional.....	6
5.2. Depósitos auríferos da Província Tapajós.....	7
5.3. Geologia local.....	8
6. Revisão bibliográfica.....	11
6.1. A exploração de ouro nos últimos 30 anos.....	11
6.2. Origem e evolução do manto intempérico na Amazônia.....	13
6.3. O comportamento do ouro no meio laterítico.....	15
6.4. A exploração geoquímica de ouro na Amazônia brasileira.....	17
6.5. Utilização de estudos orientativos.....	19
II. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
1. Amostragem.....	21
1.1. Trincheiras.....	24
1.1.1. Amostras de minério (veios de quartzo).....	30
1.1.2. Amostras totais.....	30

1.1.3. Amostras indeformadas.....	31
1.1.4. Amostras para bateamento.....	31
1.2. Linhas de amostragem de solo.....	31
1.3. Furo de sondagem FFP-1.....	35
2. Preparação das amostras.....	37
2.1. Amostras de minério (trincheiras T1, T2 e FFP-1).....	37
2.2. Amostras totais.....	38
2.3. Amostras indeformadas.....	38
2.4. Amostras para bateamento.....	38
3. Técnicas analíticas.....	39
3.1. Microscopia óptica de luz refletida e transmitida.....	40
3.2. Microscopia eletrônica de varredura com sistema de dispersão de energia acoplado (MEV-EDS).....	40
3.3. Microsonda eletrônica.....	41
3.4. Difração de raios-X.....	41
3.5. Análises químicas.....	41
3.6. Extrações seletivas sequenciais.....	43
4. Métodos estatísticos uni- e multivariados.....	44
III. RESULTADOS.....	46
1. Mineralização primária.....	46
1.1. Características da zona mineralizada.....	46
1.2. Alteração hidrotermal.....	47
1.3. Mineralogia e assinatura geoquímica do minério.....	48
1.4. <i>Timing</i> e tipologia da mineralização.....	55
2. O manto intempérico.....	56
2.1. Unidades principais.....	56
2.2. Distribuição espacial.....	58
2.3. O perfil intempérico: observações macroscópicas.....	59

2.4. Características petrográficas e mineralógicas.....	63
2.5. Caracterização geoquímica.....	75
2.6. Balanço de massa.....	79
2.7. Gênese.....	81
3. Morfologia e composição das partículas de ouro.....	84
3.1. Morfologia e tamanho.....	84
3.1.1. Minério fresco.....	85
3.1.2. Regolito.....	86
3.1.3. Resumo das observações sobre morfologia e tamanho.....	112
3.2. Composição dos grãos.....	114
3.2.1. Minério fresco.....	120
3.2.2. Regolito.....	122
3.2.3. Resumo dos resultados das microanálises.....	129
3.3. Síntese e comparações.....	133
4. Distribuição do ouro e elementos indicadores no perfil intempérico.....	134
4.1. A trincheira T2.....	134
4.1.1. Geoquímica multielementar: Au, Ag, Bi, V, As, Sb, W, Cu, Pb e Zn.....	134
4.1.2. Extrações seletivas sequenciais para ouro.....	148
4.1.3. Balanço de massa para o ouro.....	151
4.2. Amostragem de solo nas Linhas 1, 2 e 3.....	152
4.2.1. Comportamento do ouro e elementos indicadores nos latossolos.....	153
4.2.2. Definição de anomalia e <i>background</i> para o ouro.....	175
4.3. Síntese das observações e conseqüências para a prospecção.....	178
IV. CONCLUSÕES.....	183
ANEXOS.....	187
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	188
GLOSSÁRIO.....	200

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Mapa de localização da área estudada e esboço geológico da Folha Vila Mamãe Anã.....	4
2	Imagem Landsat TM5 da Folha Vila Mamãe Anã.....	5
3	Esboço geológico da região da Fazenda Pison.....	10
4	Vista aérea do Garimpo Fazenda Pison.....	23
5	Esboço geológico da área estudada.....	23
6	Perfil esquemático da trincheira T1.....	25
7	Disposição das faces T2A, T2B, T2C e T2D na trincheira T2.	25
8	Face T2A, trincheira T2.....	26
9	Face T2B, trincheira T2.....	27
10	Face T2C, trincheira T2.....	28
11	Face T2D, trincheira T2.....	29
12	Perfis esquemáticos para as Linhas 1, 2 e 3.....	34
13	Perfil esquemático do furo de sondagem FFP-1.....	36
14	Diagrama esquemático de preparação e análises das amostras.	37
15	Esquema das zonas de alteração hidrotermal.....	50
16	Fotomicrografia de veio de quartzo cortando o granófiro.....	50
17	Fotomicrografia destacando fluorita, epidoto e mica branca....	50
18	Fotomicrografia destacando quartzo neoformado.....	50
19	Imagem MEV da associação Au-Bi no minério primário.....	51
20	Imagem MEV de ouro incluso na pirita.....	51
21	Imagem MEV de ouro no quartzo.....	51
22	Imagem MEV de ouro em fratura na pirita.....	51
23	Fotomicrografia de pirita em veio de quartzo.....	52

24	Imagem MEV da associação bismuto-pirita-calcopirita.....	52
25	Imagem MEY da associação bismuto-calcopirita.....	52
26	Imagem MEV da associação pirita-calcopirita.....	52
27	Diagrama de “talus” utilizado na determinação do número de fatores utilizados na análise fatorial.....	53
28	Diagramas de peso; Fator 1 x Fator 2 e Fator 2 x Fator 3.....	55
29	Terminologia do regolito.....	57
30	Fotografias ilustrando os materiais presentes no regolito.....	60
31	Imagens ilustrando materiais presentes no saprolito.....	65
32	Imagens ilustrando a zona de transição (base).....	68
33	Imagens ilustrando a zona de transição (topo).....	69
34	Imagens ilustrando a couraça.....	70
35	Fotomicrografias ilustrando a couraça.....	71
36	Imagens ilustrando o latossolo vermelho.....	72
37	Imagens ilustrando o latossolo amarelo.....	73
38	Fotomicrografias ilustrando feições primárias preservadas nos latossolos vermelho e amarelo.....	74
39	Diagramas ilustrando a concentração dos óxidos principais nos materiais presentes na trincheira T2.....	75
40	Diagramas do Fator 1 x Fator 2 para elementos e amostras.....	78
41	Imagem MEV de grãos de ouro no minério fresco.....	86
42	Características das partículas presentes no saprolito, amostra T2-I.....	88
43	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-I.....	89
44	Características das partículas presentes no saprolito, amostra T2-H.....	90
45	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-H.....	91

46	Características das partículas presentes no saprolito, amostra T2-G.....	92
47	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-G.....	93
48	Características das partículas presentes no saprolito, amostra T2-F.....	94
49	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-F.....	95
50	Características das partículas presentes no saprolito, amostra T2-J.....	96
51	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-J.....	97
52	Características das partículas presentes no saprolito, amostra T2-K.....	99
53	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-K.....	100
54	Características das partículas presentes no pedolito, amostra T2-E.....	101
55	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-E.....	102
56	Características das partículas presentes no pedolito, amostra T2-D.....	103
57	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-D.....	104
58	Características das partículas presentes no pedolito, amostra T2-C.....	105
59	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-C.....	106
60	Características das partículas presentes no pedolito, amostra T2-B.....	108
61	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-B.....	109
62	Características das partículas presentes no pedolito, amostra T2-A.....	110
63	Imagens MEV de grãos de ouro da amostra T2-A.....	111
64	Resumo das características morfológicas das partículas presentes em T2.....	112
65	Espectros obtidos em microanálises EDS.....	115

66	Imagens MEV ilustrando partículas homogênea e zonada.....	116
67	Diagramas de frequência para teores de Au, Ag e Cu para todas as partículas.....	117
68	Imagens MEV mostrando partículas de ouro zonadas.....	118
69	Imagem MEV e mapa WDS para Ag em grão de ouro zonado.....	119
70	Diagramas de distribuição normal para Au e Ag para todos os resultados obtidos.....	119
71	Diagramas de distribuição normal para Au segundo o tipo de partícula (homogênea ou zonada).....	120
72	Imagens MEV de partículas de ouro zonadas associadas à pirita.....	121
73	Diagramas de frequência para Au, Ag e Cu para partículas homogêneas.....	130
74	Diagramas de frequência para Au, Ag e Cu para bordas de partículas zonadas.....	131
75	Diagramas de frequência para Au, Ag e Cu para núcleos de partículas zonadas.....	132
76	Representação gráfica das correlações apresentadas na Tabela 35.....	137
77	Distribuição de Au nos perfis da trincheira T2.....	138
78	Distribuição de Ag nos perfis da trincheira T2.....	139
79	Distribuição de Bi nos perfis da trincheira T2.....	140
80	Distribuição de V nos perfis da trincheira T2.....	141
81	Distribuição de As nos perfis da trincheira T2.....	142
82	Distribuição de Sb nos perfis da trincheira T2.....	143
83	Distribuição de W nos perfis da trincheira T2.....	144
84	Distribuição de Cu nos perfis da trincheira T2.....	145
85	Distribuição de Pb nos perfis da trincheira T2.....	146

86	Distribuição de Zn nos perfis da trincheira T2.....	147
87	Teores totais de Au e participação de Au nas diferentes fases estudadas na trincheira T2.....	149
88	Imagem MEV mostrando partículas de Au associadas a óxi/hidróxidos de Fe.....	150
89	Distribuição de Au em planta nas Linhas 1, 2 e 3.....	155
90	Distribuição de Ag em planta nas Linhas 1, 2 e 3.....	156
91	Distribuição de V em planta nas Linhas 1, 2 e 3.....	157
92	Distribuição de As em planta nas Linhas 1, 2 e 3.....	158
93	Distribuição de Sb em planta nas Linhas 1, 2 e 3.....	159
94	Distribuição de W em planta nas Linhas 1, 2 e 3.....	160
95	Distribuição de Cu em planta nas Linhas 1, 2 e 3.....	161
96	Distribuição de Pb em planta nas Linhas 1, 2 e 3.....	162
97	Distribuição de Zn em planta nas Linhas 1, 2 e 3.....	163
98	Teores de Au, Ag, As e Cu para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 1.....	164
99	Teores de Pb, Sb, V, W e Zn para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 1.....	165
100	Teores de Au, Ag, As e Cu para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 2.....	166
101	Teores de Pb, Sb, V, W e Zn para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 2.....	167
102	Teores de Au, Ag, As e Cu para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 3.....	168
103	Teores de Pb, Sb, V, W e Zn para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 3.....	169
104	Representação gráfica das correlações apresentadas na Tabela 38.....	170
105	Diagramas de frequência para Au e elementos indicadores no latossolo vermelho.....	171

106	Representação gráfica das correlações apresentadas na Tabela 40.....	172
107	Diagramas de frequência para Au e elementos indicadores no latossolo amarelo.....	173
108	Disposição das amostras, histograma, diagrama de distribuição normal e diagrama de distribuição para o ouro no latossolo vermelho.....	175
109	Disposição das amostras, histograma, diagrama de distribuição normal e diagrama de distribuição para o ouro no latossolo amarelo.....	176

LISTA DE TABELAS

TABELA		Página
1	Ambientes químicos propícios à mobilização do ouro em perfis intempéricos.....	18
2	Amostras coletadas no Garimpo Fazenda Pison.....	22
3	Elementos químicos e limites de detecção das análises realizados no Actlabs, Ontário, Canadá.....	42
4	Elementos químicos e limites de detecção das análises realizadas por FRX no CRCLEME/CSIRO, Perth, Austrália.....	43
5	Soluções utilizadas e fases minerais atacadas no processo de extrações sequenciais seletivas.....	44
6	Composição química para os óxidos principais em amostras do granófiro hidrotermalizado.....	46
7	Sumário estatístico para amostras de minério.....	49
8	Correlação entre Au e demais elementos nas amostras de minério.....	53
9	Peso de cada elemento químico nos Fatores 1, 2 e 3.....	54
10	Composição mineralógica dos horizontes do perfil intempérico.....	64
11	Composição química dos horizontes presentes na trincheira T2.....	76
12	Composição média dos horizontes presentes na trincheira T2.	77
13	Composição mineralógica calculada para os horizontes presentes na trincheira T2.....	77
14	Pesos dos Fatores 1 e 2, comunalidades e <i>scores</i> de cada fator para cada amostra.....	79
15	Densidades, teores médios de TiO_2 e valores de ϵ	80
16	Perdas e ganhos para cada elemento nos diferentes horizontes do regolito.....	82
17	Características morfológicas das partículas de ouro.....	113
18	Número de partículas e pontos analisados.....	115

19	Limites de detecção e tempo de contagem em análises WDS..	116
20	Resultados das microanálises em grãos recuperados no minério primário.....	121
21	Correlação entre Au e demais elementos nas partículas recuperadas no minério fresco.....	122
22	Resultados das microanálises em grãos recuperados no saprolito – granófiro.....	123
23	Correlação entre Au e demais elementos em resultados obtidos no granófiro.....	123
24	Resultados das microanálises em grãos recuperados no saprolito – zona de <i>stockwork</i>	124
25	Correlação entre Au e demais elementos em resultados obtidos na zona de <i>stockwork</i>	124
26	Resultados das microanálises em grãos recuperados na zona de transição.....	125
27	Correlação entre Au e demais elementos em resultados obtidos na zona de transição.....	126
28	Resultados das microanálises em grãos recuperados na couraça.....	126
29	Correlação entre Au e demais elementos em resultados obtidos na couraça.....	127
30	Resultados das microanálises em grãos recuperados no latossolo vermelho.....	127
31	Correlação entre Au e demais elementos em resultados obtidos no latossolo vermelho.....	128
32	Resultados das microanálises em grãos recuperados no latossolo amarelo.....	128
33	Correlação entre Au e demais elementos em resultados obtidos no latossolo amarelo.....	129
34	Sumário estatístico para elementos associados ao Au no minério, segundo horizontes presentes na trincheira T2.....	135
35	Correlação entre Au e elementos indicadores na trincheira T2.....	136

36	Resultados para Au obtidos em extrações sequenciais seletivas.....	148
37	Perdas e ganhos para o Au no regolito.....	152
38	Resultados das análises de amostras de solo nas Linhas 1, 2 e 3.....	154
39	Correlação entre Au e elementos indicadores no latossolo vermelho.....	170
40	Correlação entre Au e elementos indicadores no latossolo amarelo.....	172

RESUMO

Este estudo trata do comportamento do ouro e elementos indicadores em um perfil laterítico localizado na província Tapajós, Amazônia brasileira. O objetivo foi verificar a evolução da assinatura geoquímica da mineralização no sentido de aprimorar os trabalhos de prospecção geoquímica nesse tipo de ambiente. Abordagens diferentes foram utilizadas nesse estudo, tais como: as características da mineralização primária e do manto intempérico, a morfologia e composição das partículas de ouro, e a distribuição espacial do ouro e dos elementos indicadores.

A mineralização primária é composta por um feixe de veios de quartzo contendo sulfetos, entre os quais predomina a pirita, com bolsões de *stockwork* localizados. O ouro (*electrum*) está, na sua maior parte, livre mas também incluso na pirita. A assinatura geoquímica do minério é dada por Au, Ag, Bi, V, As, Sb, W, Cu, Pb, Zn. As características encontradas permitem classificar a mineralização primária como Sistema Aurífero Relacionado a Intrusões.

Foram observados dois tipos de perfil intempérico: o perfil completo, composto por saprolito, zona de transição, couraça, latossolo vermelho e latossolo amarelo; e perfil incompleto, composto por saprolito, zona de transição, latossolo vermelho e latossolo amarelo. O perfil incompleto se desenvolveu a partir do perfil completo, com a desagregação da couraça e sua transformação em latossolo, devido à mudança do clima de estações contrastadas para um clima bem mais úmido. A composição mineralógica de cada horizonte é: saprolito – composto por quartzo, mica branca e caolinita; zona de transição – quartzo, caolinita, goethita, hematita e mica branca; couraça – hematita, goethita, caolinita e quartzo; latossolo vermelho – quartzo, caolinita, goethita e hematita; e latossolo amarelo – quartzo, caolinita, goethita (e hematita). O saprolito é rico em SiO₂, Mn, Mg, Na, Ca, K, Ba, Cu, Rb e Zn; a couraça é rica em Fe₂O₃, Cr, Ga, S, V, As, Sb, Bi e Ag; e os latossolos são ricos em Al₂O₃, Ti, P, Sr, Zr, Ce, La, Nb e Y.

No saprolito começam a aparecer os primeiros sinais do processo de lixiviação do ouro primário, que se intensifica progressivamente para o topo do perfil até atingir um máximo na couraça, tornando-se menos intenso nos latossolos. A dissolução do ouro primário resulta do processo de corrosão por soluções intempéricas superficiais, que atuam na zona insaturada do perfil. Parte do ouro dissolvido reprecipita com elevada pureza na couraça, unindo partículas de ouro individuais num processo de “pepitação”; também reprecipita nos horizontes inferiores do regolito, nas bordas e descontinuidades das partículas primárias, gerando partículas composicionalmente zonadas. Nos latossolos, as partículas diminuem de tamanho em relação à couraça e apresentam zonação mais discreta.

O ouro apresenta comportamento diferente de todos os demais elementos durante o processo intempérico. É o único elemento que guarda o posicionamento geográfico da mineralização primária, o que o torna o melhor indicador de seus depósitos. Os elementos indicadores podem apresentar bons resultados na delimitação de áreas em escala de semi-detálhe. O latossolo amarelo apresenta a melhor relação custo/benefício na prospecção geoquímica.

Palavras-chave: prospecção geoquímica, ouro, laterito, morfologia, corrosão, intemperismo, Amazônia.

ABSTRACT

Gold and indicator elements behavior in lateritic profiles have been studied in the Tapajós Province, Brazilian Amazon. The objective was to verify the evolution of the mineralisation geochemical signature in order to improve geochemical exploration surveys in similar environments. Different approaches were considered such as the characteristics of primary ore and weathering mantle, morphology and composition of gold grains and the spatial distribution of gold and indicator elements.

The mineralisation is composed of sheeted quartz veins with sulfides (mainly pyrite), and small stockwork zones. Gold (electrum) is present as free particles and as inclusions in pyrite. Primary ore signature is Au, Ag, Bi, V, As, Sb, W, Cu, Pb, and Zn. The deposit can be classified as Gold System Related to Intrusions.

Two types of weathering profiles were found: complete profile, composed of saprolite, transition zone, duricrust, red latosol and yellow latosol; and incomplete profile, composed of saprolite, transition zone, red latosol and yellow latosol. The incomplete profile has been developing at expense of complete profile, due to leaching of duricrust and its transformation into latosol. Such transformation happens during the transition from a contrasting season climate (savanna like) into a more humid climate (rainforest). The mineralogical composition of each horizon is: saprolite – quartz, white mica and kaolinite; transition zone – quartz, kaolinite, goethite, hematite and white mica; duricrust – hematite, goethite, kaolinite and quartz; red latosol – quartz, kaolinite, goethite and hematite; and yellow latosol – quartz, kaolinite and goethite (and hematite). Saprolite is SiO₂, Mn, Mg, Na, Ca, K, Ba, Cu, Rb and Zn rich; duricrust is Fe₂O₃, Cr, Ga, S, V, As, Sb, Bi and Ag rich; and latosols are Al₂O₃, Ti, P, Sr, Zr, Ce, La, Nb and Y rich.

A leaching process of primary gold, beginning in the saprolite, progressively intensifies upward with a maximum in the duricrust horizon, becoming less intense in the latosol. Primary gold dissolution is related to corrosion by surface weathering solutions occurring at the unsaturated zone of the profile. Part of dissolved gold reprecipitates as pure gold in the duricrust, welding small individual gold particles into bigger ones resulting in a “growth effect”; and part reprecipitates below the duricrust, along primary grains boundaries and cracks resulting in zoned grains. At latosol horizons gold particles show grain size reduction and discrete zonation.

Gold behaves in a single manner during the weathering process. It is the only element that keeps the position in relation to the bedrock mineralisation, becoming the best indicator for gold deposits. Indicator elements can be useful to semi-detail surveys. Yellow latosol shows the best cost/benefit ratio for geochemical exploration surveys.

Key words: geochemical exploration, gold, laterites, morphology, corrosion, weathering, Amazon.

I. INTRODUÇÃO

1. Apresentação

A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), no papel do Serviço Geológico do Brasil tem, por um de seus objetivos, melhorar o conhecimento geológico, geoquímico e geofísico do país. O Departamento de Recursos Minerais (DEREM), dentro de seu programa nacional de prospecção, aplica esse conhecimento de forma integrada na busca de novas jazidas minerais.

Esta tese é resultado da aproximação extremamente positiva entre a CPRM e as seguintes instituições:

- Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc – USP);
- Fundação para o Desenvolvimento da Pesquisa no Estado de São Paulo – FAPESP;
- Fundação Coordenação de Pessoal de Nível Superior (CAPES);
- Cooperative Research Centre for Landscape Evolution and Mineral Exploration (CRCLEME/CSIRO – Western Australia); e
- University of Western Australia (UWA).

Intitulado “Ouro e elementos indicadores no regolito do Garimpo Fazenda Pison – processos de dispersão e implicações para exploração”, este projeto se beneficiou da exposição de um perfil laterítico completo na área, além de testemunhos de sondagem executadas pela Rio Tinto Desenvolvidos Minerais Ltda. (RTDM 1995). O estudo completo do processo de alteração intempérica desde a rocha fresca até os níveis mais superficiais do regolito possibilitou investigar os processos de intemperismo das rochas e, mais especificamente, os mecanismos pelos quais o ouro sofreu dispersão durante a evolução do regolito nesta porção da Amazônia. Os resultados da pesquisa estão sumarizados, integrados e discutidos a seguir. Para maiores detalhes deve-se procurar o autor que dispõe dos dados na forma digital.

2. Objetivos

Este projeto teve como objetivo geral entender melhor os processos secundários de dispersão do ouro na região amazônica, particularmente no contexto das áreas baixas e aplainadas. Os resultados deverão contribuir para o aperfeiçoamento dos modelos prospectivos utilizados nessa região, onde um vulcanismo expressivo abre diferentes possibilidades de exploração. A área escolhida situa-se na Província Mineral do Tapajós (Santos *et al.* 2001), onde a garimpagem de ouro teve início na década de 1950 e atingiu seu apogeu nos anos 70 e 80, tendo produzido 159 toneladas de ouro até 1996. Atualmente a produção encontra-se bastante reduzida devido à exaustão das aluviões, às dificuldades técnicas de se recuperar o metal a partir do minério primário e ao baixo preço do ouro no mercado. Nos anos 90 várias empresas de mineração realizaram trabalhos prospectivos na área, porém nenhum grande depósito foi descoberto até hoje.

Os objetivos específicos do projeto foram:

- a) obter um melhor conhecimento da natureza dos processos de dispersão do ouro no ambiente laterítico;
- b) determinar características úteis para a exploração mineral, especialmente na Amazônia, o que pode auxiliar na busca por depósitos lateríticos, supergênicos e primários;
- c) aumentar o conhecimento das propriedades e da gênese do regolito; e
- d) fornecer dados aplicáveis na exploração para outros bens minerais.

Para atingir os objetivos, foram realizados:

- a documentação das associações geoquímicas e mineralógicas do ouro no minério primário e no regolito;
- procedimentos de amostragem, preparação de amostras e análises, inclusive extrações sequenciais seletivas;
- a determinação dos elementos indicadores para exploração;
- a aplicação de um sistema de nomenclatura e classificação comparável ao de outras regiões da Terra.

3. Localização da área

O Garimpo Fazenda Pison situa-se no município de Maués, sudeste do Estado do Amazonas, nas coordenadas UTM 9.445.300 N e 413.300 E, folha SB.21-V-D (Folha Vila Mamãe Anã – 1:250.000) (Figura 1).

O acesso é aéreo, feito em avião de pequeno porte a partir da cidade de Itaituba (Pará) que se localiza a 214 km rumo N66°E do garimpo.

4. Aspectos fisiográficos e geomorfológicos

O clima da região (Am de Köppen) é quente e úmido, sendo caracterizado por duas estações bem definidas:

- Verão – seco, iniciando em junho e terminando no final de novembro; e
- Inverno – chuvoso, entre dezembro e maio.

A precipitação anual é próxima dos 2500 mm, a umidade relativa do ar é de 85% e a temperatura oscila entre 17° C e 38° C.

A região está localizada na margem esquerda do rio Tapajós (Figura 2) e, segundo Ventura *et al.* (1975), pertence à unidade morfoestrutural denominada “Planalto Rebaixado do Médio Amazonas”, a qual está incluída no “Domínio morfoclimático dos planaltos amazônicos rebaixados ou dissecados e das áreas colinosas revestidas por floresta densa”.

Bizinella *et al.* (1980) identificaram duas unidades geomorfológicas na região: (1) a Peneplanície, que ocupa maior área e apresenta um nível de dissecção elevado, representada por colinas e serras esparsas que se destacam na topografia; e (2) os Platôs Sedimentares, que apresentam extensos tabuleiros, às vezes capeados por couraças lateríticas ferruginosas ou aluminosas.

A topografia da área do Garimpo Fazenda Pison é suavemente ondulada, com morrotes meia-laranja de encostas pouco inclinadas. As altitudes situam-se entre 140 e 200 m. O padrão de drenagem é dendrítico e o principal curso d'água é o Igarapé Nambezinho.

Esta área foi aplainada durante o Pleistoceno (Idade do Gelo), sendo que o sistema de drenagem atual representa o re-entanhamento iniciado no Holoceno. O pediplano pleistocênico pode ser relacionado à superfície de aplainamento Velhas, aplicada por King (1956) para o Brasil Oriental e estendida até as planícies dos rios Tocantins e Araguaia por Braun (1971). Sua origem está relacionada ao soerguimento do continente, com conseqüente retomada da erosão no final do Terciário.

Figura 1 - Localização da área estudada e esboço geológico modificado de CPRM (1999).

Figura 2 - Imagem Landsat Tm5 da folha SB.21-V-D (1:250.000), bandas 4, 5 e 7 (RGB), elaborada por CPRM (1996). Em amarelo aparecem as aluviões trabalhadas pelos garimpeiros, em preto aparece o rio Tapajós e em vermelho a Rodovia Transamazônica.

5. Contexto geológico

5.1. Geologia regional

A região em estudo pertence à Província Tapajós (Almeida *et al.* 1981), Província Mineral do Tapajós para Santos *et al.* (2001), e está localizada na porção centro-norte da Folha 1:250.000 Vila Mamãe Anã: SB.21-V-D (Figura 1)

As unidades geológicas mais antigas da área pertencem ao Paleoproterozóico e estão representadas por:

- (1) rochas cristalinas metamorfizadas na fácies anfibolito (gnaisses, migmatitos, anfibolitos e granitóides), pertencentes ao Complexo Cuiú-Cuiú (Popini & Almeida 1997, Santos *et al.* 1997, CPRM 1999);
- (2) seqüência metavulcano-sedimentar composta por xistos diversos, filitos, metacherts e formações ferríferas, Grupo Jacareacanga (Ferreira 1997, Santos *et al.* 1997, CPRM 1999);
- (3) grandes batólitos de rochas graníticas de ampla variação composicional, apresentando característica presença de hornblenda, biotita e titanita, Suíte Intrusiva Parauari (Santos *et al.* 1997, CPRM 1999);
- (4) gabros e basaltos de ocorrência restrita, compostos principalmente por piroxênio e plagioclásio, além de magnetita e mais raramente olivina, Suíte Intrusiva Ingarana (Santos *et al.* 1997, CPRM 1999);
- (5) rochas vulcânicas ácidas a intermediárias, e piroclásticas do Grupo Iriri, Supergrupo Uatumã, que cortam e cobrem as rochas mais antigas (Andrade *et al.* 1978, Santos *et al.* 1997, CPRM 1999);
- (6) pequenos *stocks* circulares e elípticos representados por monzogranitos e álcali-feldspato granitos pobres em minerais máficos, Suíte Intrusiva Maloquinha, Supergrupo Uatumã (Santos *et al.* 1997, CPRM 1999);
- (7) intercalação de arcóseos, conglomerados, siltitos, argilitos e tufos, Formação Buiucu (CPRM 1999); e
- (8) gabros, diabásios, andesitos e basaltos, Suíte Crepori (CPRM 1999).

O Mesozóico é caracterizado por quartzo-arenitos avermelhados, em geral silicificados e ferruginizados, pertencentes à Formação Alter do Chão (Kistler 1954, CPRM 1999).

Areias, conglomerados e outros sedimentos inconsolidados compõem depósitos aluvionares recentes, bastante trabalhados pela atividade garimpeira (Figura 2).

5.2. Depósitos auríferos da Província Tapajós

Santos (1980) já ressaltava a importância da produção aurífera da região do Tapajós. Esse autor classifica os depósitos encontrados nessa região como: (1) **primários**, relacionados a faixas vulcânicas (principalmente básicas e ultrabásicas) metamorfizadas no Arqueano, envoltas por granitóides originados pela fusão parcial das rochas do Complexo Cuiú-Cuiú e do Grupo Jacareacanga; (2) **secundários**, relacionados à remobilização do ouro pelos processos magmáticos Uatumã, particularmente relacionados a veios ricos em pirita e que se associam a zonas de falha; e (3) **modernos**, encontrados nas aluviões, paleovales, terraços e eluviões.

Para Faraco *et al.* (1996), os depósitos primários encontrados na região do Tapajós estão, em sua maioria, associados a **zonas de cisalhamento e veios de quartzo mesotermiais**, tendo como hospedeiras rochas diversas (vulcânicas, metassedimentares e graníticas).

Segundo Robert (1996), dois estilos principais de depósitos foram identificados na região do Tapajós: (1) **ouro associado a veios de quartzo**, constituídos por veios polimetálicos com quantidades variáveis de calcopirita, galena e esfalerita e dominados por quartzo de textura maciça a bandada. A alteração hidrotermal consiste de uma zona proximal onde predominam sericita-pirita (+ feldspato potássico) e uma zona periférica contendo clorita-epidoto-calcita. A ausência de deformação penetrativa e metamorfismo nas rochas hospedeiras sugere que os depósitos se formaram em níveis crustais rasos. e (2) **ouro disseminado ou associado a zonas de stockwork**, com zonas auríferas associadas a sulfetos disseminados em granodioritos e em zonas de *stockwork*, sugerindo associação com ambiente “pórfito” (Sillitoe 1991). É apresentado um modelo onde grandes sistemas hidrotermais estariam centrados em intrusões tipo Maloquinha, com os depósitos disseminados ocupando preferencialmente a região de cúpula e os depósitos tipo veio localizados nas zonas periféricas das intrusões. Nesse modelo seria possível a formação de depósitos em veios epitermais, em zonas de substituição de alta sulfetação, em veios tipo adularia-sericita, em zonas disseminadas em rochas fraturadas, em zonas de falha e nas zonas de contato com rochas do embasamento.

Para Araneda *et al.* (1998) os depósitos encontrados na região do Tapajós estão relacionados a: (1) **veios de quartzo**, (2) **stockwork**, (3) **sulfetos disseminados** e (4) **sulfetos maciços em zonas de cisalhamento**.

Coutinho *et al.* (1998) relacionam a mineralização aurífera do Tapajós a intrusões graníticas, com a geração de dois tipos de depósitos: (1) **tipo veio**, relacionados aos granitóides tipo Cuiú-Cuiú em associação com diques máficos/ultramáficos e lamprofíricos, condicionados por zonas de cisalhamento dúcteis direcionais (*mesothermal lode gold*), e apresentando enriquecimento em Cu e Pb; e (2) **tipo disseminado/stockwork**, com subordinadas zonas de alteração hidrotermal pobres em metais-base (Cu-Pb-Zn), condicionadas por estruturas geradas durante as intrusões (*porphyry gold*).

Para Dreher *et al.* (1998), a ocorrência de adularia associada a veios colocados a baixa profundidade junto a rochas subvulcânicas preservadas de deformação/metamorfismo sugere a existência de depósitos de ouro **tipo epitermal** no Tapajós.

Martini (1998) advoga que na região do Tapajós o ouro ocorre associado a um ambiente **anorogênico epizonal a epitermal** de idade mesoproterozóica. Os depósitos primários aparecem principalmente associados a veios de quartzo, com algumas ocorrências tipo disseminado e *stockwork*. As principais hospedeiras são rochas graníticas tipo Parauari e Maloquinha, tendo como alteração hidrotermal a sericitização e a silicificação. Falhas regionais condicionam o posicionamento das intrusões e o fluxo dos fluidos mineralizantes.

A ocorrência de ouro em rochas metamórficas polideformadas (xisto máfico intercalado com quartzo-sericita xisto e quartzito) indica a possibilidade de seqüências vulcanossedimentares abrigarem depósitos **tipo mesotermal** orogênico (Oliveira *et al.* 1999). O estudo de inclusões fluidas efetuado por Klein (1999) sugere a existência de fluidos metamórficos na região do Tapajós, o que leva ao autor propor também a existência desse tipo de depósito.

Juliani (2001) ressalta a importância de depósitos ligados a **sistemas epitermais high e low-sulfidation** no Grupo Iriri, que podem conter depósitos filoneanos de alto teor ou depósitos em zonas oxidadas associadas a zonas de *sílica cap*.

Segundo Juliani *et al.* (2001), o granito Batalha (tipo Parauari) apresenta várias fases de alteração hidrotermal, estando os maiores teores em ouro ligados à alteração sericítica. Os veios de quartzo portadores de ouro grosso são produto de reconcentração em zonas de cisalhamento que cortam o granito. Os autores concluem que os granitos tipo Parauari, principalmente suas fácies mais tardias, apresentam potencial para mineralizações **tipo Cu-Au pórfiro**.

Santos *et al.* (2001) publicaram uma síntese sobre o conhecimento dos depósitos de ouro na Província Tapajós. Propõem uma classificação dos depósitos existentes em: (1) **orogênicos**, hospedados em rochas turbidíticas (disseminados e em venulações de quartzo + pirita); e (2) **relacionados a intrusões**, epizonais (veios de quartzo + pirita preenchendo falhas extensionais rúpteis, tipo Coreano), disseminado/*stockwork* (tipo pórfiro).

5.3. Geologia local

Na região do garimpo Fazenda Pison, afloram rochas vulcânicas ácidas do Grupo Iriri e rochas intrusivas da Suíte Intrusiva Maloquinha, ambas pertencentes ao Supergrupo Uatumã (Figura 1). O Grupo Iriri é subdividido nas formações Salustiano (vulcânicas ácidas) e Aruri (piroclásticas) (Andrade *et al.* 1978, CPRM 1999). Vários garimpos localizados na folha Vila Mamãe Anã situam-se sobre esses litotipos, incluindo Fazenda Pison, São Félix, Doze de Outubro, Seta de Ouro, Canela, Abacate e Modelo (CPRM 1999).

As rochas do Grupo Iriri ocorrem principalmente na forma de derrames, com alguma contribuição piroclástica. Estudos litogeoquímicos em escala regional (CPRM 1999)

mostraram que essas rochas possuem tendências subalcalinas com *trend* calcioalcalino, são de alto potássio, peraluminosas, com predomínio dos tipos ácidos. Outra característica encontrada foram os altos valores radiométricos apresentados nos levantamentos geofísicos regionais.

Estudos geocronológicos realizados em escala regional pela CPRM (1999) em riodacito e dacito revelaram idades de 1888 $\pm$ 7 Ma e 1893 $\pm$ 5 Ma. Lamarão *et al.* (1999) obtiveram idades de 1877 $\pm$ 4 Ma para ignimbritos e 1890 $\pm$ 2 Ma para riolitos. Dall’Agnol *et al.* (1999) obtiveram idades de 1888 $\pm$ 2 Ma em riolitos. Santos *et al.* (2001) estudaram rochas ácidas pelo método U/Pb em zircão (SHRIMP) obtendo idades de 1853 $\pm$ 9 Ma e 1875 $\pm$ 25 Ma.

Segundo RTDM (1995), afloram na área da Fazenda Pison:

- (1) rochas vulcânicas ácidas do Grupo Iriri (riolitos, riodacitos, piroclásticas, andesitos), às vezes apresentando magnetismo, e níveis subordinados de sedimentos “tipo wacke”;
- (2) rochas intrusivas de natureza ácida, pertencentes à Suíte Intrusiva Maloquinha, representadas por biotita-granitos (encontrados fora da área avaliada) e granófiros;
- (3) diques e *sills* de diabásio muito fino, pertencentes à Suíte Crepori, interceptados em trabalhos de sondagem;
- (4) latossolos residuais (não mapeados) que cobrem as litologias descritas, por vezes com espessuras superiores a 10 m, e couraças ferruginosas descontínuas; e
- (5) aluviões recentes, constituídas por camadas e lentes inconsolidadas de argila, silte, areia e cascalho que ocupam o leito e as planícies de inundação das drenagens locais.

A área é cortada por grandes lineamentos NW-SE (os mais importantes), NE-SW, NNE-SSW e ENE-WSW, que refletem as estruturas observadas nas rochas mais antigas. Esse sistema de estruturas aparece na escala local gerando falhas com rejeito direcional de baixa amplitude e deslocamentos verticais de médio a alto ângulo, colocando lado a lado blocos litologicamente distintos. O cisalhamento observado é predominantemente rúptil, restrito às proximidades dos falhamentos.

Figura 3 - Esboço geológico da região da Fazenda Pison, segundo RTDM (1995).

A Figura 3 mostra as litologias aflorantes nos arredores do garimpo Fazenda Pison. A mineralização encontra-se associada a um sistema de veios centimétricos de quartzo arranjados em estrutura *stockwork*, hospedados em rocha granofírica fanerítica muito fina da Suíte Intrusiva Maloquinha, densamente fraturada/cataclasada e intensamente hidrotermalizada (alteração potássica). A zona mineralizada apresenta como paragênese quartzo-pirita-hematita/magnetita, com sulfetos de cobre em pequena proporção (esfalerita também é reportada); e encontra-se envelopada por um halo externo onde predominam a epidotização e a silicificação; sericitização e carbonatação também foram observadas (RTDM 1995).

Neste trabalho é utilizado o termo “**minério primário**” para designar o minério presente na rocha fresca, livre do intemperismo e o termo “**minério secundário**” para designar o minério presente no regolito, atacado pelo intemperismo mesmo que apenas parcialmente.

6. Revisão bibliográfica

6.1. A exploração de ouro nos últimos 30 anos

As reservas de ouro mundiais (medida + indicada) estavam estimadas em 49.000 toneladas em 1999, sendo as reservas brasileiras de 1.860 toneladas (as reservas inferidas chegariam a 3.000 toneladas). Em 1999, o Brasil foi o oitavo produtor mundial, com 49 toneladas, num cenário onde a produção mundial vem diminuindo devido principalmente ao baixo preço no mercado internacional. As exportações brasileiras totalizaram 39 toneladas, marcando uma queda de quase 16%. Enquanto isso a demanda aumentou no mercado interno e estima-se que só a indústria joalheira consumiu 16 toneladas de ouro primário e reciclado (Nery *et al.* 2000).

Segundo Boyle (1979), o ouro é recuperado a partir de depósitos minerados especificamente para o metal e de uma variedade de depósitos polimetálicos nos quais ele é um subproduto. Assim, o ouro é um bom indicador de seus próprios depósitos e de vários outros, particularmente aqueles contendo cobre, prata, chumbo e zinco. Os elementos que normalmente acompanham o ouro em seus depósitos epigenéticos e podem ser utilizados como indicadores são: Si (SiO₂, quartzo), S (FeS₂, pirita), Ag, As, Sb, Te, B, Bi, Hg, Mo, W, Cu, Zn, Pb, Cd, Tl, Ba, Sr, Mn, Se, F, Cl, U e Th. Os minerais pesados mais frequentemente associados ao ouro são: magnetita, hematita, ilmenita, pirita, arsenopirita, granada, zircão e monazita. Por apresentar comportamento químico e físico diferente da maioria de seus elementos indicadores, a relação entre os halos de dispersão primária e secundária do ouro e dos indicadores é complexa. De forma geral os melhores indicadores de depósitos auríferos no solo são: Au, Ag, Hg, Sb, As, Cu, Pb e Zn.

Em média, o ouro aparece em pequenas quantidades nos solos, mas o elemento está enriquecido em certos tipos de solo e produtos do intemperismo; um certo enriquecimento foi observado no horizonte A (húmico) em numerosos locais, e nos horizontes B e C diretamente

sobre seus depósitos. Durante o intemperismo dos depósitos de ouro/prata os dois metais tendem a se concentrar em partículas de ouro nativo nos detritos intempéricos, principalmente lateritos. Essas partículas têm origem residual ou química, isto é, as partículas crescem ou se juntam pela adição de ouro e prata presentes em soluções provenientes do intemperismo das rochas e dos sulfetos presentes nos veios mineralizados. Com o prosseguimento do intemperismo as partículas podem diminuir em tamanho, sendo parcialmente dissolvidas. Uma vez que a prata é mais móvel (solúvel) que o ouro, os processos químicos de solução e reprecipitação geralmente levam a um aumento da pureza das partículas conforme se aumenta a distância do depósito. Além disso, as porções externas das partículas apresentam muitas vezes uma pureza maior que o seu interior, uma feição que corrobora com a teoria de adição de ouro a partir das soluções durante seu transporte mecânico (Boyle 1979).

A exploração de ouro vem se tornando cada vez mais difícil e competitiva. Para encontrar os futuros depósitos a indústria mineral tem enfrentado extensos mantos intempéricos, calotas de gelo e densas florestas. Além disso, a legislação de proteção ao meio ambiente está cada vez mais exigente, envolvendo custos adicionais para as empresas de mineração no tocante à recuperação de áreas degradadas, controle na emissão de efluentes, etc. Portanto, depósitos de grande porte são os mais procurados pela indústria mineral e o sucesso na exploração é essencial, se traduzindo na eficiência em identificar alvos potencialmente econômicos e em eliminar áreas estéreis.

A escolha dos métodos de trabalho deve levar em consideração vários fatores (Bradshaw 1975, Boyle 1979, Thomson 1986, Butt & Zeegers 1992). O estilo primário do depósito a ser encontrado define os elementos que podem ser utilizados na prospecção; o ambiente secundário influencia o comportamento destes elementos e seu modo de dispersão. A posição da mineralização em relação à superfície, a presença de material transportado sobre o alvo, e a escala de trabalho também influenciam nas técnicas aplicadas, que geralmente aumentam em sofisticação conforme se aproxima a definição do depósito. Os processos de intemperismo químico, erosão e sedimentação (atuais e pretéritos) afetam de maneira profunda a expressão superficial da geologia e geoquímica das mineralizações existentes em subsuperfície. Estes processos levam à (1) formação de depósitos de origem supergênica, ou (2) à redistribuição do ouro de maneira que haja uma diluição dos teores nos materiais do regolito resultante. Portanto, sendo o processo de dispersão geoquímica secundária parte integrante da evolução intempérica, ele reflete não só as características da mineralização primária, mas também as transformações impostas pelo ambiente. Seu conhecimento é de fundamental importância para uma correta avaliação dos recursos minerais existentes.

Assim, a palavra chave na exploração geoquímica é “confiabilidade”, que reflete a probabilidade de se obter e reconhecer indicações que um corpo de minério está (ou não) presente na área de pesquisa (Hawkes & Webb 1962).

Durante a década de 1970 um grupo de geoquímicos canadenses percebeu que havia um número considerável de casos históricos, e que algumas conclusões generalizadas poderiam ser feitas a respeito dos mecanismos de dispersão geoquímica e da morfologia das anomalias esperadas para cada situação. Perceberam também que essas feições poderiam ser classificadas de acordo com certas feições-chave e assim simplificadas numa série de modelos conceituais. O resultado foi a publicação editada por Bradshaw (1975), intitulada “Conceptual Models in Exploration Geochemistry: The Canadian Cordillera and Canadian Shield”. Várias outras publicações se seguiram, focalizando outros terrenos de características específicas

(Kauranne 1976, Lovering & McCarthy 1978, Butt & Smith 1980). Todos esses autores fazem uso do conceito de geoquímica da paisagem (Fortescue 1975), que considera a paisagem um sistema dinâmico envolvendo as relações entre vegetação, solo, rochas, atmosfera, águas superficiais e subterrâneas, geomorfologia e geologia. Nenhum meio de amostragem é considerado isoladamente e a interação litosfera-hidrosfera-biosfera-atmosfera é considerada sob um dado conjunto de condições climáticas. Desta maneira, o ambiente é considerado na sua totalidade, com todos os elementos. Chega-se assim a uma fundamentação lógica para a comparação sistemática de informações obtidas na exploração geoquímica. Dessa forma, é possível conjugar informações sobre o relevo, halos de dispersão, mineralogia e teores de diversos elementos químicos nos diferentes horizontes de solo, etc. O objetivo é descrever de maneira clara e facilmente compreensível os princípios e mecanismos de formação das anomalias que governam o uso da exploração geoquímica.

Em 1992, Butt & Zeegers discutiram a exploração geoquímica em regolitos para terrenos tropicais e subtropicais, apresentando modelos conceituais descrevendo a dispersão geoquímica nas principais zonas climáticas-geomorfológicas. Os modelos apresentam os principais mecanismos de dispersão que atuaram em cada região e ambiente, e indicam os procedimentos de exploração mais adequados. Apesar das condições geológicas, geomorfológicas e ambientais serem diferentes para cada localidade, de forma que a resposta geoquímica para uma mineralização é sempre única, muitas características da dispersão permanecem inalteradas para grandes regiões. Estas características foram resumidas na forma de modelos geoquímicos de exploração que ilustram a natureza da expressão superficial da mineralização.

6.2. Origem e evolução do manto intempérico na Amazônia

Os paleoclimas do Mesozóico e Cenozóico tiveram um papel importante no desenvolvimento dos perfis lateríticos observados atualmente na Amazônia e na África (Tardy *et al.* 1991). As couraças ferruginosas presentes na faixa intertropical do globo vêm sendo estudadas principalmente na África (Nahon 1986, Ambrosi & Nahon 1986, Beauvais & Colin 1993), sendo que atualmente há um consenso de que elas são de origem pedogenética e resultam do intenso intemperismo sob clima tropical úmido de estações contrastadas. O perfil clássico (Tardy & Nahon 1985) apresenta, da base para o topo, as seguintes unidades:

- a) rocha-mãe;
- b) saprolito;
- c) zona mosqueada; e
- d) couraça ferruginosa.

A rocha-mãe é essencialmente fresca, podendo apresentar minerais secundários penetrando fraturas e juntas. O saprolito é geralmente espesso, onde o intemperismo é isovolumétrico. Os minerais primários estão pseudomorfizados por argilo-minerais e goethita (apenas quartzo e minerais resistentes permanecem sãos). A zona mosqueada apresenta intensa reorganização textural e as feições primárias desaparecem; desenvolve-se então uma

matriz argilosa e nódulos ferruginosos. A couraça ferruginosa é geralmente maciça (devido a coalescência dos nódulos ferruginosos).

O processo de gênese das couraças inicia-se com o intemperismo dos minerais primários em caolinita e oxi/hidróxidos de ferro, com a preservação das texturas originais da rocha. Esse processo vem acompanhado por uma mudança de coloração da rocha para tons mais amarelados ou avermelhados e uma diminuição da coesão. Os elementos alcalinos e alcalino-terrosos são evacuados do perfil, assim como parte da sílica.

Com a evolução do intemperismo, começa a haver deslocamentos dos grãos residuais de suas posições originais, e todo o material argiloso é reorganizado com total obliteração das texturas originais. Essa reorganização distribui os óxidos de ferro e as argilas (plasma argilo-ferruginoso) e o material residual (esqueleto) numa *fabrica* pedológica. Os processos biológicos contribuem para essa reorganização, sobretudo nos níveis superiores do perfil de alteração.

O ferro, por influência de variações nas condições de Eh e pH, causadas pela flutuação do nível d'água e pela decomposição da matéria orgânica do solo, sofre migração por pequenas distâncias e é redistribuído, formando manchas avermelhadas. As sucessivas migrações do ferro resultam na formação de nódulos endurecidos de composição hematítica. As zonas argilosas que os envolvem sofrem lixiviação das partículas de caolinita, levando, assim à formação de uma zona nodular que, endurecida, forma a couraça. Essa evolução se dá essencialmente *in situ*, sendo que em cada horizonte é possível reconhecer feições reliquias do horizonte subjacente que lhe deu origem.

A formação das couraças ocorre em climas úmidos com uma longa estação seca, o que favorece a redistribuição do ferro. Um clima muito úmido não permite o desenvolvimento de condições alternativamente oxidantes e redutoras necessárias para a mobilização do ferro, e num clima muito seco a lixiviação das argilas é insuficiente para concentrar as concreções ferruginosas.

Quando as couraças são expostas a mudanças climáticas em direção a climas mais úmidos, elas se degradam, dando origem a níveis nodulares inconsolidados e, finalmente, a latossolos. A mudança climática em direção a climas mais secos leva à formação de horizontes esmetíticos na base do perfil e dismantelamento mecânico da couraça no topo. Essas couraças afetadas por mudanças climáticas são observadas atualmente como relictos. Tardy *et al.* (1991) elaboraram uma síntese sobre a origem e evolução das couraças lateríticas na Índia, África, Austrália e América do Sul, baseada na evolução paleoclimática dessas regiões ocorrida a partir do Cretáceo Superior em função do deslocamento dos continentes.

Na África Central úmida há várias descrições de couraças em diferentes níveis de degradação e transformação em latossolos (solos ferralíticos), compostos essencialmente por goethita e caolinita (Beauvais *et al.* 1990, Beauvais & Tardy 1991, Bilong *et al.* 1992, Bitom & Volkoff 1993). No Brasil, um caso semelhante foi estudado por Nahon *et al.* (1989) na parte sul da região amazônica, na região da Serra do Inajá, no estado do Pará. Com exceção da Serra, o relevo é suavemente ondulado a altitudes de cerca de 250 m. É nessa superfície que se encontra um sistema de couraças evoluindo para latossolos. A conclusão do estudo é de que as coberturas pedológicas aí existentes são polifásicas, compreendendo um episódio de formação de couraças em períodos de clima mais seco, seguido pelo clima mais úmido atual sob o qual as couraças estão se degradando em latossolos.

Lucas e Chauvel (1992) também interpretam que esse tipo de manto intempérico é resultado da superposição de 2 sistemas pedológicos distintos, refletindo a mudança climática que ocorreu nas regiões periatlânticas nos últimos 150 Ma (Tardy *et al.* 1991). De acordo com esses autores, o saprolito representa um sistema pedológico antigo, desenvolvido *in situ* a partir da rocha-sã e que conduziu à formação das couraças. O saprolito deve ter se formado sob condições climáticas tropicais ora úmidas ora secas, possivelmente iniciadas no Jurássico Superior ou no Cretáceo (Tardy *et al.* 1991, Vasconcelos *et al.* 1994). Durante o Terciário ou Quaternário, as condições climáticas se tornaram mais úmidas, resultando na erosão parcial do saprolito e das couraças e no desenvolvimento dos latossolos. Assim, este representa um sistema pedológico mais recente, *in situ*, formado pelo consumo da antiga couraça ou do saprolito onde a couraça já tivesse sido totalmente degradada. O latossolo é uma unidade que está em equilíbrio com as condições climáticas atuais.

Estudos isotópicos (Girard *et al.* 1997; Girard *et al.* 2000) e paleomagnéticos (Théveniaut & Freyssinet 1999) efetuados na Amazônia (Guiana Francesa) corroboram a idéia de que um intemperismo policíclico esteve atuante na região. Um aspecto particularmente interessante é que alguns autores utilizam o ouro como índice da continuidade litológica dos perfis de solo (Boyle 1979).

6.3. O comportamento do ouro no meio laterítico

O ouro é um elemento bastante inerte sob as condições físico-químicas reinantes na superfície da terra. Em consequência, geralmente comporta-se como elemento imóvel, sendo sua dispersão secundária devida predominantemente a mecanismos físicos. Apesar disso, em circunstâncias específicas, a mobilidade química do ouro durante o intemperismo pode ser demonstrada ou inferida. Nos ambientes tropicais, por exemplo, a mobilidade supérgena do ouro está bem documentada através de estudos de caso desenvolvidos na Austrália (Butt & Smith 1980, Davy & El-Ansary 1986, Mann 1984, Butt 1989, Lawrance & Griffin 1994, Mann 1998), África (Bowell 1992, Bowell *et al.* 1993a,b, Colin *et al.* 1989a,b, Colin & Vieillard 1991, Davies *et al.* 1989), Índia (Santosh & Omana 1991, Santosh *et al.* 1992) e Brasil (Oliveira & Campos 1991, Andrade *et al.* 1991, Vasconcelos & Kyle 1991, Porto & Hale 1995).

As melhores evidências de dissolução do ouro em ambiente superficial são o tamanho decrescente das partículas da base para o topo do perfil de alteração intempérica e a presença de feições indicativas de corrosão na superfície das partículas primárias encontradas nos solos (Colin *et al.* 1989a,b, Colin & Vieillard 1991, Porto & Hale 1995). A precipitação do ouro é demonstrada pela formação de cristais secundários euédricos de alta pureza, mostrando morfologias características (Freyssinet *et al.* 1989, Grimm & Friedrich 1989, Bowell 1992, Lawrance & Griffin 1994), e pela existência de pepitas de ouro que englobam goethita neoformada (Wilson 1984, Vasconcelos & Kyle 1991, Santosh & Omana 1991, Oliveira & Campos 1991, Santosh *et al.* 1992, Zang & Fyfe 1993). Outros dados que sustentam a hipótese da mobilidade do ouro em ambiente supérgeno são as elevadas concentrações de ouro dissolvido nas águas que drenam zonas auríferas (Benedetti & Boulège 1991, Andrade *et al.* 1991).

Outra feição comum em partículas de ouro provenientes de perfis de alteração é a presença de bolsões e auréolas de ouro puro em torno dos grãos de ouro primário. Várias explicações, resumidas nos trabalhos de Groen *et al.* (1990) e Howell (1992), foram propostas para justificar a existência das auréolas de ouro puro nas partículas de ouro primário. Segundo esses autores, podem ser agrupadas em três modelos: (1) dissolução preferencial da prata durante o intemperismo, (2) precipitação de ouro puro ao redor das partículas de ouro primário (cementação) e, (3) processo de auto-eletrorefinamento através do qual o electrum dissolve na interface grão-solução e o ouro imediatamente reprecipita na superfície do grão.

O modelo de dissolução preferencial da prata supõe que os átomos de prata se difundiriam do interior do grão até a superfície, de onde seriam levados em solução. Testes experimentais desse modelo indicaram que o tempo suficiente para a formação das auréolas seria extremamente elevado, mesmo para padrões geológicos. O segundo modelo baseia-se no fato de que o ouro pode ser dissolvido no meio superficial por ligantes, formando, por exemplo, complexos clorados (Krauskopf 1951, Cloke & Kelly 1964, Mann 1984), complexos sulfetados (Goleva 1970, Plyusnin *et al.* 1981, Webster 1986), complexos orgânicos (Baker 1978, Howell *et al.* 1993a) e complexos hidrolisados (Roslyakov 1971, Vlassopoulos & Wood 1990). A precipitação do ouro ocorreria por brusca mudança de Eh associada à oxidação do Fe^{2+} a Fe^{3+} (Mann 1984, Stoffregen 1986). A freqüente associação do ouro secundário com oxi/hidróxidos de ferro em pepitas (Wilson 1984, Vasconcelos & Kyle 1991, Santosh & Omana 1991, Oliveira & Campos 1991, Santosh *et al.* 1992, Zang & Fyfe 1993) dá sustentação a esse modelo. Finalmente, o terceiro modelo é inspirado no processo hidrometalúrgico no qual uma liga multicomponente é eletroquimicamente dissolvida com a subsequente precipitação de uma película da fase pura do metal mais nobre dissolvido. Mann (1984) realizou experimentos eletroquímicos com ligas Au-Ag sintéticas, demonstrando que o processo de eletrorefinamento produz auréolas de Au puro, semelhantes às encontradas na natureza. A purificação do ouro seria consequência das reações galvânicas na superfície do electrum, envolvendo a entrada em solução dos íons Ag^+ e Au^+ , a imediata precipitação do ouro na superfície do electrum e a lixiviação da prata em solução como Ag^+ ou AgCl_2^- . Esse processo não requer um forte gradiente de Eh para a precipitação do ouro, mas apenas uma solução que seja oxidante o suficiente para iniciar a dissolução do ouro primário. Na presença de ligantes como cianeto, tiosulfato, amônia e fulvatos, esse processo é acelerado. Do ponto de vista cinético, o último modelo é preferido para explicar as auréolas de Au puro, em relação ao modelo que envolve a dissolução do Au do *electrum*, o transporte e a precipitação em um sítio distante da fonte (Gray 1988, Gray *et al.* 1992).

O estudo morfológico e químico das partículas de ouro, além de prover argumentos para a tese da mobilidade química do ouro durante intemperismo, pode ser usado como importante ferramenta na prospecção, indicando a natureza e proximidade das fontes (Grant *et al.* 1991).

A oxidação de pirita, pirrotita e arsenopirita auríferas fornece vários compostos solúveis de ferro e arsênio, além do ouro. Este pode ser liberado na forma solúvel ou como ouro muito fino e migrar em solução na forma de colóide ou em suspensão, sendo que boa parte dele pode ser incorporada a minerais que cimentam as crostas ferruginosas (limonita).

Os principais mecanismos de dissolução, transporte e precipitação do ouro no ambiente superficial estão resumidos na Tabela 1. A compreensão desses mecanismos e do papel exercido pelo material parental, evolução pedológica, topografia e clima é crítica para o

estabelecimento de critérios para prospecção geoquímica tanto do ouro escondido dentro do regolito (depósito secundário), quanto do ouro escondido pelo regolito (depósito primário).

6.4. A exploração geoquímica de ouro na Amazônia brasileira

De maneira geral, pode-se afirmar que o potencial aurífero brasileiro está associado aos terrenos pré-cambrianos. Segundo vários autores (Tardy *et al.* 1991, Lucas & Chauvel 1992, Vasconcelos *et al.* 1994, Girard *et al.* 1997, Théveniaut & Freyssinet 1999, Girard *et al.* 2000), os terrenos hoje expostos ao clima equatorial úmido experimentaram uma evolução intempérica complexa e polifásica. Durante o Jurássico, a linha do Equador passava pelo extremo norte da América do Sul e a Amazônia passava por um clima tropical de estações contrastadas, o que favorecia a formação de couraças ferruginosas. Durante o Cretáceo e Cenozóico, a movimentação da placa Sul-americana em direção ao norte fez com que a região experimentasse um clima equatorial (desde o Maastrichtiano, Cretáceo Superior). Este clima avançou em direção ao sul, havendo uma redução das áreas de estações contrastadas no Brasil Central. Assim, em áreas ao sul da bacia do Amazonas, são encontradas couraças sendo degradadas pelo clima atual (Nahon *et al.* 1989, Beauvais & Tardy 1991, Lucas & Chauvel 1992).

Apesar do interesse do tema, poucos são os trabalhos publicados sobre o comportamento do ouro no ambiente laterítico no Brasil, sobretudo no que diz respeito à sua prospecção. Entre os principais, podem ser citados os de Carvalho (1984), Grimm & Friedrich (1989, 1990) e Vasconcelos & Kyle (1991), para o estado da Bahia, os de Michel (1987), Oliveira & Campos (1991), Porto & Hale (1995, 1996) e Oliveira & Oliveira (2000), para a região centro-oeste, e o de Varajão (1994) para Minas Gerais. Sobre a Amazônia foram publicados alguns trabalhos nos últimos anos, principalmente sobre depósitos contidos em perfis de alteração intempérica na região da Serra dos Carajás e Amazônia Oriental (Trarbach & Kotschoubey 1991, Costa 1993, Costa *et al.* 1993, Zang & Fyfe 1993 e Angélica 1996).

Costa (1993) apresenta classificação dos perfis lateríticos amazônicos em maduros e imaturos, de acordo com seu grau de desenvolvimento. Os lateritos maduros são mais antigos (do Terciário Inferior), mais complexos e caracterizados por crostas ferruginosas sobrepostas a horizontes de bauxitas e/ou fosfatos aluminosos, localizando-se em platôs isolados. Os lateritos imaturos (do Quaternário) são menos evoluídos e estão associados a superfícies planas a levemente onduladas, caracterizando-se por horizontes concrecionários ferruginosos. Depósitos auríferos podem se associar a ambos. O autor afirma ainda que os lateritos localizados em áreas cobertas por densas florestas estão sendo transformados em latossolos areno-argilosos amarelos a vermelhos, o que resultaria em novas assinaturas geoquímicas. O teor de ouro é mais alto na porção inferior do saprolito e nos horizontes ferruginosos superiores, sendo mais baixo nas demais porções do perfil intempérico. Devido a essas variações nos teores, torna-se muito importante o reconhecimento do tipo de material amostrado em cada ponto, de forma que a interpretação dos resultados analíticos seja correta.

Tabela 1 – Resumo dos ambientes químicos propícios para a mobilização do ouro por ligantes normalmente encontrados em perfis intempéricos (Modificado de Lawrance 1988).

Ligantes	Ambiente químico de dissolução	Reações de dissolução	Referências
Complexos orgânicos	Oxidante Neutro-ácido Atividade biológica	$\text{Au (electrum)} + \text{Ácido orgânico}^a + \text{O}_2 + \text{H}^+ \Rightarrow \text{Au(orgânico)} + \text{H}_2\text{O}$	Baker 1978, Bowell et al. 1993a
Complexos tiosulfatos	Oxidante Levemente ácido a levemente alcalino Baixo a moderadamente carbonatado	$\text{Au (electrum)} + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-} \Rightarrow \text{Au(S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$	Goleva 1970, Plyusnin et al. 1981, Stoffregen 1986, Webster 1986
Complexos clorados	Oxidante Ácido Alta concentração de Cl^-	$4\text{Au (electrum)} + 8\text{Cl}^- + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \Rightarrow 4\text{AuCl}_2^b + 2\text{H}_2\text{O}$	Krauskopf 1951, Cloke & Kelly 1964, Mann 1984, Webster & Mann 1984
Espécies aquosas hidrolisadas	Oxidante Alcalino	$\text{Au}^0 + \text{H}_2\text{O} + \text{OH}^- \Rightarrow [\text{AuOH(H}_2\text{O)}] + \text{e}^-$	Roslyakov et al. 1971, Vlassopoulos & Wood 1990

^aácido orgânico = CN, aminoácido, ácido húmico e outros ligantes biológicos potenciais.

^b AuCl_4^- foi produzido experimentalmente, mas o AuCl_2^- é mais provável termodinamicamente no ambiente geológico.

Segundo Angélica (1996), a oxidação de zonas sulfetadas ricas em ouro gerou perfis gossânicos (Fase I), com reprecipitação de Au associado aos óxidos e hidróxidos de ferro no topo desses perfis. Numa segunda fase, instalou-se um sistema de destruição dos *gossans* que originou perfis lateríticos maduros (Costa 1993). Durante esse novo processo intempérico (Fase II) houve uma nova redistribuição do ouro através da ação conjugada de processos físicos e químicos. Os processos físicos, de dispersão mecânica, foram controlados pela topografia, movimentos da água subterrânea e pelo estilo da mineralização primária. Os processos químicos tiveram como agentes complexos orgânicos, ácidos húmicos, cianetos e complexos aquo-hidrolisados. Numa terceira fase, episódios de movimentação neotectônica associados à instalação de um novo período de clima úmido e de uma floresta tropical deram início à formação de latossolos a partir das crostas lateríticas derivadas dos *gossans*. Essa última fase teve importância fundamental para a prospecção mineral, pois houve uma nova remobilização dos elementos químicos, com diminuição dos teores de Au em direção aos latossolos, em processo similar ao ocorrido na Fase II, e abertura maior de seu halo de dispersão. O autor conclui que para a otimização dos trabalhos de prospecção geoquímica é fundamental: (1) o entendimento da estruturação dos perfis intempéricos, (2) o uso de análises químicas multielementares, e (3) o uso de estudos mineralógicos.

6.5. Utilização de estudos orientativos

Devido ao complexo relacionamento que pode existir entre os halos de dispersão primária e secundária do ouro e seus elementos indicadores, cada cinturão aurífero é mais ou menos único e a aplicação de um mesmo modelo prospectivo em diferentes áreas do globo deve ser evitada. Dessa forma, estudos orientativos devem ser feitos antes dos trabalhos de detalhe, especialmente se tais trabalhos envolvem a utilização de materiais de superfície, tais como solo, água e vegetação (Boyle 1979, Thomson 1986).

O estudo orientativo pode ser descrito como uma série preliminar de experimentos para se determinar a dispersão geoquímica relacionada à mineralização em um dado local. Esta informação é utilizada para (1) definir os valores de *background* e anomalias, (2) definir procedimentos de campo, (3) identificar os fatores que influenciam na dispersão e os critérios para interpretação dos resultados, e (4) reconhecer as feições que devem ser observadas e descritas pelos coletores de amostras. A amostragem deve cobrir todos os tipos de condições fisiográficas e os principais tipos de solo presentes na área de interesse. Deve-se sempre ter em mente que o programa de exploração geoquímica ideal está baseado numa amostragem regular sistemática do mesmo material por toda área estudada. (Thomson 1986).

O tamanho, a forma e a intensidade das anomalias dependem de vários fatores (Bradshaw 1975, Hoffman & Thomson 1986, Thornber 1992, Butt 1992). As anomalias geradas pelos processos de dispersão mecânicos tendem a apresentar alto contraste e dimensões limitadas, podendo ser modificadas por deslocamentos em situações de meia-encosta e diluição por mistura com material estéril. As anomalias hidromórficas tendem a ser amplas e de baixa amplitude nas proximidades da mineralização, mas também podem produzir feições secundárias deslocadas, similares e, muitas vezes, de maior contraste que as observadas na mineralização (por exemplo, nas proximidades de cursos d'água). O tamanho e disposição do alvo influenciam diretamente no intervalo e na orientação da malha de

amostragem. É extremamente importante que se defina se o material amostrado se desenvolveu *in situ* ou se trata de material transportado.

Outra variável bastante importante é a relação custo/benefício de um trabalho prospectivo. Otimizar os procedimentos de amostragem, preparação, análise das amostras e interpretação dos resultados é essencial. Mas isso não significa utilizar as técnicas mais sofisticadas sempre. A escolha da metodologia a ser aplicada deve ser feita levando-se em consideração os parâmetros descritos acima, associados à escala de operação.

A exploração mineral na região amazônica apresenta dificuldades logísticas específicas impondo, muitas vezes, desafios adicionais ao prospector. As condições precárias de infraestrutura (meios de transporte, apoio médico-hospitalar, abastecimento de energia elétrica, água, alimentos e combustível), a dificuldade de reposição de pessoal e equipamento especializado, a existência de animais perigosos/peçonhentos e áreas com doenças endêmicas (malária, febre amarela, leishmaniose) devem ser cuidadosamente examinadas.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

1. Amostragem

A amostragem foi realizada em duas etapas de campo distintas: (1) entre 23 e 27 de agosto de 1998; e (2) entre 5 e 25 de novembro de 1999. Teve como objetivos caracterizar o manto intempérico presente, investigar o comportamento do ouro durante o intemperismo e, finalmente, definir alguns parâmetros para utilização do solo como meio para exploração de ouro na região. As Figuras 4 e 5 apresentam uma visão geral dos sítios de amostragem:

- (1) duas trincheiras abertas pelos garimpeiros (T1 e T2) que expõem veios de quartzo mineralizados;
- (2) um furo de sondagem rotativa (FFP1) realizado pela empresa Rio Tinto Desenvolvidos Minerais (RTDM); e
- (3) três linhas paralelas que cortam a direção dos veios mineralizados, sendo que duas delas (Linha 1 e Linha 2) passam sobre os veios mineralizados conhecidos, e uma terceira (Linha 3) que passa por uma área sem informação prévia. Ao longo dessas linhas foi realizada amostragem de solo a trado manual.

As amostras coletadas podem ser divididas em 4 grupos distintos (Tabela 2):

- **amostras de minério** – fragmentos centimétricos de veios de quartzo coletados em T1 e T2, e no testemunho de sondagem do furo FFP1;
- **amostras totais (*bulk samples*)** – porções de aproximadamente 2 kg de cada um dos materiais inconsolidados presentes nas trincheiras T1, T2, e nas Linhas 1, 2 e 3;
- **amostras indeformadas** – blocos de aproximadamente 5 cm x 10 cm x 3 cm de cada material presente em T1 e T2. As amostras foram coletadas em um perfil vertical em cada trincheira, no mesmo local onde foram coletadas as amostras para os concentrados de bateia; e
- **amostras para bateamento** – porções de aproximadamente 20 litros de cada material presente em T1 e T2, e uma porção de 0,94 kg contendo vários fragmentos do furo de sondagem FFP1 entre as profundidades de 25 e 28 m.

Tabela 2 – Amostras coletadas nos diferentes tipos de material presentes no Garimpo Fazenda Pison.

Tipo de amostra	T1	T2	Linha 1	Linha 2	Linha 3	FFP1	Total de amostras
Minério	3	3	0	0	0	5	11
Total	6	150	37	48	46	0	287
Indeformada	3	10	0	0	0	0	13
Bateia	2	11	0	0	0	1	14
Total de amostras	14	174	37	48	46	6	325

Para a identificação das amostras foi utilizado o seguinte código:

- AT = Latossolo Amarelo, topo;
- AB = Latossolo Amarelo, base;
- BT = Latossolo Vermelho, topo;
- BB = Latossolo Vermelho, base;
- CT = Couraça, topo;
- CB = Couraça, base;
- D = Zona de Transição, topo;
- E = Zona de Transição, base
- F, G, H, I = Saprolito – Granófiro;
- J = Saprolito – Bolsão de Quartzo; e
- K = Saprolito – Zona de *Stockwork*.

Figura 4 - Vista aérea do Garimpo Fazenda Pison onde se pode observar a localização das trincheiras T1 e T2, do furo de sondagem FFP1 e a posição aproximada das Linhas 1, 2 e 3.

Figura 5 - Esboço geológico da área estudada (RTDM, 1995) apresentando as mineralizações conhecidas nas trincheiras T1 e T2, o furo de sondagem FFP1 e as três linhas de amostragem de solo.

1.1.Trincheiras

As duas trincheiras existentes, T1 e T2 (Figuras 6 a 11), foram cavadas pelos garimpeiros locais, a partir da informação sobre a localização dos veios, obtida durante os trabalhos de lavra das aluviões. O material dos veios foi moído, verificando-se então a presença de ouro. A seguir iniciou-se o trabalho de lavra do ouro nas porções superiores e mais oxidadas dos veios e das rochas encaixantes próximas.

Trincheira T1

A trincheira T1 (Figura 6) tem 8 m de altura, 3 m de largura e cerca de 10 m de comprimento segundo a direção dos veios de quartzo (N20E). Ela foi escavada pelos garimpeiros locais, após a descoberta de veios auríferos onde hoje se encontra a trincheira T2.

O perfil exposto é relativamente simples em sua estruturação contando, da base para o topo, com:

- saprolito – onde se observa o granófiro ainda bastante coeso; e
- pedolito – subdividido em três unidades: (1) zona de transição, (2) latossolo vermelho e (3) latossolo amarelo.

A Figura 6 e a Tabela 2 apresentam as amostras coletadas em cada uma das unidades da trincheira T1.

Trincheira T2

A trincheira T2 (Figuras 4, 5 e 7) apresenta 11 m de altura, 16 m de largura e cerca de 20 m de comprimento no sentido dos veios mineralizados (N20E). Ela foi escavada pelos garimpeiros locais, que constataram a presença de veios de quartzo na base do cascalho (topo do saprolito) que vinha sendo lavrado no igarapé. Os garimpeiros aprofundaram a cava até serem encontrados sulfetos, quando então a recuperação do ouro passou a ser muito baixa. A seguir, as escavações seguiram a direção dos veios (rumo NE), sempre respeitando a faixa do minério oxidado.

A trincheira T2, na época da amostragem, apresentava 4 faces expostas, segundo o esquema da figura 7. A descrição de cada uma das faces, T2A, T2B, T2C e T2D, consta das figuras 8, 9 10 e 11. A amostragem foi realizada nas faces T2A, T2B e T2C.

Figura 6 - Perfil esquemático da trincheira T1 apresentando locais de amostragem.

Figura 7 - Disposição das faces T2A, T2B, T2C e T2D na trincheira T2

Figura 11 - Face T2D exposta na trincheira T2, apresentando a estruturação das diferentes unidades dentro do regolito.

Figura 9 - Face T2B exposta na trincheira T2, apresentando os locais de amostragem e a estruturação das diferentes unidades dentro do regolito.

T2C

Figura 10 -Face T2C exposta na trincheira T2, apresentando os locais de amostragem e a estruturação das diferentes unidades dentro do regolito

Figura 11 - Face T2D exposta na trincheira T2, apresentando a estruturação das diferentes unidades dentro do regolito.

O perfil exposto em T2 é mais complexo que o perfil presente em T1, apresentando, da base para o topo:

- saprolito - onde se observam duas unidades distintas: (1) granófiro; e (2) zona de *stockwork*; e
- pedolito - contendo quatro unidades distintas: (1) zona de transição, (2) couraça, (3) latossolo vermelho e (4) latossolo amarelo.

1.1.1. Amostras de minério (veios de quartzo)

Três amostras de minério (compostas por fragmentos de veios de quartzo e saprolito da rocha encaixante) foram coletadas em cada trincheira. Os locais de amostragem concentraram-se em três pontos de cada trincheira, dispostos em perfis verticais dentro do saprolito (granófiro), e foram localizados com o auxílio de uma trena. As profundidades de amostragem foram variadas, sendo as amostras escolhidas com base na presença de estruturas *boxwork*. Uma amostra de aproximadamente 0,5 kg foi coletada em cada ponto de amostragem.

Previamente à coleta dos fragmentos de veios de quartzo, a superfície das trincheiras foi raspada. O material da rocha encaixante não foi coletado. Para a retirada das amostras foi utilizado um martelo geológico e o material foi colocado em sacos plásticos e depois em sacos de algodão previamente identificados. A amostragem foi feita com o auxílio do martelo, que era lavado entre as coletas.

1.1.2. Amostras totais

As amostras foram coletadas em perfis verticais e localizadas com o auxílio de uma trena. Na trincheira T1 foi amostrado apenas um perfil e na trincheira T2 foram amostrados 21 perfis espaçados de 1 metro entre si. Sempre que possível, foram coletadas amostras no topo e na base de cada material presente.

Antes do início da amostragem a superfície das trincheiras foi raspada com o auxílio de uma pá para a retirada de qualquer material estranho. Para a retirada das amostras foi utilizado um martelo geológico, sendo o material imediatamente colocado em saco plástico e em saco de algodão. Evitou-se sistematicamente a presença de raízes e outros fragmentos de matéria orgânica. A profundidade de coleta de cada amostra foi variável, dependendo do comportamento de cada material nos perfis, com exceção feita para a amostra de topo no latossolo amarelo, que foi retirada sempre a 0,5 m da superfície do solo. Procurou-se obter sempre uma amostra de aproximadamente 2 kg, confinada numa área de 20x10 cm² da face exposta do perfil. A amostragem foi feita com o auxílio do martelo, que era lavado entre cada coleta.

1.1.3. Amostras indeformadas

As amostras indeformadas foram coletadas em cada um dos materiais presentes nas trincheiras T1 e T2, exceto para o bolsão de quartzo encontrado em T2 que, por se tratar de material extremamente friável, não foi possível ser amostrado com a técnica utilizada. As amostras foram coletadas em pontos localizados junto aos locais de amostragem para concentrados de bateia.

As amostras foram coletadas utilizando-se uma faca de metal para o corte e exposição do material que se desejava amostrar e pequenas caixas de papel-cartão com dimensões de 5 x 10 x 3 cm para a guarda e proteção da amostra. Uma vez dentro da caixa de papel-cartão, o material foi envolvido por filme plástico PVC (para conservação da umidade natural), a seguir foi envolvida por um saco plástico contendo bolhas de ar, visando a proteção de possíveis choques mecânicos. Finalmente a amostra era identificada.

1.1.4. Amostras para bateamento (20 litros)

As amostras para bateamento foram coletadas nos latossolos vermelho e amarelo da trincheira T1 (Figura 6 e Tabela 2) e em todos os materiais observados na trincheira T2 (Figuras 7 e 10, e Tabela 2). As amostras foram coletadas em porções individuais dentro de um mesmo material, segundo um perfil vertical localizado sobre a zona mais rica em ouro das trincheiras. A zona de *stockwork* e o bolsão de quartzo presentes em T2 mostraram um ligeiro deslocamento em relação às outras amostras dentro desse perfil.

Utilizou-se para a coleta do material um martelo geológico, sendo o material coletado em uma bateia de 10 litros. Assim que os 10 litros de material eram atingidos o material era transferido para sacos plásticos previamente identificados até que 20 litros fossem totalizados. Tanto a bateia quanto o martelo eram lavados em água corrente ao final de cada amostragem.

1.2. Linhas de amostragem de solo

As Linhas 1, 2 e 3 (Figuras 4 e 5) foram abertas durante este trabalho de pesquisa utilizando-se uma bússola modelo Brunton para as medidas de direção e de declividade, e uma trena de 50 metros para as medidas de distância. O ponto inicial de controle foi colocado junto ao furo de sondagem FFP1 (Linha 1, L1-1000), cujas coordenadas UTM são 9445300N e 413300E, segundo RTDM (1995). As linhas foram abertas de forma que:

- passassem sobre as mineralizações conhecidas nas trincheiras T1 e T2;
- um variado número de feições geomorfológicas fosse interceptado;
- o ponto onde se localiza a boca do furo de sondagem FFP1 fosse coincidente com o ponto de número 1000 na Linha 1;
- o ponto 2000 na Linha 2 fosse coincidente com a parte central da trincheira T2, embora deslocado 25 metros de T2 no rumo N20E;
- o ponto 3000 na Linha 3 fosse deslocado 100 metros no rumo N20E do ponto 2000 na Linha 2; e
- passassem sobre os vários tipos litológicos presentes (segundo RTDM 1995).

Antes da amostragem as distâncias horizontais das linhas foram corrigidas em função dos ângulos dos aclives e declives encontrados em cada uma delas, de forma que, quando plotados em mapa, os locais de amostragem guardassem a distância de 25 metros entre si. Assim, os locais de amostragem na Linha 1 seguem em ordem crescente a partir do ponto L1-1000 rumo NE (por exemplo, L1-1025, L1-1050 etc.) e em ordem decrescente a partir do ponto L1-1000 rumo SW (por exemplo, L1-975, L1-950 etc.). O mesmo é válido para a Linha 2 em relação ao seu ponto inicial L2-2000, e para a Linha 3 em relação ao seu ponto inicial L3-3000.

Ao longo das linhas, o perfil intempérico compreende os seguintes materiais da base para o topo (Figura 12):

- **saprolito** – rocha intemperizada compacta onde não foi possível realizar a amostragem pois o equipamento utilizado não foi capaz de perfurar o material;
- **latossolo vermelho** – material semelhante ao observado nas trincheiras T1 e T2, de espessura variável (entre 0 e 6 metros) com máximos nas áreas topograficamente mais altas, onde a fábrica primária se encontra totalmente destruída. Este material foi sempre amostrado em sua base;
- **latossolo amarelo** – material semelhante ao observado nas trincheiras T1 e T2, de espessura variável (entre 1 e 3 metros) com máximos nas áreas topograficamente mais altas. Este material foi observado como cobertura em toda a área estudada e foi amostrado sempre a 0,5 metro de profundidade; e
- **argila mosqueada** – material semelhante ao latossolo amarelo, porém com pisólitos avermelhados suspensos na matriz, encontrado nas áreas baixas, abaixo do latossolo amarelo. Esse material foi amostrado em dois pontos da linha 3.

A amostragem nas Linhas 1, 2 e 3 foi feita com o auxílio de um trado manual (*auger*) com capacidade para furar até 8 m de profundidade. Isto possibilitou a coleta de amostras dos latossolos vermelho e amarelo, além de argilas mosqueadas em áreas próximas aos cursos d'água (Figura 12). Esse tipo de ferramenta não conseguiu penetrar no saprolito e, portanto, a

amostragem nas linhas limitou-se ao pedolito. Todas as amostras coletadas possuíam peso aproximado de 2 kg.

Em cada ponto de amostragem a primeira amostra foi sempre coletada a 0,5 m de profundidade. Com este procedimento evitou-se a contaminação de material da base de um furo para o início do outro. Também se evitou a contaminação por material de superfície, uma vez que o trânsito de garimpeiros pela área pode ter modificado as condições superficiais originais.

Toda vez que uma mudança era observada no material de amostragem (por exemplo, a presença de grânulos ferruginosos ou fragmentos de quartzo), uma amostra era coletada. A amostra final de cada furo foi coletada próxima ao topo do saprolito, onde não fossem observados fragmentos do mesmo. Em todos os furos o topo do saprolito foi encontrado, com exceção de alguns furos localizados em áreas próximas às drenagens, onde a argila mosqueada esteve presente.

As amostras foram colocadas primeiramente em sacos plásticos e a seguir em sacos de algodão identificados conforme o ponto amostrado e a profundidade da amostra. Para a identificação do local e da profundidade de amostragem foi utilizado o seguinte código:

- L1, L2 e L3 – amostra coletada na Linha 1, Linha 2 ou Linha 3, respectivamente;
- Numeral de 3 ou 4 algarismos – referente à localização do ponto de amostragem na linha. Os numerais 1000, 2000 e 3000 localizam-se no centro das linhas 1, 2 e 3, respectivamente; e
- Letras A, B, C etc. – indicando a profundidade crescente da amostra, que era registrada na caderneta de campo.

Assim, tomando como exemplo a amostra L1-925A, temos que esta foi coletada na Linha 1, a uma distância de 75 metros rumo SW do ponto central da linha, a uma profundidade de 0,5 metros.

Ainda no campo, as amostras foram secas ao sol, mantidas em seus sacos plásticos originais.

Figura 12 - Perfis esquemáticos para as Linhas 1, 2 e 3 apresentando os materiais presentes e os locais de amostragem de solo.

1.3. Furo de sondagem FFP-1

Este furo (Figuras 3, 4, 5 e 13) localiza-se no ponto central da Linha 1, entre as trincheiras T1 e T2; foi feito com um mergulho de 60° na direção AZ270, tendo alcançado 183,6 m de profundidade. Parte das caixas contendo os testemunhos de sondagem estavam disponíveis para amostragem na Fazenda Pison, porém em más condições de amostragem. As caixas contendo as zonas de minério mais rico estavam guardadas em um depósito pertencente a RTDM na cidade de Itaituba (PA), e encontravam-se em melhores condições de amostragem.

Cinco amostras das caixas de minério mais rico foram escolhidas para estudo com base na descrição apresentada pela RTDM (1995), pela presença de sulfetos, pela diversidade dos halos de alteração hidrotermal, ou pela presença de estruturas tipo *boxwork*, que indicam a existência pretérita de sulfetos. As amostras coletadas foram provenientes das seguintes profundidades:

- 22 m;
- 25 m;
- 32 m;
- 92 m; e
- 100 m.

Para a recuperação de partículas de ouro primárias foram utilizados 940 gramas de fragmentos dos testemunhos de sondagem coletados entre as profundidades acima mencionadas.

Ainda segundo RTDM (1995), foram executados 8 furos de sondagem rotativa (DDH), totalizando 1395,25 m de perfuração. Apenas o furo FFP-1 apresentou resultado significativo (32 m @ 5,23 ppm Au, Figura 13). Este furo teve por objetivo testar a mineralização conhecida na chamada “Cava Norte”, que corresponde à trincheira T2 neste trabalho. As unidades litológicas cortadas pelo furo FFP-1 foram o granófiro mineralizado e rochas vulcânicas ácidas com intercalações de tufos.

Para a recuperação de partículas de ouro primárias foram utilizados 940 gramas de fragmentos de testemunhos de sondagem coletados entre as profundidades de 25 e 28 metros do furo FFP-1.

Figura 13 – Perfil esquemático do furo de sondagem FFP-1 (modificado de RTDM 1995) com a localização das amostras coletadas.

2. Preparação das amostras

Os 4 grupos de amostras coletados tiveram tratamento distinto. A Figura 14 resume os procedimentos adotados e a destinação de cada amostra.

Figura 14 – Diagrama esquemático com a preparação e análises das amostras.

2.1. Amostras de minério (trincheiras T1, T2 e FFP-1)

Amostras de minério compreendem fragmentos de veios de quartzo (+ rocha encaixante) coletados em testemunhos de sondagem, e no saprolito das trincheiras T1 e T2. As amostras foram embaladas em sacos plásticos e de algodão no campo.

No laboratório os fragmentos foram preparados da seguinte maneira:

- secos em estufa a 70° C;
- quarteados;

- parte da amostra foi triturada no britador de mandíbulas e moída em moinho de anéis de ferro até que tudo passasse pela peneira # 80. Essas amostras foram enviadas para análise química;
- parte da amostra foi montada em lâminas de vidro ou em blocos de resina, que sofreram polimento. Após estudos ao microscópio óptico algumas seções polidas foram escolhidas para recobrimento com película de carbono para estudo ao microscópio eletrônico e microsonda; e
- 940 g de fragmentos de FFP1, coletados entre as profundidades de 25 m e 32 m, foram triturados no britador de mandíbulas e moídos em moinho de disco. Os grãos de ouro separados foram montados em lâminas de vidro e examinados ao microscópio óptico e eletrônico.

2.2. Amostras totais

No laboratório o material foi quarteado e trabalhado da seguinte maneira: as amostras foram secas em estufa a 70° C; amostras contendo fragmentos maiores que 1 cm foram britadas no britador de mandíbulas; as amostras foram moídas em moinho de anéis de ferro até que toda a amostra passasse pela peneira # 80. Essas amostras foram encaminhadas à DRX e análise química.

2.3. Amostras indeformadas

No campo as amostras foram coletadas em caixas de cartolina, envolvidas com filme de PVC e protegidas por plástico contendo bolhas de ar. Uma parte de cada amostra foi submetida à determinação de densidade aparente. Outra parte foi impregnada com resina epóxi, montada em lâminas de vidro para o preparo de seções polidas delgadas; algumas seções escolhidas foram recobertas por película de carbono.

2.4. Amostras para bateamento

As amostras foram bateadas no campo e secas ao sol. Estima-se que uma quantidade considerável dos grãos de ouro menores que 10 µm tenha sido perdida durante esta etapa. Os concentrados foram embalados em sacos plásticos e em sacos de tecido de algodão.

No laboratório os concentrados passaram pela seguinte rotina:

- estufa a 70° C;

- separação dos minerais magnéticos com um ímã de mão;
- separação dos minerais magnéticos com o separador Frantz;
- separação dos minerais pesados por uso de líquidos densos;
- catação dos grãos de ouro sob a lupa binocular;
- montagem dos grãos de ouro em lâminas de vidro;
- recobrimento das lâminas com película de carbono;
- impregnação de partículas de ouro selecionadas com resina epóxi e polimento para obtenção de seções polidas dos grãos; e
- recobrimento das seções polidas dos grãos por película de carbono.

Nos laboratórios do CRCLEME/CSIRO (Floreath Park, Western Austrália), 940 gramas de fragmentos de veios de quartzo + rocha encaixante coletados do furo FFP1 foram britados até atingirem o tamanho nominal máximo de 1 centímetro. A seguir foram moídos em moinho de disco (distância entre os discos de 1 milímetro). Finalmente foi utilizada uma microbatedeira motorizada (*micropanner*) para a concentração dos minerais pesados. Com o auxílio de uma lupa binocular e uma agulha as partículas de ouro concentradas na microbatedeira foram transferidas diretamente para uma lâmina delgada contendo uma fita adesiva dupla-face. Os grãos foram estudados ao microscópio de luz refletida e ao microscópio eletrônico de varredura.

3. Técnicas analíticas

Para a realização deste trabalho foram utilizadas as seguintes técnicas analíticas:

- microscopia óptica de luz refletida e transmitida;
- microscopia eletrônica de varredura;
- microsonda eletrônica;
- difração de raios-X;
- análises químicas para elementos principais e traços; e
- análises químicas para ouro utilizando-se a técnica de extrações seletivas sequenciais.

3.1. Microscopia óptica de luz refletida e transmitida

Essas técnicas foram utilizadas para o estudo das partículas de ouro, e para o estudo das lâminas delgadas do minério e das amostras indeformadas dos materiais presentes no saprolito e no pedolito. Nesse estudo foram utilizados os seguintes microscópios:

- Leica MZ12 Plan; e
- Zeiss Axioplan

Foram examinadas amostras de minério primário do furo de sondagem FFP-1, das amostras de minério intemperizado provenientes de T1, T2, e das amostras indeformadas coletadas em T2. Foi possível a identificação da mineralogia e da fábrica originadas pela atividade hidrotermal, e a observação da continuidade dessas características nos materiais presentes em T2. Regiões interessantes quanto à presença de nódulos ferruginosos foram identificadas; as relações entre os nódulos ferruginosos e a matriz argilosa puderam ser descritas e áreas foram selecionadas para posterior estudo com o microscópio eletrônico.

As partículas de ouro montadas em lâminas de vidro tiveram suas características morfológicas (comprimento, largura, forma, contorno, brilho e bordas) determinadas e descritas.

Os sulfetos, óxidos e partículas de ouro presentes no minério foram estudados inicialmente com esta técnica. Foram encontradas algumas limitações no estudo dos sulfetos, pois o minério da Fazenda Pison em geral é pobre nesses minerais. A técnica foi muito útil na seleção de áreas para estudo com o microscópio eletrônico.

3.2. Microscopia eletrônica de varredura com sistema de dispersão de energia acoplado (MEV-EDS)

Nesse estudo foram utilizados os seguintes equipamentos:

- JEOL JSM-6400 Scanning Electron Microscope (1989), equipado com detector para elétrons retroespalhados, sistema *LINK ISIS* para microanálise quantitativa através de dispersão de energia (EDS) e sistema de capturação de imagem digital (*Image Slave*).
- Electroscan ESEM(S) E-3 (1991), equipado com detector de elétrons retroespalhados, sistema de dispersão de energia (EDS) *Link Si (Li) PCXA* (1991), sistema de capturação de imagem digital (*Image Slave*), permitindo o exame de material em condições úmidas a pressões de até 20 torr.

Esta técnica foi aplicada no estudo morfológico e composicional das partículas de ouro, no estudo do minério fresco e oxidado. Foi também utilizada no estudo e mapeamento

dos elementos principais (Al, Fe e Si) nos diferentes materiais presentes em T2 e no mapeamento de alguns metais no minério (Ag, Au, Bi, Cu, Fe). As relações entre o ouro e os demais minerais presentes puderam ser documentadas e a evolução do minério frente ao processo intempérico pode ser acompanhada.

Amostras selecionadas de grãos de ouro presentes nos diversos materiais em T1 e T2 tiveram suas características morfológicas e composicionais examinadas. Feições de corrosão e solubilização do ouro na superfície das partículas puderam ser descritas. Em seções polidas dos grãos de ouro, zonamentos internos foram documentados e análises qualitativas foram executadas. Áreas para análise quantitativa foram selecionadas.

3.3. Microsonda eletrônica

Nesse estudo foi utilizado um equipamento JEOL JSM-6400R (1993), equipado com detector de elétrons retroespalhados, sistema de dispersão de energia (EDS) *Link Si (Li)PCXA* para microanálise quantitativa de rotina, 3 espectrômetros para dispersão de comprimento de onda (WDS), *software* Moran WDS para microanálise e sistema de capturação de imagem digital (*Image Slave*).

Esta técnica foi aplicada ao estudo composicional das partículas de ouro presentes nos diversos materiais encontrados em T2. Também foi aplicada no estudo do ouro presente nos minérios fresco e oxidado. Os elementos Au, Ag, As, Bi, Cu, Fe, Hg, Pt, Sb e Zn foram analisados.

3.4. Difração de raios-X

Esta técnica foi utilizada no estudo mineralógico dos diferentes materiais amostrados. O minério primário (amostras coletadas em FFP1) teve sua paragénese determinada com o auxílio dessa técnica. Amostras totais coletadas nos diferentes horizontes presentes na trincheira T2 tiveram sua composição mineralógica determinada. Os minerais pesados que acompanhavam o ouro nos concentrados de bateia obtidos nas trincheiras T1 e T2 também foram determinados. Para tanto foi utilizado um sistema Philips X'pert com radiação de cobre acoplado a um sistema de automação X'Pert.

3.5. Análises químicas

Um total de 199 amostras (65 de latossolo vermelho, 66 de latossolo amarelo, 46 dos vários materiais presentes na trincheira T2, e 22 de furos de sondagem e de saprolito pouco

alterado coletadas na visita preliminar à área de trabalho) foi analisado no Actlabs, Ontário, Canadá, pelas seguintes técnicas analíticas:

- Análise por Ativação Neutrônica (NAA): Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, Hg, Ir, La, Lu, Na, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Ta, Tb, Th, U, W, Y e Yb.
- Plasma induzido acoplado a espectrômetro de emissão ótica (ICP-OES), seguindo digestão em HF, HClO₄-HNO₃-HCl: Ag, Al, Be, Bi, Ca, Cd, Cu, K, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sr, Ti, V e Zn.

Tabela 3 – Elementos químicos e respectivos limites de detecção nas análises realizadas por Ativação Neutrônica e por Plasma no Actlabs, Ontário, Canadá.

Elemento	Au	Ag	Cu	Cd	Mn	Mo	Pb	Ni	Zn	S
Limite de detecção	2 ppb	0,3 ppm	1 ppm	0,3 ppm	1 ppm	1 ppm	5 ppm	1 ppm	1 ppm	0,01%
Elemento	Hg	As	Ba	Sb	W	Al	Be	Bi	Br	Ca
Limite de detecção	1 ppm	0,5 ppm	50 ppm	0,1 ppm	1 ppm	0,01%	1 ppm	2 ppm	0,5 ppm	1%
Elemento	Ce	Co	Cr	Cs	Eu	Fe	Hf	Ir	K	La
Limite de detecção	3 ppm	1 ppm	5 ppm	1 ppm	0,2 ppm	0,01%	1 ppm	5 ppb	0,01%	0,5 ppm
Elemento	Lu	Mg	Na	Nd	P	Rb	Sc	Se	Sm	Sn
Limite de detecção	0,05 ppm	0,01%	0,01%	5 ppm	0,00%	15 ppm	0,1 ppm	3 ppm	0,1 ppm	0,01%
Elemento	Sr	Ta	Tb	Th	Ti	U	V	Y	Yb	
Limite de detecção	1 ppm	0,5 ppm	0,5 ppm	0,2 ppm	0,01%	0,5 ppm	2 ppm	2 ppm	0,2 ppm	

Vinte e sete amostras coletadas na trincheira T2 foram analisadas por fluorescência de raios X no CSIRO (Floreat Park), Austrália, utilizando-se a técnica de pastilhas fundidas. A Tabela 4 apresenta os elementos analisados e os respectivos limites de detecção. Foi utilizado um equipamento Philips PW1480, com tubo de Sc/Mo e *software* X40. As pastilhas foram produzidas a partir de 6 g de amostra e 6,4 g de fluxo (borato de Li); a fusão e montagem foi feita em uma máquina de fusão Prometheus.

Tabela 4 – Elementos químicos e respectivos limites de detecção nas análises realizadas por fluorescência de raios-X.

Óxido	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Limite de detecção	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
Elemento	Ba	Ce	Cl	Cr	Co	Cu	Ga	La	Ni	
Limite de detecção	20 ppm	15 ppm	20 ppm	10 ppm	10 ppm	10 ppm	3 ppm	10 ppm	10 ppm	
Elemento	Nb	Pb	Rb	S	Sr	V	Y	Zn	Zr	
Limite de detecção	4 ppm	5 ppm	5 ppm	10 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	

3.6. Extrações seletivas sequenciais

Amostras totais dos diversos materiais presentes em T2 foram submetidos a ataques químicos sequenciais conforme soluções apresentadas abaixo. Procurou-se aqui verificar a quais fases minerais o ouro estava associado, e como esta associação se comportaria com o avanço do processo intempérico. Amostras da base e do topo de cada horizonte foram estudadas sempre que possível.

Foram enviadas 28 amostras para análise assim distribuídas:

- Latossolo Amarelo – 6 amostras;
- Latossolo Vermelho – 6 amostras;
- Couraça – 6 amostras;
- Zona de Transição – 5 amostras;
- Saprolito/Granófiro – 2 amostras;
- Saprolito/*Stockwork* – 1 amostra; e
- Minério primário – 1 amostra.

A Tabela 5 apresenta as 3 soluções utilizadas e as respectivas fases minerais atacadas. Em cada uma das etapas a amostra (5 gramas de peso inicial) foi adicionada a 95 ml de solução em frascos plásticos utilizados em centrífugas. As metodologias utilizadas foram desenvolvidas e/ou adaptadas pelo CSIRO (Austrália) para a análise de ouro. Para se evitar o problema da reabsorção do ouro utilizou-se um sachê contendo 1 g de carbono ativado em cada fase da extração, seguindo a técnica sugerida por Gray *et al.* (1998). O carbono adsorve o Au assim que ele é dissolvido da amostra. Os sachês e os resíduos foram enviados para

análise por Ativação Neutrônica no Becquerel Laboratories, Austrália, para Au com limite detecção de 5 ppb.

Tabela 5 – Soluções utilizadas e fases minerais atacadas no processo de extrações sequenciais seletivas.

Solução	Fase atacada	Referências
Iodeto de potássio	Ouro prontamente disponível	Gray et al. (1999)
Hidroxilamina	Óxidos de Fe amorfos	Gray et al. (1999)
Citrato de ditionita	Óxidos de Fe cristalinos	Chao (1984)

Para a primeira extração, utilizou-se uma amostra moída a menos 80# e uma amostra com granulometria natural. As demais extrações foram realizadas apenas para a amostra moída.

Os elementos adsorvidos na superfície dos minerais foram dissolvidos utilizando-se o iodeto de potássio. Foi preparada uma solução 0,1 M KI em pH 7,4 + 1 M Na HCO₃/CO₂. As amostras ficaram em agitação por 7 dias.

Os óxidos de Fe amorfos foram dissolvidos utilizando hidroxilamina 0,25 M NH₂OH.HCl-0,25 HCl. As soluções foram colocadas em banho a 70°C, agitadas por ultra-som durante 2 horas e agitação manual a cada 15 minutos.

Os óxidos de Fe cristalinos foram dissolvidos utilizando-se ditioneto de sódio (Na₂S₂O₄). Citrato foi adicionado, pois inibe a precipitação de sulfetos de ferro que podem acabar capturando elementos dissolvidos. A solução era trocada a cada duas horas até que a amostra não apresentasse a cor vermelha característica dos óxidos de Fe. O extrato retirado foi guardado em frasco plástico, juntamente com outro sachê contendo 1 g carbono ativado. Este frasco de foi mantido sob agitação (“roller”) até todos os óxidos de ferro serem digeridos. Foram enviados para análise o carbono contido no tubo de centrifuga, o carbono colocado no frasco plástico e o resíduo de cada amostra.

4. Métodos estatísticos uni- e multivariados

O tratamento estatístico dos dados analíticos foi adaptado dos procedimentos sugeridos por Grunsky (1991). Os dados foram analisados de maneira exploratória, buscando-se reconhecer e evidenciar tendências ou estruturas que pudessem fornecer informações sobre os processos geológicos/geoquímicos que ocorreram. Foram utilizados os *softwares* DATADESK for Windows (Data Description Inc.), versão 6.0 (1996) e STATISTICA for Windows (StatSoft, Inc.), versão 5.1 (1997).

Os dados foram preliminarmente analisados e algumas das variáveis foram excluídas, pois apresentaram mais que 50% dos resultados abaixo do limite de detecção da técnica analítica utilizada. A seguir, foram examinados os padrões de distribuição dos elementos através de sumários estatísticos (média, desvio-padrão, valores mínimo e máximo) e diagramas de distribuição (*box-whisker*, probabilidade normal). Os elementos apresentando distribuição logarítmica tiveram seus dados transformados para que se aproximassem da normalidade e amostras apresentando valores extremamente altos/baixos (*outliers*) foram temporariamente eliminadas, de forma que os métodos multivariados pudessem ser utilizados.

A **Análise Fatorial** foi um dos métodos estatísticos multivariados escolhidos para a análise dos dados. O outro método escolhido foi a **Análise de Agrupamento**.

As principais aplicações das técnicas de **Análise Fatorial** são (1) *reduzir* o número de variáveis e (2) *detectar estruturas* nos relacionamentos entre variáveis, isto é, *classificar as variáveis* (Davis 1986, Grunsky 1991). Assim, a análise fatorial é aplicada como um método de redução de dados ou de detecção de estruturas. Para a redução do número de variáveis é utilizado o coeficiente de correlação linear entre elas: dada uma alta correlação entre dois fatores, conclui-se que as mesmas são redundantes. A extrapolação da situação de duas variáveis para múltiplas variáveis ilustra a idéia básica da análise fatorial (*principais componentes*). Foi utilizada a estratégia de *Rotação Varimax* para a obtenção de fatores claramente marcados pela alta correlação com algumas variáveis e baixa correlação com outras. Essa rotação maximiza as variâncias de cada fator. Assim, chega-se a uma classificação das variáveis.

O objetivo da **Análise de Agrupamento** é buscar estruturas de organização dentro de um universo de dados, de forma que processos (no caso geológicos) possam ser identificados (Davis 1986, Grunsky 1991). O propósito é juntar elementos (por exemplo, amostras de solo) em grupos cada vez maiores, utilizando uma medida de similaridade ou distância. O resultado típico do grupamento é uma “árvore” hierárquica. Neste trabalho, a distância entre dois grupos (*cluster*) foi determinada pela distância dos dois elementos mais próximos, técnica da máxima vizinhança (*nearest neighbor*), nos diferentes grupos. A distância entre os grupos foi determinada pela distância euclidiana, que é calculada pela fórmula:

$$\text{distância (x,y)} = \{\sum_i (x_i - y_i)^2\}^{1/2}.$$

Com a técnica da **Análise Fatorial** foi estudada a assinatura geoquímica do minério primário e a evolução da associação do ouro com os elementos químicos durante a evolução do processo intempérico. A **Análise de Agrupamento** foi utilizada para a distinção entre amostras anômalas e de *background*.

III. RESULTADOS

1. Mineralização primária

1.1. Características da zona mineralizada

A rocha hospedeira da mineralização é um granófiro muito fino intrudido numa sequência de derrames e tufos ácidos (RTDM 1995). A Tabela 6 apresenta a composição química para os óxidos principais do granófiro afetado pelo hidrotermalismo. As amostras foram coletadas no furo de sondagem FFP-1. Os resultados mostram que SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e K₂O são os óxidos mais abundantes.

Tabela 6 – Composição química para os óxidos principais (% em peso) em amostras do granófiro afetado pelo hidrotermalismo.

Elementos principais												
Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL
FFP1-22	74,33	11,92	6,42	0,045	0,27	0,07	0,19	4,13	0,287	0,07	1,55	99,27
FFP1-25	75,19	12,01	4,24	0,027	0,24	0,04	0,20	5,49	0,296	0,05	1,88	99,66
FFP1-32a	83,05	7,24	5,91	0,036	0,15	0,06	0,16	2,50	0,151	0,04	0,78	100,09
FFP1-32b	81,71	6,28	8,04	0,058	0,10	0,07	0,17	3,43	0,165	0,05	-0,05	100,02
FFP1-92	73,74	10,91	5,91	0,080	0,11	0,58	0,96	7,08	0,245	0,04	-0,40	99,27
FFP1-100	72,83	11,04	5,90	0,047	0,15	0,51	0,76	7,34	0,257	0,05	0,22	99,10

Há um forte controle estrutural da mineralização em várias escalas de observação. Considerando-se a Província Tapajós, fica evidente que o depósito se posiciona em estruturas de segunda ou terceira ordem, em direção oblíqua à das zonas de deformação regionais (CPRM 1999). As estruturas que hospedam os veios mineralizados são de caráter rúptil, incluindo falhas rúpteis, arranjos de fratura e zonas de *stockwork*. Nestas, provavelmente a pressão de fluidos ultrapassou a pressão litostática, havendo um quebramento da rocha hospedeira e o preenchimento das fissuras por vênulas feldspáticas e de quartzo. Há falhas rúpteis direcionais de baixa amplitude e normais de médio a alto ângulo (RTDM 1995).

A mineralização consiste de uma faixa com cerca de 30 metros de espessura e 100 metros de comprimento, composta de veios de quartzo de comprimento decamétrico e espessura milimétrica a centimétrica, encaixados no granófiro. Os veios preenchem falhas rúpteis com direção geral N20E e mergulho subvertical. Estes veios estão deslocados por falhas tardias de direção NEE, com rejeito direcional sinistral.

Ao lado do feixe de veios de quartzo observado na trincheira T2, numa zona restrita, de formato irregular e dimensões métricas, há vênulas sub-milimétricas a milimétricas de material feldspático preenchendo fraturas que compõem a zona de *stockwork* (Figura 10). De acordo com Cosgrove (1995), a orientação e organização espacial de fraturas hidráulicas nas rochas são determinadas pela magnitude do *stress* diferencial, da orientação dos eixos do *stress* principal e de propriedades intrínsecas da rocha, particularmente sua coesão. As vênulas feldspáticas observadas em T2 apresentam um arranjo regular (longas vênulas sub-horizontais e vênulas subverticais curtas). O alinhamento das vênulas indica que um *stress* diferencial significativo esteve ativo durante o fraturamento, uma vez que aqui se considera o granófiro uma rocha isotrópica. O menor *stress* (σ_3) teria direção vertical, provavelmente originado pelo peso das rochas sobrepostas à área em questão, sendo que um esforço compressivo horizontal de porte médio (σ_2) teria direção perpendicular às vênulas subverticais observadas (direção NW, pois as vênulas subverticais são paralelas aos veios de quartzo mineralizados). A entrada de fluidos hidrotermais é interpretada como fator necessário para o fraturamento (*tensile failure*) do granófiro, conforme modelo proposto por Cosgrove (1995).

1.2. Alteração hidrotermal

O envelope de alteração hidrotermal é tabular e segue o formato da estrutura hospedeira da mineralização. Esta estrutura pode ser mais complicada se mais estruturas com envelopes de alteração relacionadas à mineralização estiverem presentes em profundidade. Nesse caso, os envelopes podem se sobrepor, formando um envelope mais espesso, ou resultar num padrão de interferência mais complexo. Seriam necessários novos furos de sondagem para a verificação dessa possibilidade. Padrões complexos não são raros nos depósitos onde predomina a deformação rúptil (Eilu *et al.* 1999).

Foi feito um estudo qualitativo das paragêneses presentes e notou-se uma variação lateral na mineralogia a partir dos veios. Porém, a extensão dos halos de alteração não pôde ser determinada. O fato de o granófiro ter granulação fina e apresentar o quartzo como mineral principal dificultou a observação das zonas de alteração hidrotermal.

As zonas de alteração mostram evidência de adição de Fe, S, F, K, Na, Ca, e H₂O. Isto se reflete na presença de pirita, hematita e magnetita, fluorita, epidoto, mica branca e clorita. A sulfetação é pouco importante. Não foi observada a presença de carbonatos nas lâminas delgadas. Testes efetuados em campo com ácido clorídrico diluído a frio não detectaram a presença de carbonatos.

Um enriquecimento significativo em SiO₂ é evidente nas zonas mineralizadas, pois a presença de veios de quartzo é constante. Entretanto, a silicificação *sensu strictu*, isto é, a

adição de sílica na rocha hospedeira e não apenas a formação de veios de quartzo, não foi documentada de forma convincente. Ao invés disso, observou-se que a sílica liberada pela reação de alteração (formação do epidoto a partir do consumo do feldspato) é redepositada na rocha hospedeira sob a forma de pequenas vênulas que cortam grãos primários e como quartzo mais límpido dentro dos grãos primários mais “sujos” (Figura 18).

O furo de sondagem FFP-1, único a cortar a zona mineralizada observada na trincheira T2, não permitiu verificar a continuidade do sistema de veios em profundidade. Porém, foi possível estabelecer uma zonation mineralógica no halo de alteração hidrotermal (Figuras 15, 16, 17), que pode ser descrita esquematicamente como:

- **zona central** – rica em ouro, contendo quartzo + mica branca + epidoto + sulfeto (pirita, calcopirita e arsenopirita) + hematita + magnetita;
- **zona intermediária** – pobre em ouro, contendo quartzo + mica branca + epidoto + fluorita + magnetita; e
- **zona distal** – pobre em ouro, contendo quartzo + mica branca + clorita + magnetita.

Não existem estudos de inclusões fluidas para o depósito da Fazenda Pison.

1.3. Mineralogia e assinatura geoquímica do minério

Os teores em ouro ao longo do furo FFP-1 variam entre 0,52 ppm e 5,23 ppm nas zonas mineralizadas (RTDM 1995). A composição das partículas de ouro apresenta média de 80% Au (variação entre 68,35 e 94, 76%), obtida através de microanálise por microsonda eletrônica (ver item 3 neste capítulo). O ouro, na forma livre, associado ao bismuto ou incluso na pirita, está localizado nos veios de quartzo e na rocha encaixante junto a eles (Figuras 19, 20, 21 e 22).

A mineralogia dos sulfetos é relativamente simples. Pirita é o sulfeto mais comum, podendo ocorrer isolado (Figura 23) ou envolvido por calcopirita (Figuras 24 e 26). O teor de arsênio observado na análise química de algumas amostras de minério é indicativo da presença de arsenopirita; porém, esse mineral não foi observado nos estudos petrográficos por luz refletida, indicando tratar-se de grãos extremamente pequenos. O bismuto, além de associado ao ouro, ocorre incluso na pirita e junto à calcopirita (Figuras 24 e 25).

Para o estudo da assinatura geoquímica do minério foram utilizadas vinte e três amostras totais de minério (*bulk samples*), sendo cinco amostras de minério primário (não intemperizado) e dezoito amostras de minério apresentando diferentes graus de intemperismo. A Tabela 6 apresenta um sumário estatístico para cada elemento analisado.

Tabela 7 – Sumário estatístico para amostras de minério coletadas no furo de sondagem FFP-1 e nas trincheiras T1 e T2.

Elemento	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio p.
Au (ppb)	23	14969,5	2,5	234000	49066,2
Ag (ppm)	23	2,2	0,2	7,2	1,5
As (ppm)	23	5,1	0,2	13,2	2,9
Ba (ppm)	23	466,3	190	1457	337,5
Bi (ppm)	23	366,2	2,5	5354	1131,6
Cd (ppm)	23	0,3	0,2	0,7	0,1
Co (ppm)	23	2,8	1	6	1,4
Cr (ppm)	23	14,9	2	29	8,0
Cs (ppm)	23	2,5	0,5	6,1	1,5
Cu (ppm)	23	172,7	21	1473	340,3
Fe (%)	23	4,7	2,38	14	2,4
Hf (ppm)	23	10,7	0,5	18	4,5
Mo (ppm)	23	1,7	0,5	6	1,5
Ni (ppm)	23	4,9	2	16	3,5
Pb (ppm)	23	41,1	14	138	24,9
Rb (ppm)	23	139,3	7,5	315	81,0
Sb (ppm)	23	1,2	0,4	3,7	0,6
Sc (ppm)	23	10,1	1	19,4	5,0
Se (ppm)	23	2,3	1,5	11	2,0
Sr (ppm)	23	50,2	4	297	58,7
Ta (ppm)	23	1,4	0,25	2,3	0,6
Th (ppm)	23	24,9	0,5	39,8	9,1
U (ppm)	23	4,1	0,25	7,8	1,8
V (ppm)	23	61,0	6	590	118,0
W (ppm)	23	8,5	1,5	48	9,4
Y (ppm)	23	26,9	2	63	13,4
Zn (ppm)	23	32,2	7	87	20,0
La (ppm)	23	87,9	3,5	485	92,7
Ce (ppm)	23	152,3	9	825	155,2
Nd (ppm)	23	42,4	2,2	178	36,4
Sm (ppm)	23	7,5	0,3	21,8	4,6
Eu (ppm)	23	1,5	0,1	4,5	0,9
Tb (ppm)	23	1,0	0,2	3	0,7
Yb (ppm)	23	4,4	0,1	10,5	2,2
Lu (ppm)	23	0,7	0,02	1,54	0,3

Figura 15 - Esquema com o tipo de estrutura hospedeira da mineralização. Desenho fora de escala, apenas ilustrativo das zonas de alteração hidrotermal. Veio de quartzo em zona de cisalhamento rúptil.

Figura 17 - Fotomicrografia (nicóis cruzados, luz transmitida). Fluorita (F) bordejada por grãos de epidoto (E) e mica branca (M).

Figura 16 - Fotomicrografia (nicóis paralelos, luz transmitida). Veio de quartzo (Qz) cortando granófiro onde se observa finos grãos de pirita (Pi) e mica branca (M) (estes se concentrando na borda do veio).

Figura 18 - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis cruzados) apresentando vênulas de quartzo neoformado (N) cortando grãos de quartzo do granófiro.

Figura 19 - Imagem de microscopia eletrônica (elétrons retroespalhados) apresentando partícula de ouro (Au+Ag) intercrescida com óxido de bismuto (Bi), ocupando espaço vazio entre grãos de quartzo (Qz).

Figura 20 - Imagem de microscopia eletrônica (elétrons retroespalhados) apresentando partícula de ouro (Au+Ag) inclusa na pirita (Pi), dentro de veio de quartzo (Qz).

Figura 21 - Imagem de microscopia eletrônica (elétrons retroespalhados) apresentando partícula de ouro (Au+Ag) dentro de veio de quartzo (Qz).

Figura 22 - Imagem de microscopia eletrônica (elétrons retroespalhados) apresentando partícula de ouro (Au+Ag) preenchendo fratura na pirita (Pi).

Figura 23 - Fotomicrografia (luz refletida, nicóis paralelos) apresentando veios de quartzo (Qz) portador de pirita (Pi).

Figura 24 - Imagem de microscopia eletrônica (elétrons retroespalhados) apresentando pirita (Pi) contendo inclusão de bismuto (Bi) e circundada por calcopirita (Cp) em veio de quartzo (Qz).

Figura 25 - Imagem de microscopia eletrônica (elétrons retroespalhados) apresentando a associação calcopirita (Cp) - bismuto (Bi) em veio de quartzo (Qz).

Figura 26 - Imagem MEV (elétrons retroespalhados) mostrando intercrescimento de pirita (Pi) e calcopirita (Cp) em veio de quartzo (Qz).

Antes de ser calculado o índice de correlação entre os elementos analisados os resultados foram analisados quanto a sua distribuição. As variáveis Cd e Se foram descartadas do processo de análise estatística pois apresentaram mais da metade dos resultados abaixo do limite de detecção informado pelo laboratório. Foi aplicada a transformação logarítmica às variáveis Au, Ba, Bi, Cu, Fe, Ni, Pb, Sb, Sr, V, W, Zn, La, Ce e Tb para que elas tivessem uma distribuição mais próxima da normal (Davis 1986, Grunsky 1991). A partir do banco de dados modificado foram calculados os coeficientes de correlação apresentados na Tabela 8.

Os coeficientes de correlação apresentados na Tabela 7 mostram que dentre os elementos tradicionalmente associados ao ouro destacam-se Ag, As, Bi e Sb; o V, apesar de não ser um elemento indicador comum para depósitos auríferos, apresenta alto índice de correlação com o Au. Já os metais-base apresentam correlação baixa (Cu e Pb) ou até mesmo moderadamente negativa com o Au, como é o caso do Zn.

Tabela 8 – Correlação entre o ouro e demais elementos nas amostras de minério primário e intemperizado (N = 23). Correlações em negrito são significantes para $p < 0,05$.

Au	Au	Ag	As	Ba	Bi	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Hf
Au	1	0,6324	0,6329	-0,352	0,8539	-0,135	0,0371	-0,366	0,1043	0,3568	-0,424
	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Ta	Th	U	V
Au	0,3499	-0,499	-0,029	-0,434	0,5553	-0,098	-0,19	-0,411	-0,384	-0,491	0,69
	W	Y	Zn	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
Au	0,3072	-0,541	-0,588	-0,184	-0,189	-0,288	-0,315	-0,181	-0,53	-0,408	-0,365

Figura 27 – Diagrama de “talus” (*scree plot*) onde se observa que os três primeiros fatores respondem pela maior parte da variância encontrada nesse banco de dados.

A assinatura geoquímica do minério foi analisada utilizando-se a técnica de análise fatorial, a partir dos dados manipulados (descarte e/ou transformação de variáveis), conforme sugerido por Davis (1986) e Grunsky (1991).

Optou-se por um modelo de 3 fatores para esse estudo, pois a utilização de mais fatores não fornecia um incremento significativo à compreensão dos processos atuantes (Figura 27). Foi efetuada a rotação varimax.

O peso de cada elemento químico analisado em cada um dos três fatores foi interpretado como sendo a correlação entre a respectiva variável e os fatores. O Fator 1 responde por aproximadamente 26% da variância total, o Fator 2 por 23% e o Fator 3 por 21% (Tabela 9). A análise da Tabela 9 e dos diagramas para o peso dos fatores (Fator 1 x Fator 2, Fator 1 x Fator 3 e Fator 2 x Fator 3 na Figura 28) mostra que é com o Fator 2 que o Au está mais correlacionado. Pode-se, portanto concluir que os elementos mais intimamente associados ao ouro são **Ag + Bi + V + As + Sb + W**.

Os metais-base, **Cu, Pb e Zn**, que ocorrem nos sulfetos presentes na zona de alteração hidrotermal (como é o caso da calcopirita) e que são detectados nas análises químicas do minério também podem ser considerados como associados ao ouro.

Portanto, a assinatura geoquímica do minério presente no garimpo Fazenda Pison é:

Au – Ag – Bi – V – As – Sb – W (+ Cu-Pb-Zn)

Tabela 9 –Peso de cada elemento químico nos Fatores 1, 2 e 3

Peso dos Fatores				Peso dos Fatores			
	Fator 1	Fator 2	Fator 3		Fator 1	Fator 2	Fator 3
Au	-0,39	0,69	-0,15	Sr	0,39	0,17	0,65
Ag	0,02	0,91	0,00	Ta	0,88	-0,20	0,05
As	-0,44	0,68	0,05	Th	0,87	-0,01	0,40
Ba	-0,19	-0,71	0,24	U	0,69	-0,31	0,49
Bi	-0,39	0,76	0,04	V	-0,01	0,91	0,14
Co	-0,25	-0,04	0,74	W	-0,06	0,68	0,22
Cr	-0,17	0,24	0,45	Y	0,60	-0,41	0,35
Cs	-0,10	-0,84	0,06	Zn	-0,08	-0,78	0,35
Cu	-0,52	-0,01	0,37	La	0,29	0,02	0,89
Fe	-0,30	0,52	0,53	Ce	0,36	0,03	0,87
Hf	0,93	-0,09	0,18	Nd	0,26	-0,21	0,80
Mo	-0,75	0,13	0,15	Sm	0,37	-0,17	0,81
Ni	0,38	-0,14	0,39	Eu	0,37	0,00	0,83
Pb	0,17	0,25	0,54	Tb	0,67	-0,22	0,55
Rb	0,00	-0,80	0,08	Yb	0,89	-0,04	0,18
Sb	-0,17	0,59	-0,05	Lu	0,91	0,03	0,26
Sc	0,86	0,34	0,26				
				Expl. V	8,49	7,46	6,92
				Prp. To	0,26	0,23	0,21

Figura 28 – Diagramas de peso: Fator 1 x Fator 2 e Fator 2 x Fator 3.

1.4. Timing e tipologia da mineralização

Visto que os veios de quartzo mineralizados estão alojados em rocha ácida intrusiva nas rochas vulcânicas do Grupo Iri, interpreta-se que a mineralização aurífera está relacionada com eventos hidrotermais ligados à intrusão de rochas granitóides da Suíte Intrusiva Maloquinha. As rochas encaixantes não apresentam qualquer tipo de metamorfismo, mas pode ser constatado que os veios mineralizados são deslocados por falhas rúpteis. Não existem dados geocronológicos sobre o evento mineralizante que atuou na Fazenda Pison.

As principais características observadas na mineralização presente na Fazenda Pison são as seguintes:

- feixe de veios de quartzo auríferos centimétricos, sub-paralelos, subverticais, controlados por falhas, hospedados em intrusões (*sheeted vein*);
- zona de *stockwork*;
- forte associação Au-Bi (+ W);
- baixo conteúdo de sulfetos, sendo o principal a pirita;
- baixo conteúdo em metais-base;
- halo de alteração hidrotermal pouco penetrativo, dominado por mica branca; e
- mineralização associada a rochas intrusivas ácidas.

Estas características sugerem que tal depósito se enquadra nos modelos propostos por Sillitoe (1996), Thompson *et al.* (1999) e Lang *et al.* (2000) para **Sistemas Auríferos Relacionados a Intrusões** (*Intrusion-Related Gold Systems*), conforme consta na classificação de Santos *et al.* (2001) para os depósitos auríferos do Tapajós.

A existência de ocorrências de cassiterita (Sn), concentradas em áreas dominadas por granitóides da Suíte Intrusiva Maloquinha e rochas vulcânicas do Grupo Iriri (CPRM 1999), é um elemento adicional que confirma o enquadramento da mineralização estudada no modelo acima mencionado (Sillitoe 1996).

2. O manto intempérico

O esquema descrito aqui é derivado dos trabalhos desenvolvidos na Austrália pelo Cooperative Research Centre for Landscape Evolution and Mineral Exploration - CRCLEME/CSIRO (Anand & Butt 1988, Robertson & Butt 1993, Robertson *et al.* 1997, Robertson 1997, Butt *et al.* 1998). Os termos são equiparáveis, tanto quanto possível, à terminologia utilizada pela comunidade científica nacional e internacional. Como em todos os sistemas naturais, muitas mudanças são graduais, conseqüentemente os limites entre algumas unidades definidas são arbitrários (e.g. a zona de transição ou o contato latossolo amarelo/latossolo vermelho). As unidades sedimentares recentes (*Aluviões*) são consideradas como partes do regolito.

A classificação e terminologia utilizadas neste trabalho estão apresentadas resumidamente na Figura 29. A classificação segue uma hierarquia, com subdivisões para cada unidade definida, segundo os atributos encontrados. Entretanto, o detalhe e a precisão alcançados foram limitados pelos procedimentos de amostragem e pelo pouco conhecimento prévio dos lateritos amazônicos, notadamente dos perfis encontrados na região do rio Tapajós. Assim, as amostras obtidas através de furos de trado não puderam ser caracterizadas com os mesmos atributos utilizados para as amostras obtidas em afloramento e dessa forma não puderam ser classificadas com a mesma precisão.

Dois tipos de perfil intempérico foram encontrados:

- **completo**, de ocorrência restrita, composto por rocha-mãe, saprolito, zona de transição, couraça, latossolo vermelho e latossolo amarelo; e
- **incompleto**, de ampla ocorrência, composto por rocha-mãe, saprolito, latossolo vermelho e latossolo amarelo

2.1. Unidades principais

O regolito inclui: (1) material intemperizado *in situ*, derivado diretamente da rocha subjacente e (2) material transportado derivado do substrato rochoso e de outros materiais intempéricos. O material intemperizado *in situ* consiste em dois componentes principais (Figura 29), o **saprolito** e o **pedolito**. Eles são diferenciados pela sua fábrica que, por sua vez, reflete sua gênese.

Figura 29 - Terminologia do regolito.

Saprolito (Figuras 30 A e B)

É a parte inferior do regolito que guarda o arranjo dos constituintes minerais primários (por exemplo, cristais, grãos, venulações) da rocha-mãe. Pode incluir rochas intemperizadas onde apenas se observam estruturas grandes tais como veios de quartzo e contatos litológicos. O critério aqui utilizado para a distinção entre rocha fresca e saprolito foi a presença de sulfetos na primeira, e da textura *boxwork* derivada da alteração dos sulfetos no segundo.

Pedolito (Figuras 30 C a H)

É a parte superior do regolito no qual a fábrica da rocha parental foi destruída por um ou mais processos pedológicos e desenvolveu-se uma nova fábrica. Os horizontes do pedolito são caracterizados pela concentração (ou perda) de determinados elementos (por exemplo, óxidos de Fe e Al) e pelas estruturas secundárias (por exemplo, nódulos e pisólitos). A interface entre saprolito e pedolito é conhecida como frente de pedoplasmação.

O pedolito foi subdividido em 3 unidades com base nas diferenças de fábrica, particularmente naquelas das estruturas secundárias, e/ou na concentração de determinados materiais. Da base para o topo, distingue-se a zona de transição, a couraça e os latossolos, vermelho e amarelo.

2.2. Distribuição espacial

Neste trabalho o mapeamento do regolito foi baseado em observações feitas nas trincheiras T1 e T2 e em furos de trado manual realizados nas Linhas 1, 2 e 3. Foram utilizados critérios geológicos, topográficos e geomorfológicos na delimitação das diferentes unidades presentes, pois as características do regolito normalmente se associam às formas de relevo, principalmente em suas unidades superficiais (Pain 2001). Na Fazenda Pison foi observado que diferentes feições de relevo condicionam a distribuição e espessura dos horizontes e o tipo de material presente.

O *Saprolito*, unidade que se sobrepõe à rocha fresca, tem composição variada em função do material subjacente (granófiro, zona de *stockwork*, bolsões de quartzo e rochas vulcânicas ácidas) e é bastante contínuo. Esta não é uma unidade aflorante, encontrando-se recoberta pelos latossolos vermelho e amarelo. Sua espessura não pode ser rigorosamente avaliada nesse trabalho, mas verificou-se uma variação considerável nesse aspecto: aproximadamente 3 metros em T1 e aproximadamente 20 metros em T2.

A *Zona de Transição*, que ocorre sobre o saprolito, apresenta espessura bastante irregular, sendo fortemente influenciada por descontinuidades presentes no substrato (por exemplo, fraturas, veios e falhas) e podendo variar de poucos centímetros a mais de 2 metros. Na trincheira T2 (Figuras 7 a 11) apresenta maior espessura e é recoberta pela couraça. Na Trincheira T1 (Figura 6), a zona de transição ocorre sobre o saprolito e é diretamente recoberta por latossolo vermelho. Nas Linhas 1, 2 e 3, embora a amostragem não tenha permitido a recuperação do material indeformado, foi possível perceber que abaixo do latossolo vermelho existe uma estreita zona de transição.

A *Couraça* tem distribuição areal muito irregular e restrita, estando provavelmente dispersa em lentes de tamanho métrico (a decamétrico?). Ela foi observada *in situ* apenas na trincheira T2, ocupando posição de meia encosta em um talude convexo, onde apresenta espessura variando de 20 centímetros a 1 metro e comprimento superior a 16 metros (Figura 7 a 11). Sua espessura média é de 40 cm; desaparece em direção ao topo e à base da encosta, assim como lateralmente, sempre dando lugar a um latossolo concrecionar. A couraça está sempre sobre a zona de transição, e pode estar coberta pelo latossolo vermelho (em geral) ou pelo latossolo amarelo. Vários blocos centimétricos de couraça foram encontrados em diferentes drenagens da Fazenda Pison (RTDM 1995) indicando a existência de outros corpos.

O *Latossolo Vermelho* ocorre sobreposto à couraça e, na ausência desta, à zona de transição ou ao saprolito. Apresenta um controle topográfico bastante evidente em sua distribuição. Lateralmente estende-se por toda a área, apresentando descontinuidades apenas nas zonas topograficamente mais baixas. A espessura dessa unidade é maior nos altos topográficos (chegando a 7,5 metros) e diminui em direção à base das colinas, desaparecendo nas proximidades das drenagens.

O *Latossolo Amarelo*, unidade de topo do regolito, recobre o latossolo vermelho ou o saprolito, onde o latossolo vermelho está ausente. É o material com maior distribuição em área no garimpo Fazenda Pison, sendo praticamente contínuo por toda região. Sua continuidade é apenas interrompida junto às drenagens, onde é recoberto pelos sedimentos recentes das aluviões. A espessura do latossolo amarelo é maior nos altos topográficos (atingindo até 4 metros), afinando nas encostas das colinas (atingindo 1 metro), e voltando a ser um pouco mais espesso nas áreas baixas (até 2 metros).

Os depósitos aluvionares (*Aluviões*) são compostos por material detrítico acumulado pela ação dos cursos d'água modernos, incluindo os sedimentos dispostos no leito dos rios e nas planícies de inundação. Geralmente estão sobrepostos ao saprolito, mas podem recobrir localmente a rocha fresca ou o latossolo amarelo.

Em síntese, as unidades dominantes do regolito na área estudada são os latossolos, vermelhos na base e amarelos no topo, sobrepostos à zona de transição e ao saprolito. Em alguns locais estão preservados restos de um antigo perfil, onde uma couraça ferruginosa sobreposta a uma zona de transição mais espessa interpõe-se entre os latossolos e o saprolito. É possível observar passo a passo o processo pelo qual essa couraça é transformada vertical e lateralmente, sendo substituída por um sistema pedológico caracterizado por latossolos.

2.3. Observações macroscópicas

As Figuras 4 e 5 mostram a localização das trincheiras T1 e T2 e a Figura 12 a das Linhas 1, 2 e 3, fornecendo uma idéia das condições topográficas e das unidades geológicas presentes em subsuperfície. Na trincheira T1 (Figura 6), está exposto um perfil composto da base para o topo por (1) Saprolito; (2) Zona de Transição; (3) Latossolo Vermelho; e (4) Latossolo Amarelo. Na trincheira T2 (Figuras 7 a 11) o perfil intempérico é mais complexo, sendo formado da base para o topo por (1) Saprolito, (2) Zona de Transição; (3) Couraça; (4) Latossolo Vermelho; e (5) Latossolo Amarelo.

A - Saprolito (granófiro) com veio de quartzo mineralizado.

B - Saprolito (zona de *stockwork*) onde são observadas vênulas feldspáticas caolinizadas.

C - Zona de transição (base) apresentando fragmento do saprolito (granófiro) em contato com matriz caolínítica rica em ferro.

D - Zona de transição (topo) apresentando pisólitos argilosos ricos em ferro imersos em matriz caolínítica.

E - Couraça ferruginosa em processo de desmantelamento.

F - Detalhe de uma porção da couraça.

G - Latossolo vermelho argilo-arenoso.

H - Latossolo amarelo argilo-arenoso.

Figura 30 - Fotografias ilustrando os materiais presentes no regolito.

Saprolito

O saprolito observado na zona mineralizada do Garimpo Fazenda Pison é composto por quatro tipos diferentes de material intemperizado que guardam a mesma disposição que apresentavam quando frescos. A composição, o grau de coesão e a cor apresentados pelo saprolito variam nas duas trincheiras examinadas: em T1 o saprolito é composto por granófiro cortado por veios de quartzo muito coesos, de forma que os garimpeiros utilizavam explosivos para o desmonte do material que era levado ao moinho, e sua cor é vermelho escuro; em T2 o saprolito é composto por granófiro cortado por veios de quartzo, zona de *stockwork* e bolsões de quartzo, sendo bastante friável, de forma que o desmonte era feito com o auxílio de picaretas, e sua cor é vermelho clara quando relacionado ao granófiro, marrom avermelhado na zona de *stockwork* e creme-avermelhado nos bolsões de quartzo. A estrutura original dos veios de quartzo e das venulações feldspáticas está bem preservada no saprolito.

A espessura do saprolito não pode ser definida com precisão por toda a área de estudo devido à técnica de amostragem utilizada nas Linhas 1, 2 e 3. Nas trincheiras T1 e T2 ela é variável:

- em T1 os primeiros sulfetos foram observados a 3,5 metros do topo da unidade; e
- em T2 os primeiros sulfetos foram identificados a 19 metros do topo.

A base do saprolito tende a apresentar um material de maior coesão que perde sua rigidez em direção ao topo da unidade. As fraturas presentes no topo do saprolito estão preenchidas por material oriundo das unidades superiores (iluviação), o que ajuda a acelerar o processo intempérico.

Granófiro (Figura 30 A)

O saprolito derivado do granófiro é maciço, de granulação fina, cortado por um feixe de veios de quartzo centimétricos, subparalelos e subverticais com atitude N-N20E; veios com atitudes em baixo ângulo ou mesmo subhorizontais são secundários. Estreitas faixas alteradas hidrotermalmente (< 1 cm) foram observadas junto aos veios na trincheira T1, onde a rocha encontra-se um pouco mais preservada.

Zona de Stockwork (Figura 30 B)

A zona de *stockwork* foi observada apenas na trincheira T2, ao lado de uma zona de veios de quartzo subverticais, em contato brusco com o granófiro. A zona de *stockwork* tem espessura de 1,5 m, mas não se pode precisar quanto desta zona foi consumido pelos processos intempéricos, uma vez que ela se encontra truncada no contato com pedolito. A extensão lateral da zona de *stockwork* não pode ser determinada, pois o corte existente na trincheira T2 não chegou a expor todo o seu corpo. Esta unidade é composta pelo granófiro cortado por diversas vênulas submilimétricas a milimétricas de feldspato; localmente podem ser observadas porções centimétricas do granófiro preservadas no interior dessa unidade. As vênulas apresentam um nítido controle estrutural, com um padrão regular, segundo o qual vênulas subhorizontais e subverticais se entrecortam, resultando em um padrão “em caixas”

milimétricas a centimétricas. Tanto o material adicionado pela atividade hidrotermal quanto os minerais originais da rocha foram profundamente transformados pelo intemperismo, não restando quase vestígio da mineralogia original do granófiro, ou da alteração hidrotermal. A fábrica primária é sustentada principalmente pelas vênulas já que os processos intempéricos lixiviaram boa parte do material. Algumas venulações estão deformadas devido ao peso exercido pelas camadas superiores do regolito sobre um material tão poroso. Muito localmente finos grãos de quartzo e palhetas de mica estão sustentados por uma matriz argilosa rica em Fe (hematita e goethita) que ocupa os espaços entre as vênulas.

Bolsões de Quartzo

Os bolsões de quartzo são volumes decimétricos, arredondados, extremamente friáveis, de cor creme avermelhada, compostos essencialmente por grânulos de quartzo e caolinita, com pequena quantidade de goethita. Tal como a zona de *stockwork*, representam porções do granófiro altamente afetadas pela alteração hidrotermal.

Pedolito

O pedolito encontrado no Garimpo Fazenda Pison é composto, de forma geral, pelos latossolos vermelho e amarelo. A presença localizada da couraça e da zona de transição introduz heterogeneidades no perfil intempérico com importantes consequências para a prospecção. A espessura do pedolito é variável, geralmente situada entre 2 e 3 metros.

Muito localizadamente, nos fundos de vale, ocorre sob o latossolo uma argila mosqueada cuja origem é controlada pelo batimento do lençol freático. É caracterizada por matriz argilosa bastante plástica (caolinítica) de cor marrom amarelada com manchas irregulares avermelhadas. Dentro dessa matriz há várias concentrações ferruginosas de cor vermelho escura, que conferem o padrão mosqueado que dá nome a esta unidade. Esse tipo de material, formado em meios hidromórficos, nos vales das paisagens de clima úmido, é conhecido na literatura especializada como plintita (Tardy 1993).

Zona de Transição (Figuras 30 C e D)

A zona de transição foi observada principalmente na trincheira T2, entre o saprolito e a couraça. Divide-se em duas porções bastante diferentes. Na base é caracterizada por uma estrutura angular, tendo aspecto manchado, onde fragmentos vermelho claros centimétricos a métricos do granófiro intemperizado estão envolvidos por uma matriz vermelho escura argilosa, rica em oxi/hidróxidos de Fe. No contato com a matriz, os fragmentos de granófiro estão manchados por oxi/hidróxidos de Fe, que penetram fraturas e contatos entre minerais. No topo apresenta cor marrom avermelhada, com manchas mais escuras devido à presença de nódulos e pisólitos ferruginosos, o que confere ao material um aspecto ainda mais manchado. A proporção nódulos/pisólitos aumenta para o topo, numa passagem gradual para o horizonte superior (couraça). Os nódulos são compostos por grãos de quartzo finíssimos, caolinita e oxi/hidróxidos de Fe. Localmente os nódulos apresentam em suas bordas e em fraturas uma coloração amarelada.

Couraça (Figuras 30 E e F)

A couraça ferruginosa foi observada apenas na trincheira T2, numa área de meia encosta. É composta por blocos centimétricos a decimétricos maciços, que gradam em direção ao topo e lateralmente para zonas nodulares e pisolíticas, evidenciando um processo de dismantelamento. Sua cor é vermelha escura, com tons amarelados nas proximidades das fraturas. Os nódulos e pisólitos, e a superfície dos blocos têm cor vermelha mais clara com tons amarelados.

A transição para o horizonte superior se dá em poucos centímetros (< 5 cm). A concentração de nódulos e pisólitos vai diminuindo em favor de uma matriz areno-argilosa que vai aumentando em direção ao latossolo vermelho ou amarelo.

Latossolo Vermelho (Figura 30 G)

O latossolo vermelho é observado diretamente sobre o saprolito (separado por uma fina zona de transição (como observado em T1), e também sobre a couraça (como visto em T2), e está sempre coberto pelo latossolo amarelo. É um solo móvel, de cor marrom avermelhada, composto por uma matriz argilosa que sustenta nódulos e pisólitos ferruginosos, os quais são mais abundantes na base da unidade. Foi constatada também a presença de grãos de quartzo e fragmentos de vênulas de quartzo imersos na matriz.

Latossolo Amarelo (Figura 30 H)

O latossolo amarelo é um material pulverulento cor marrom amarelada, contendo matriz argilosa, onde estão imersos nódulos e pisólitos ferruginosos, e fragmentos de veios de quartzo. Esses elementos diminuem em direção ao topo da unidade. Está sempre coberto por uma camada de matéria orgânica (folhas, galhos, etc.), que varia de espessura de poucos centímetros (nas áreas de topo) chegando até meio metro nas áreas baixas.

2.4. Características petrográficas e mineralógicas

Uma avaliação semi-quantitativa da composição mineralógica dos materiais presentes no regolito, realizada a partir dos dados de difração de raios-X, está apresentada na Tabela 10. Os minerais acessórios foram qualitativamente determinados a partir do estudo petrográfico e de dados de difração de raios-X.

Tabela 10 – Composição mineralógica dos horizontes do perfil intempérico estimada a partir dos dados difratométricos.

	Quartzo	Mica	Caolinita	Goethita	Hematita
LA	xxx		xxx	x	(x)
LV	xxx		xxx	x	x
C	x		x	x	xxx
ZT	xx	(x)	xx	x	x
SAP	xxx	xx	x		

Saprolito

O saprolito apresenta diferentes graus de coesão, sendo mais compacto na base e mais friável no topo. Parte do saprolito mantém a mineralogia primária original e parte apresenta uma nova mineralogia.

Granófiro

No saprolito do granófiro (Figuras 31 A a D), o quartzo é o mineral mais abundante, seguido da mica e da caolinita. Como minerais acessórios foram identificados magnetita (pseudomorfizada por hematita), zircão, rutilo, anatásio e goethita.

O primeiro sinal de intemperismo observado ao microscópio petrográfico é a dissolução das piratas e a geração da textura *boxwork*. Num segundo estágio foi observada a modificação das propriedades ópticas das micas, com modificações no relevo (que se torna mais baixo) e no pleocroísmo (as cores altas de polarização são substituídas por tons mais cinzas e amarelados), indicando transição para caolinita.

Zona de Stockwork

Na zona de *stockwork* (Figuras 31 E e F) há uma quantidade significativa de caolinita e hematita, e uma quantidade relativamente menor de quartzo e mica. Estes dados retratam bem a atividade hidrotermal, caracterizada pelo aporte de feldspatos, agora caolinizados, na forma de vênulas, e de sulfetos, atualmente oxidados. Os minerais acessórios identificados foram magnetita (pseudomorfizada por hematita), zircão e rutilo.

Bolsões de Quartzo

A composição mineralógica dos bolsões de quartzo intemperizados é quartzo e caolinita, com pequena quantidade de goethita. A fábrica é caracterizada por grânulos milimétricos de quartzo que se tocam, sendo os espaços vazios preenchidos pelo material argilo-ferruginoso. Essa característica impossibilitou a coleta da amostra indeformada, pois tornou o material extremamente friável, não sendo possível estudá-lo em seção delgada. Como minerais acessórios foram identificados zircão, magnetita (pseudomorfizada para hematita), rutilo e anatásio.

A - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis paralelos). Granófiro mostrando vênula de quartzo deslocada (Qz) e plano de falha preenchido por minerais opacos (Op).

B - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis cruzados). Granófiro apresentando porção rica em mica (M) parcialmente caolinizada (áreas com pleocroísmo fraco), e oxi/hidróxidos de Fe percolando pelos contatos entre os grãos (em tons amarelados).

C - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis cruzados). Vênulas de mica parcialmente caolinizadas (pleocroísmo fraco) (M) cortando o granófiro.

D - Imagem MEV (elétrons retroespalhados) de veio de quartzo (Qz) apresentando pseudomorfos de pirita, substituída por oxi/hidróxidos de ferro (Fe), onde também é possível observar espaços vazios (V).

E - Fotomicrografia (luz refletida, nicóis paralelos). Vênulas feldspáticas caolinizadas (Ca) cortando o granófiro. Também são observados vários espaços vazios (V) e deformações nas vênulas (D).

F - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis cruzados). Grãos de quartzo (Qz) com textura idêntica à observada no granófiro. Os grãos estão impregnados por óxidos de Fe e espaços vazios (V) podem ser observados.

Figura 31 -Imagens ilustrando o saprolito.

Pedolito

Zona de Transição

A zona de transição pode ser subdividida em uma unidade de base e outra de topo, com composição mineralógica e fábrica distintas.

A unidade de base (Figura 32), bastante porosa, é caracterizada por matriz argilo-ferruginosa que engloba alterorelictos do granófiro. Apresenta significativa diminuição na quantidade de mica e um aumento na quantidade de caolinita em relação ao saprolito. Observações feitas ao microscópio óptico e eletrônico mostram que os oxi/hidróxidos de ferro começam a penetrar nas descontinuidades presentes na rocha (vênulas de mica e contatos entre os grãos) de forma a destruir a fábrica primária, isolando os grãos de quartzo, que se vêm envolvidos em uma matriz caolinítica rica em Fe e muito porosa. A fábrica primária desaparece com o aumento da matriz caolinítica e o isolamento dos grãos de quartzo e de alguma mica. Os cristais de caolinita não apresentam uma orientação geral perceptível ao microscópio.

A unidade de topo (Figura 33) é mais compacta que a anterior, composta por matriz argilo-ferruginosa com finos grãos de quartzo. Quase não há mais micas, que estão totalmente alteradas em caolinita. Os oxi/hidróxidos de ferro, por outro lado, mostram um grande ganho, especialmente como hematita, uma vez que a presença de nódulos ferruginosos pedo e litoreliquiários é cada vez maior em direção ao topo.

Os minerais acessórios identificados na base da zona de transição foram zircão, magnetita (pseudomorfizada para hematita) rutilo, anatásio e raros grãos de pirita encapsulados por quartzo, o que os protegeu do intemperismo. Na porção de topo as piritas não são mais observadas.

Couraça

A couraça (Figuras 34 e 35) apresenta fábrica nodular. Tende a apresentar um maior desmantelamento e desagregação em direção ao topo e às extremidades laterais da unidade. Desagrega-se em fragmentos milimétricos a centimétricos, botroidais a subarredondados, com córtex amarelado.

A composição da couraça é dominada por oxi/hidróxidos de ferro. A hematita é o mineral principal, juntamente com a goethita. Também estão presentes o quartzo e a caolinita, mais concentrados no topo da unidade.

No topo da couraça há um sensível aumento na quantidade de quartzo e um aumento moderado em caolinita. Já os oxi/hidróxidos de ferro sofrem redução, e a goethita passa a ter participação mais importante que a hematita. Há cada vez mais desagregação dos nódulos, que se encontram envolvidos por material caolinítico. Esse material provém dos horizontes superiores de latossolo e preenche os espaços vazios criados pelo desmantelamento da couraça maciça, num movimento descendente que chega à base da unidade (iluviação). O material argiloso é também observado nas paredes internas dos poros e em fraturas presentes nos nódulos. Tanto na base quanto no topo da unidade os poros observados possuem o formato dos grãos de quartzo que ocupavam estes sítios; em alguns locais ainda é

possível observar restos de quartzo ocupando parcialmente os poros, indicando que na couraça há expressiva dissolução do quartzo.

As Figuras 34 e 35 mostram nódulos compostos por uma parte hematítica mais porosa e uma parte goethítica menos porosa, que também está presente nos córtexes que os envolvem. Os córtexes bandados observados nos nódulos são constituídos por goethita aluminosa. No interior dos nódulos pode haver restos da estrutura da rocha (litorelictos) ou de materiais mais evoluídos dos horizontes subjacentes (pedorrelictos).

Os minerais acessórios identificados foram zircão, magnetita (pseudomorfizada para hematita), rutilo e anatásio.

Latossolo Vermelho

O latossolo vermelho (Figura 36 e 38A e B) apresenta matriz caolínica porosa avermelhada (hematita e goethita) com esqueleto de grãos de quartzo, onde estão dispersos nódulos inteiros ou fragmentados, com ou sem córtex, e fragmentos de veios de quartzo.

Essa unidade apresenta um aumento substancial em caolinita e quartzo em relação à unidade subjacente e complementarmente uma diminuição dos oxi/hidróxidos de ferro. A presença de hematita confere a cor vermelha ao latossolo. Os minerais acessórios identificados foram zircão, magnetita (pseudomorfizada para hematita) e rutilo.

Latossolo Amarelo

O latossolo amarelo (Figuras 37 e 38C e D) é semelhante ao latossolo vermelho em textura e composição, com a diferença que neste predomina a goethita sobre a hematita. A matriz é porosa e formada por caolinita, goethita e finos grãos de quartzo, sustentando fragmentos de veios e alterorrelictos provenientes do saprolito, e alguns nódulos ferruginosos (em menor quantidade que no latossolo vermelho). Os minerais acessórios identificados foram zircão, magnetita (pseudomorfizada para hematita) e rutilo.

A - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis cruzados). Zona de transição (base) mostrando fragmento do saprolito (granófiro) contendo quartzo (Qz) e mica (M) em contato com a matriz caolinítica (Ca) rica em Fe.

B - Imagem MEV (elétrons retroespalhados) mostrando a mesma região observada ao lado com giro de aproximadamente 90 graus.

C - Mapa EDS para potássio, mostrando as áreas onde as micas estão mais preservadas.

D - Mapa EDS para alumínio, mostrando as áreas onde estão presentes a mica e a caolinita.

E - Mapa EDS para silício evidenciando os grãos e vênulas de quartzo. A matriz caolinítica e as micas aparecem em cinza escuro.

F - Mapa EDS para ferro. Notar a presença de Fe nas áreas onde a mica e a caolinita estão presentes.

Figura 32 - Imagens ilustrando a zona de transição (base).

A - Fotomicrografia (luz refletida, nicóis paralelos). Zona de transição (topo) mostrando nódulo ferruginoso imerso em matriz caolínica. Notar a presença de vários espaços vazios.

B - Imagem MEV (elétrons retroespalhados) mostrando a mesma região observada ao lado com giro de aproximadamente 90 graus.

C - Mapa EDS para alumínio, mostrando a matriz rica em caolinita e o nódulo contendo algum Al também.

D - Mapa EDS para ferro, evidenciando o nódulo. Nota-se que nas bordas da área fraturada há maior concentração de Fe.

E - Mapa EDS para silício onde é possível observar grãos de quartzo finos na matriz e mais finos ainda dentro do nódulo.

F - Mapa EDS para titânio, provavelmente devido a rutilo e/ou anatásio em finos grãos.

Figura 33 -Imagens ilustrando a zona de transição (topo).

A - Fotomicrografia (luz refletida, nicóis paralelos). Couraça (base) onde se observa sua fábrica nodular e o caráter poroso (porção avermelhada)

B - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis paralelos). Couraça (base) onde se observa a fábrica nodular e as porções porosas que preservam o formato dos grãos de quartzo.

C - Imagem MEV (elétrons retroespalhados) mostrando a mesma região observada ao lado com giro de aproximadamente 90 graus.

D - Mapa EDS para ferro, mostrando concentração nas áreas mais maciças do nódulo e empobrecimento nas áreas porosas.

F - Mapa EDS para alumínio, onde se nota uma concentração nas áreas mais porosas, tanto dentro quanto fora do nódulo.

E - Mapa EDS para silício onde é possível observar grãos de quartzo, principalmente nas porções porosas do interior do nódulo e em seu contorno.

Figura 34 -Imagens ilustrando a couraça.

A - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis paralelos) mostrando a couraça em processo de desmantelamento. As fraturas e as bordas dos nódulos perdem ferro e apresentam cor amarelada. As fissuras radiais e concêntricas que circundam os nódulos permitem a entrada de soluções e materiais superficiais (iluviação) que aumentam a velocidade do intemperismo.

B - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis paralelos e cruzados) mostrando couraça contendo poros vazios (V) e parcialmente preenchidos por material de cor avermelhada vindo dos horizontes superiores (caolinita e oxi/hidróxidos de ferro).

C - Fotomicrografia (luz refletida, nicóis paralelos) mostrando o maior intemperismo das porções porosas da couraça. Os córtexes amarelados que envolvem os nódulos são bem mais desenvolvidos nas áreas porosas, onde o fluxo de soluções é mais intenso. Com o avanço do intemperismo a couraça é desmantelada, resultando em nódulos e pisólitos dispersos em matriz argilo-ferruginosa.

Figura 35 - Fotomicrografias ilustrando a couraça.

A - Fotomicrografias (luz refletida, nicóis paralelos) do latossolo vermelho mostrando matriz argilo-arenosa caolinítica contendo nódulos ferruginosos (N) e espaços vazios (V). No detalhe um nódulo ferruginoso em processo de dissolução, onde a matriz apresenta cor mais avermelhada no contato com o nódulo.

B - Imagem MEV (elétrons retroespalhados) apresentando o nódulo observado acima rotacionado em aproximadamente 90 graus.

C - Mapa EDS para alumínio mostrando matriz rica em caolinita que ocupa alguns dos vazios existentes no nódulo.

D - Mapa EDS para ferro mostrando a concentração do elemento no nódulo.

E - Mapa EDS para silício mostrando a presença de grãos de quartzo e de caolinita na matriz e no interior do nódulo.

Figura 36 - Imagens ilustrando o latossolo vermelho.

A - Fotomicrografias (luz refletida, nicóis paralelos) do latossolo amarelo mostrando matriz argilo-arenosa caolínica contendo nódulos ferruginosos (N) e espaços vazios (V). No detalhe observa-se um nódulo ferruginoso em processo de dissolução..

B - Imagem MEV (elétrons retroespalhados) apresentando um nódulo ferruginoso sendo atacado pelo processo intempérico.

C - Mapa EDS para alumínio mostrando matriz rica em caolinita que ocupa alguns dos vazios existentes no nódulo.

D - Mapa EDS para ferro mostrando a concentração do elemento no nódulo.

E - Mapa EDS para silício mostrando a presença de grãos de quartzo e de caolinita na matriz e no interior do nódulo.

Figura 37 - Imagens ilustrando o latossolo amarelo.

A - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis paralelos) mostrando o latossolo vermelho contendo alterorrelicto do granófiro (AR) imerso na matriz.

B - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis cruzados) mostrando detalhe do alterorrelicto ao lado com a mesma fábrica observada no granófiro.

C - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis cruzados) mostrando o latossolo amarelo portador de alterorrelicto do granófiro (AR) imerso na matriz.

D - Fotomicrografia (luz transmitida, nicóis cruzados) do latossolo amarelo apresentando grão de quartzo com a mesma fábrica observada no granófiro.

Figura 38 - Fotomicrografias ilustrando feições primárias preservadas nos latossolos vermelho e amarelo.

2.5. Caracterização geoquímica

A Tabela 11 e a Figura 39 mostram a composição química dos materiais provenientes de cada horizonte presente no perfil de alteração. No saprolito, a composição química é relativamente próxima daquela de uma rocha granítica, refletindo o grau de alteração ainda incipiente desse material. A porcentagem de K₂O é elevada, pois as micas se encontram pouco intemperizadas. No entanto, os teores de Na₂O e CaO já são muito baixos, em decorrência da completa alteração dos feldspatos em caolinita.

Na zona de transição, tem início realmente a concentração do ferro, que já atinge valores geralmente acima de 10% de Fe₂O₃. Nesses materiais, o teor de K₂O é bastante baixo, o que leva a uma composição dominada por SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, típica de materiais lateríticos, e que vai prevalecer nos horizontes superiores do perfil. A couraça é o horizonte onde os teores de ferro atingem os valores máximos, principalmente na sua base onde chega a mais de 58%. Complementarmente, os teores de SiO₂ e Al₂O₃ diminuem. Finalmente, nos latossolos, os teores de Fe₂O₃ caem a valores entre 6 e 7% e as concentrações de Al₂O₃ e SiO₂ elevam-se às faixas de 20 e 60%, respectivamente. De modo geral, não há diferença significativa na composição química entre os dois latossolos. Apenas pode-se notar um ligeiro empobrecimento em Fe no latossolo amarelo em comparação como latossolo vermelho.

Figura 39 – Concentração dos óxidos principais (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃) nos diferentes materiais presentes na trincheira T2

Tabela 11 – Composição química dos horizontes presentes na trincheira T2

	Latossolo Amarelo						Latossolo Vermelho						Ceara						Zona de Transição						Saprolito		
	AB-14	AT-14	AB-15	AT-15	AB-18	AT-18	BB-14	BT-14	BB-15	BT-15	BB-18	BT-18	CB-14	CT-14	CB-15	CT-15	CB-18	CT-18	D-14	DB-15	DT-15	DB-18	DT-18	E-14 #	F-14	F-15	
SiO ₂ *	65,24	64,27	64,00	64,58	64,78	63,62	64,00	62,09	62,11	63,68	62,03	62,72	17,63	34,46	31,99	42,42	44,76	42,66	57,14	61,59	56,44	55,06	61,02	76,86	72,22	71,67	
Al ₂ O ₃ *	18,81	19,29	19,42	18,63	19,49	19,37	19,71	20,54	19,60	19,80	20,63	20,29	11,43	15,51	13,29	17,11	10,68	17,23	18,93	16,95	19,53	19,21	19,23	11,54	15,85	15,92	
Fe ₂ O ₃ *	6,11	6,32	6,32	6,17	6,32	6,40	6,45	6,67	7,86	6,38	6,94	6,62	58,43	38,62	43,58	29,09	34,75	28,91	13,90	12,50	14,07	15,53	9,86	5,25	3,84	3,83	
MnO*	0,021	0,020	0,021	0,019	0,020	0,019	0,022	0,023	0,023	0,022	0,024	0,021	0,008	0,012	0,016	0,015	0,014	0,015	0,027	0,023	0,027	0,026	0,024	0,019	0,046	0,046	
MgO*	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06	0,08	0,07	0,07	0,06	0,07	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,04	0,08	0,03	0,09	0,07	0,07	0,14	0,26	0,25	
Na ₂ O*	0,09	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,04	
CaO*	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	
K ₂ O*	0,12	0,12	0,10	0,08	0,12	0,07	0,23	0,21	0,29	0,20	0,24	0,16	0,06	0,10	0,13	0,12	0,07	0,08	0,35	0,38	0,33	0,23	0,21	1,77	2,65	2,67	
TiO ₂ *	0,36	0,39	1,00	1,00	0,36	0,39	0,25	1,01	0,30	0,36	0,34	0,37	0,61	0,79	0,78	0,02	0,50	0,02	1,01	0,85	0,98	1,00	0,97	0,38	0,38	0,38	
P ₂ O ₅ *	0,056	0,058	0,055	0,056	0,055	0,058	0,061	0,062	0,058	0,058	0,060	0,060	0,042	0,048	0,048	0,049	0,036	0,049	0,008	0,057	0,067	0,066	0,063	0,033	0,023	0,021	
Ba**	104	134	117	106	124	122	128	129	132	128	129	112	12	57	85	105	45	96	142	143	177	139	150	219	261	262	
Co**	97	104	100	94	88	91	105	102	111	117	116	101	38	62	83	64	56	72	109	106	112	111	108	73	58	62	
Cr**	51	49	49	45	48	49	48	48	72	48	53	46	269	326	311	338	109	321	154	144	133	160	106	26	63	62	
Cu**	12	13	13	10	15	17	21	24	20	16	23	18	19	23	20	17	14	13	19	18	24	22	20	31	43	39	
Ga**	23	25	25	25	25	26	26	28	28	26	28	28	34	37	38	35	19	33	26	26	28	28	20	24	24	24	
La**	51	53	50	47	49	53	55	52	54	54	54	53	7	15	27	35	23	40	52	44	55	57	55	29	48	40	
Nb**	10	9	13	13	9	11	13	14	13	12	14	11	1	10	3	5	4	10	14	6	13	11	14	5	8	11	
Pb**	43	45	49	43	42	41	44	45	52	42	44	47	46	42	45	57	48	50	54	53	54	57	48	27	30	23	
Rb**	4	5	4	3	8	2	12	13	19	12	15	12	3	5	11	7	3	1	21	25	23	12	11	113	218	220	
S**	230	220	220	310	220	220	190	220	160	190	170	210	410	330	350	270	300	310	180	150	210	180	190	120	90	80	
Se**	43	47	47	44	45	45	43	48	42	46	50	45	15	25	27	33	19	33	49	38	50	47	49	24	10	9	
V**	92	86	91	86	77	81	89	88	111	80	82	84	1268	908	1661	990	290	618	201	146	177	186	135	56	43	44	
Y**	28	24	25	25	26	25	27	28	29	30	31	29	12	18	18	20	11	24	29	27	25	24	26	28	35	38	
Zn**	19	18	18	17	20	19	18	21	20	18	25	21	13	14	16	9	9	13	15	19	17	19	15	14	50	51	
Zr**	446	470	508	475	453	461	460	484	452	461	464	476	365	446	385	474	283	499	456	408	451	448	443	323	491	485	

a amostra E – 14, tida como da zona de transição no campo, é considerada aqui como um saprolito muito evoluído devido à sua composição química.

* em % em peso

** em ppm

Na Tabela 12 estão os valores médios e os desvios-padrões respectivos para a composição de cada horizonte. A partir deles e do conhecimento das fases presentes, foi calculada uma composição mineralógica normativa média, apresentada na Tabela 13. Esses resultados confirmam a avaliação semi-quantitativa feita a partir da difração de raios X.

Com a finalidade de pôr em evidência a relação entre as variáveis, foi efetuada a análise fatorial para o conjunto de 26 amostras analisadas para 25 elementos. Foram selecionados 2 fatores e efetuada a rotação varimax. Os pesos para cada variável em cada fator e os *scores* de cada fator para cada amostra estão na Tabela 14, assim como as comunalidades para cada variável no modelo de 2 fatores. A Figura 40 mostra a projeção dos pesos e dos *scores* em diagramas F1 versus F2.

Os resultados mostram que o modelo de 2 fatores, dando conta de 81 % da variância total, foi adequado para a caracterização dos dados. F1 é responsável por 45 % da variância total e F2 por 36 %. Os valores das comunalidades, a maior parte próxima de 1, indicam que o comportamento das variáveis está suficientemente bem descrito pelo modelo.

Tabela 12 – Composição média dos horizontes presentes em T2 (dados da Tabela 11).

Elemento	Latossolo Amarelo (N = 6)			Latossolo Vermelho (N = 6)			Couroça (N = 6)			Zona de Transição (N = 5)			Saprolito (E-14)	Saprolito (F-14 e 15)		
	Média	Desvio p.		Média	Desvio p.		Média	Desvio p.		Média	Desvio p.		Valores	Média	Desvio p.	
SiO ₂ (%)	64,32	0,55		62,78	0,87		35,65	10,17		58,29	2,86		76,86	71,95	0,39	
Al ₂ O ₃ (%)	19,17	0,36		20,10	0,45		14,21	2,84		18,77	1,04		11,54	15,89	0,05	
Fe ₂ O ₃ (%)	6,27	0,11		6,82	0,55		38,90	11,11		13,19	2,15		5,25	3,84	0,01	
MnO (%)	0,02	0,00		0,02	0,00		0,01	0,00		0,03	0,00		0,02	0,05	0,00	
MgO (%)	0,06	0,01		0,07	0,01		0,04	0,01		0,08	0,01		0,14	0,26	0,01	
CaO (%)	0,01	0,00		0,01	0,00		0,00	0,01		0,01	0,00		0,02	0,02	0,00	
Na ₂ O (%)	0,00	0,01		0,00	0,01		0,00	0,01		0,01	0,00		0,02	0,04	0,00	
K ₂ O (%)	0,10	0,02		0,22	0,04		0,09	0,03		0,30	0,08		1,77	2,66	0,01	
TiO ₂ (%)	0,98	0,02		0,96	0,03		0,72	0,13		0,96	0,07		0,38	0,38	0,00	
P ₂ O ₅ (%)	0,06	0,00		0,06	0,00		0,05	0,01		0,06	0,00		0,03	0,02	0,00	
Ba (ppm)	118	11		126	7		67	35		150	16		219	262	1	
Ce (ppm)	94	8		109	7		63	15		109	2		73	60	3	
Cr (ppm)	49	2		53	10		279	87		139	21		26	63	1	
Cu (ppm)	13	2		20	3		18	4		21	2		31	41	3	
Ga (ppm)	25	1		27	1		33	7		27	1		20	24	0	
La (ppm)	51	2		54	1		22	17		53	5		29	44	6	
Nb (ppm)	11	2		13	1		6	4		12	3		5	10	2	
Pb (ppm)	44	3		46	4		48	5		53	3		27	27	5	
Rb (ppm)	4	2		14	3		5	4		18	6		113	219	1	
S (ppm)	237	36		190	23		328	48		182	22		120	85	7	
Sr (ppm)	45	2		46	3		25	7		47	5		24	10	1	
V (ppm)	86	6		89	11		969	480		169	28		56	44	1	
Y (ppm)	26	1		29	1		17	5		26	2		28	37	2	
Zn (ppm)	19	1		21	3		12	3		17	2		14	51	1	
Zr (ppm)	469	22		466	12		409	80		441	19		321	488	4	

Tabela 13 – Composição mineralógica dos horizontes presentes no perfil, calculada a partir dos dados químicos

	Quartzo	Hem. + Goet.	Mica	Caol.
Lat. Am.	43	7	1	49
Lat. Ver.	39	7	1	51
Couroça	24	42	1	33
Z. Trans.	38	14	3	45
Sap. (E-14)	53	6	18	23
Sap. (F-14 e 15)	47	4	27	22

O diagrama dos pesos (Figura 40A) mostra que o Fator 1 opõe os elementos mais solúveis (Mn, Mg, Na, Ca, K, Ba, Cu, Rb, Zn e Si), que apresentam pesos bastante negativos aos elementos mais insolúveis, com pesos positivos. O grupo de elementos mais solúveis apresenta suas maiores concentrações no saprolito, concentrações mínimas na couraça e apenas ligeiramente superiores nos latossolos. Parte deles (Si, Na, K, Ca, Mg, Rb) está associada a restos dos minerais primários (feldspatos e principalmente micas), constituindo a assinatura geoquímica granítica da rocha parental. Os demais (Mn, Ba, Cu e Zn) associam-se às concreções manganíferas neoformadas na base do perfil.

O Fator F2 separa, entre os elementos menos solúveis, os que acompanham o Fe (V, Cr, Ga e S) dos que acompanham o Al (Ti, P, Sr, Zr, Ce, La, Nb e Y). O Pb fica numa posição intermediária entre os grupos do Al e do Fe. Os elementos que acompanham o Fe apresentam teores crescentes do saprolito à couraça e queda mais ou menos acentuada nos latossolos. Devem estar associados aos oxi-hidróxidos de ferro, que são as fases dominantes na couraça. De fato, V e Cr são elementos de transição comumente encontrados nas goethitas. O Ga, por outro lado, aparece geralmente associado aos minerais aluminosos, substituindo esse elemento no retículo cristalino. No entanto, no caso de perfis de evolução complexa, com fases de ferruginização ou de aluminização superimpostas à saprolitização, há dissociação entre esses dois elementos, como foi demonstrado por Hieronymos *et al.* (2001). É o que acontece no perfil estudado, onde a correlação Al/Ga é praticamente nula (-0,06) e a correlação entre Al/Fe é bastante significativa (+0,67). Segundo esses autores, com a dissolução da caolinita, o Ga é posto em solução, sendo retido pelos oxi-hidróxidos de ferro em vias de formação.

Os elementos do grupo do Al apresentam seus valores mínimos na couraça e crescentes nos latossolos, onde estão em concentração semelhante ou mais elevada que no saprolito. Esses elementos encontram-se principalmente nos minerais resistentes à alteração como o zircão e o anatásio, e nos fosfatos neoformados (Sr e terras raras).

A relação entre as amostras é muito bem ilustrada pelo diagrama dos *scores* (Figura 40B). As amostras de saprolito, com altos valores negativos de F1, separam-se muito bem das demais. As da couraça, com altos valores positivos de F1 e valores negativos de F2, também estão muito bem individualizadas no diagrama. No entanto, a análise fatorial não foi capaz de distinguir as amostras da zona de transição daquelas do latossolo; todas apresentam valores positivos de F2 e positivos de F1 e encontram-se agrupadas no canto superior direito do diagrama da Figura 40B.

Figura 40 – Diagramas do Fator 1 *versus* Fator 2 para os elementos e amostras.

Tabela 14 – Pesos dos fatores 1 e 2, comunalidades para o modelo de 2 fatores e *Scores* de cada fator para cada amostra.

	Pesos dos Fatores		Comunalidades	Scores para as amostras		
	Fator 1	Fator 2		Fator 1	Fator 2	
SiO2	-0,52	0,77	0,86	AB-14	0,30	0,53
Al2O3	0,25	0,90	0,87	AT-14	0,33	0,57
Fe2O3	0,38	-0,88	0,93	AB-15	0,44	0,72
MnO	-0,82	0,42	0,84	AT-15	0,47	0,49
MgO	-0,98	0,08	0,96	AB-18	0,09	0,42
Na2O	-0,86	-0,01	0,74	AT-18	0,29	0,50
CaO	-0,88	0,10	0,78	BB-14	0,09	0,71
K2O	-0,99	-0,06	0,98	BT-14	0,24	0,80
TiO2	0,73	0,64	0,95	BB-15	0,14	0,69
P2O5	0,74	0,60	0,91	BT-15	0,24	0,80
Ba	-0,84	0,42	0,88	BB-18	0,17	0,91
Ce	0,32	0,85	0,83	BT-18	0,30	0,68
Cr	0,36	-0,69	0,61	CB-14	0,58	-2,73
Cu	-0,86	-0,09	0,74	CT-14	0,70	-1,51
Ga	0,45	-0,44	0,39	CB-15	0,68	-1,79
La	-0,01	0,96	0,93	CT-15	0,66	-1,01
Nb	0,05	0,85	0,72	CB-18	0,21	-1,71
Pb	0,79	0,13	0,64	CT-18	0,60	-0,65
Rb	-0,99	-0,07	0,98	DT-14	0,31	0,71
S	0,69	-0,61	0,85	DB-14	-1,61	-0,73
Sr	0,59	0,78	0,96	DB-15	0,03	0,12
V	0,35	-0,81	0,77	DT-15	0,23	0,69
Y	-0,62	0,70	0,87	DB-18	0,36	0,55
Zn	-0,86	0,20	0,77	DT-18	0,28	0,69
Zr	-0,04	0,60	0,37	F-14	-2,94	-0,24
Expl.Var	11,20	8,93		F-15	-3,21	-0,20
Prp.Totl	0,45	0,36				

2.6 Balanço de massa

Para quantificar as transferências de massa durante o processo intempérico, foi calculado o balanço de massa, de acordo com os princípios desenvolvidos por Brimhall & Dietrich (1987) e Brimhall *et al.* (1991). Segundo esses autores, a mudança volumétrica sofrida por um determinado horizonte *w* pode ser expressa por:

$$\varepsilon_{i,w} = ((\delta_p C_{i,p})/(\delta_w C_{i,w}))-1,$$

onde i é o elemento considerado imóvel durante o intemperismo, δ_p é a densidade do material parental, δ_w é a densidade aparente (*bulk density*) do material do horizonte w , $C_{i,p}$ é a concentração do elemento imóvel no material parental e $C_{i,w}$ é a concentração do elemento imóvel no horizonte w . Se $\varepsilon = 0$, temos uma alteração isovolumétrica. Valores de ε negativos significam que houve colapso do material alterado e valores de ε positivos indicam dilatação.

A adição (valores positivos) ou perda (valores negativos) de um elemento j em relação à sua quantidade no material parental é quantificada pela função de transporte de massa τ , expressa por:

$$\tau = ((\delta_w C_{j,w} / \delta_p C_{j,p})(\varepsilon_{i,w} + 1)) - 1$$

Para o perfil estudado, o material parental foi considerado o saprolito (média de F-14 e F-15) e o elemento imóvel, o titânio. A Tabela 15 mostra os valores de ε expressos em porcentagem, calculados utilizando-se as densidades médias e os teores médios de TiO_2 para cada horizonte.

Tabela 15 – Densidades, teores médios de TiO_2 e valores de ε .

Horizonte	δ	TiO_2 %	ε
LA	1,4	0,98	- 53%
LV	1,6	0,96	-58%
C	2,0	0,72	-55%
ZT	1,6	0,96	-58%
SAP (E-14)	1,7	0,38	0
SAP (F-14 e F-15)	1,7	0,38	

Os valores calculados da função de transporte de massa τ , expressos em porcentagem, constam da Tabela 16. Os resultados do balanço de massa mostram, em primeiro lugar, que no saprolito a alteração é isovolumétrica ($\varepsilon = 0$ no topo do saprolito). Do saprolito para a zona de transição ocorre uma perda de volume da ordem de 50%, que se mantém nesses níveis nos horizontes superiores. Isso significa que há compactação significativa do material alterado desde a zona de transição, o que confirma a observação macro e microscópica de perda das estruturas primárias a partir desse horizonte. Colapsos dessa ordem de grandeza nos horizontes saprolíticos de perfis lateríticos foram reportados por Colin *et al.* (1993) no Gabão, e por Boulangé & Colin (1994) no Brasil, na região do maciço de Passa Quatro.

Os valores de τ permitem identificar grupos de elementos em função do crescente grau de perda ou ganho nos perfis. Nota-se, em primeiro lugar, o grupo de elementos que apresentam perdas importantes (>70%) em todos os horizontes, a partir da zona de transição até os latossolos: Mn, Mg, Ca, K, Ba, Rb, Y, Zn, Cu. Segue-se o grupo que apresenta perdas importantes na couraça e moderadas nos latossolos (Si, Ce, Nb e La). Sofrem perdas moderadas no perfil Al, Zr, seguidos por Ga e Pb, que apresentam baixas perdas, sobretudo na couraça. Elementos que apresentam ganhos importantes na couraça e perda baixa a moderada nos latossolos são o Fe, V, Cr e S. Esses ganhos de Fe nos horizontes encouraçados, constatados por muitos autores tais como Porto & Hale (1996) e Freyssinet & Itard (1997), significam que foi necessária a dissolução de uma grande espessura de saprolito para gerar a couraça.

Finalmente, apresentam comportamento de difícil interpretação dois elementos, o P e o Sr. O fósforo mantém-se aproximadamente constante no perfil, exceto na zona de transição, onde apresenta ganhos muito moderados. O estrôncio, cujo comportamento geralmente acompanha o do Ca e do Ba, sendo, portanto, lixiviado dos perfis lateríticos, no caso estudado mostra enriquecimento absoluto em todos os horizontes do perfil. Isso pode ser devido a erro analítico na determinação de Sr no saprolito parental que, de fato, apresenta valores excepcionalmente baixos nesse elemento, em se tratando de saprolito de rocha ácida.

2.7. Gênese

Na região do Garimpo Fazenda Pison puderam ser observadas as várias etapas de um processo intempérico caracterizado por uma fase de formação de couraça ferruginosa no seio do perfil laterítico e de um processo superimposto de degradação da couraça com formação de latossolos.

O balanço de massa mostrou que o processo de encouraçamento se dá por aporte de Fe desde a zona de transição, intensificando-se nos horizontes encouraçados. Dentro da concepção verticalista, que pressupõe que o perfil de alteração desenvolve-se essencialmente *in situ*, sem contribuições laterais significativas (Nahon 1986, Tardy 1993), a couraça é considerada como resultado da dissolução de uma espessa camada de saprolito situada no passado acima da couraça atual e hoje desaparecida.

Tabela 16 – Perdas e ganhos para cada elemento (em %) nos diferentes horizontes do fetolito.

	Latossolo Amarelo						Latossolo Vermelho						Couraça						Zona de Transição					Saprolito
	ab-14	at-14	ab-15	at-15	ab-18	at-18	bb-14	bt-14	bb-15	bt-15	bb-18	bt-18	cb-14	ct-14	cb-15	ct-15	cb-18	ct-18	d-14	db-15	dt-15	db-18	dt-18	e-14
Si-tau	-64,9	-65,4	-65,6	-65,2	-65,5	-65,8	-64,8	-65,9	-65,9	-65,0	-65,9	-65,5	-87,0	-74,6	-76,5	-68,8	-67,1	-68,6	-68,6	-66,2	-68,9	-69,8	-66,5	6,8
Al-tau	-53,2	-53,4	-53,6	-55,3	-51,4	-53,3	-50,5	-51,1	-48,0	-50,5	-47,7	-49,8	-54,9	-53,3	-58,3	-50,1	-48,5	-49,8	-55,3	-52,1	-52,5	-54,0	-52,5	-26,9
Fe-tau	-37,1	-36,9	-37,6	-38,8	-34,8	-36,2	-33,0	-34,4	-13,8	-34,1	-27,2	-32,3	854,1	381,3	466,0	250,6	593,3	248,5	36,7	46,2	41,5	53,7	0,8	37,4
Mn-tau	-81,9	-83,3	-82,7	-84,3	-82,8	-84,2	-80,9	-81,1	-78,9	-81,0	-79,0	-82,1	-89,1	-87,5	-82,7	-84,9	-76,7	-84,9	-78,0	-77,5	-77,3	-78,5	-79,5	-58,5
Mg-tau	-90,9	-92,6	-92,7	-91,2	-89,3	-91,2	-90,8	-88,4	-88,7	-89,3	-90,7	-89,4	-92,8	-94,5	-90,4	-91,1	-85,3	-92,9	-88,5	-86,2	-86,6	-89,8	-89,4	-45,9
Na-tau	-100,0	-90,3	-100,0	-100,0	-80,6	-100,0	-80,6	-100,0	-90,3	-100,0	-100,0	-100,0	-86,8	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0	-86,8	-90,1	-90,1	-90,1	-90,1	-90,1	-50,0
Ca-tau	-80,2	-80,8	-81,0	-80,9	-80,2	-80,9	-80,1	-81,1	-78,9	-80,2	-79,9	-80,4	-68,6	-100,0	-100,0	-76,9	-61,7	-76,9	-81,2	-77,5	-80,7	-81,0	-80,4	0,5
K-tau	-98,2	-98,3	-98,6	-98,9	-98,2	-99,0	-96,6	-97,0	-95,4	-97,0	-96,4	-97,6	-98,6	-98,2	-97,5	-97,9	-98,0	-98,6	-95,1	-93,6	-95,2	-96,7	-96,9	-33,1
P-tau	0,7	1,1	-5,2	-3,0	-0,9	0,9	10,6	6,5	11,1	4,6	9,8	7,1	19,7	4,4	8,8	3,1	25,4	3,1	15,9	16,4	17,6	14,0	12,4	50,8
Ba-tau	-84,3	-80,4	-83,1	-84,6	-81,2	-82,2	-80,5	-81,4	-78,8	-80,6	-80,2	-83,2	-97,1	-89,6	-83,8	-81,5	-86,8	-83,0	-79,7	-75,5	-73,9	-79,8	-77,5	-16,0
Ce-tau	-36,1	-33,5	-36,8	-40,3	-41,9	-48,3	-30,2	-35,8	-22,1	-22,7	-22,2	-33,9	-60,3	-50,5	-31,0	-50,6	-28,5	-44,5	-31,9	-20,6	-27,9	-29,7	-29,3	22,3
Cr-tau	-68,0	-70,2	-70,5	-72,8	-69,8	-70,2	-69,6	-71,2	-51,9	-69,8	-66,1	-71,3	167,7	147,7	146,2	148,3	32,6	135,8	-8,3	2,7	-18,5	-3,5	-33,9	-58,5
Cu-tau	-88,4	-87,8	-88,0	-90,7	-85,5	-84,1	-79,6	-77,9	-79,4	-84,5	-77,4	-82,8	-70,9	-73,2	-75,7	-80,8	-73,8	-85,3	-82,6	-80,3	-77,4	-79,6	-80,9	-24,0
Ga-tau	-62,1	-60,1	-60,5	-60,3	-58,7	-58,5	-56,8	-55,9	-50,8	-57,0	-53,0	-54,2	-11,2	-26,2	-21,0	-32,5	-39,3	-36,4	-59,4	-51,3	-58,2	-55,7	-54,2	-16,2
La-tau	-54,2	-53,8	-56,9	-59,3	-55,9	-53,9	-50,2	-55,4	-48,3	-51,3	-50,6	-52,7	-90,0	-83,7	-69,4	-63,2	-60,0	-57,9	-55,7	-55,1	-51,7	-50,8	-50,9	-33,7
Nb-tau	-60,5	-69,3	-50,7	-50,5	-64,3	-57,9	-48,2	-47,1	-45,2	-52,4	-43,6	-56,8	-93,7	-52,1	-85,0	-76,9	-69,4	-53,7	-47,5	-73,0	-49,8	-58,2	-45,0	-49,7
Pb-tau	-37,0	-36,1	-31,2	-39,3	-38,4	-41,9	-35,0	-37,0	-18,9	-38,3	-34,4	-31,7	6,8	-25,6	-16,9	-2,3	30,5	-10,9	-25,0	-11,8	-22,8	-19,8	-30,2	0,5
Rb-tau	-99,3	-99,1	-99,3	-99,7	-98,6	-99,7	-97,8	-97,8	-96,3	-97,8	-97,2	-97,8	-99,1	-98,9	-97,5	-98,5	-99,0	-99,8	-96,4	-94,9	-95,9	-97,9	-98,0	-48,1
S-tau	7,0	-0,8	-1,8	39,0	2,6	-1,0	-10,9	-2,2	-20,7	-11,3	-19,5	-3,0	202,5	85,8	105,3	47,0	170,4	68,8	-20,6	-20,7	-4,6	-19,5	-12,3	41,9
Sr-tau	70,0	80,2	78,2	67,7	78,3	72,2	71,5	81,3	76,9	82,5	101,3	76,7	-5,9	19,6	34,6	52,7	45,6	52,7	83,8	70,7	93,1	78,6	92,4	141,3
V-tau	-17,3	-25,1	-21,6	-25,5	-30,7	-29,6	-19,3	-24,5	6,3	-27,9	-25,0	-25,1	1707,1	974,7	1782,5	941,4	404,9	550,1	71,4	49,0	55,3	60,6	20,4	27,9
Y-tau	-70,1	-75,1	-74,4	-74,2	-72,2	-74,1	-70,9	-71,4	-67,0	-67,8	-66,3	-69,2	-79,7	-76,7	-75,7	-75,0	-77,2	-70,0	-70,6	-67,2	-73,9	-75,4	-72,4	-23,9
Zn-tau	-85,3	-86,5	-86,6	-87,3	-84,5	-85,7	-85,9	-84,4	-83,5	-86,0	-80,3	-83,8	-84,0	-86,9	-84,4	-91,8	-86,5	-88,2	-89,0	-83,3	-87,1	-85,8	-88,5	-72,4
Zr-tau	-63,9	-63,1	-60,5	-62,9	-63,2	-63,8	-62,4	-62,5	-61,0	-62,5	-61,7	-61,7	-53,1	-56,3	-60,7	-55,0	-55,6	-52,7	-64,9	-62,4	-64,3	-65,1	-64,6	-33,9

O processo de agradação da couraça na área estudada caracterizou-se pela dissolução parcial do quartzo e da caolinita e pela acumulação absoluta de ferro a partir dos horizontes sobrepostos. O Fe acumulou-se principalmente sob forma de hematita associada à caolinita nos poros de pequena dimensão. O material se endureceu pelo desenvolvimento de uma organização nodular, onde os nódulos foram soldados por um plasma ferruginoso vermelho. Junto com o Fe houve acumulação absoluta de V, Cr e S (e de alguns elementos indicadores da mineralização, como será discutido mais adiante). Todos os demais elementos foram lixiviados em maior ou menor grau. Assim, a assinatura geoquímica do saprolito não foi preservada na couraça, revelando perda da herança geoquímica da rocha parental no processo de ferruginização, o que parece ser comum na gênese das couraças ferruginosas (Tardy *et al.* 1988, Boeglin & Mazaltarim 1989, Beauvais & Colin 1993, Beauvais & Roquin 1996).

As condições hidroclimáticas que favorecem o concrecionamento e a estabilidade da associação hematita-caolinita favorecem também o encouraçamento. Encontram-se essas condições em regiões de clima tropical úmido com uma longa estação seca, o que permite uma redistribuição de ferro no perfil (Nahon 1986). As couraças são, portanto, valiosos indicadores paleoambientais.

Quando expostas à superfície e recobertas por vegetação, as couraças tendem a degradar-se, pela formação de blocos decimétricos, depois centimétricos, chegando finalmente a um solo concrecionar. O processo de degradação das couraças é exacerbado quando há mudança climática em direção a uma maior umidade. A degradação se faz por hidratação e redução. A hidratação é consequência da maior disponibilidade de água, o que promove a elevação do lençol freático, produzindo um meio hidromórfico no interior da couraça. A redução é favorecida pela mineralização da matéria orgânica do solo, que consome oxigênio e libera gás carbônico, tornando as soluções do intemperismo mais ácidas e redutoras, capazes, portanto, de mobilizar o ferro.

As principais reações na degradação da couraça na área do Garimpo Fazenda Pison foram a dissolução preferencial do ferro e a hidratação da hematita em goethita. Subsistiram a esse processo a caolinita do plasma deferruginizado e o quartzo. O resultado foi a formação de latossolos, de matriz areno-argilosa com grânulos e microgrânulos que representam os últimos vestígios da couraça. Os dados do balanço de massa indicam que alguns elementos, como o Al, mostram perdas da mesma ordem de grandeza nos latossolos e nas couraças. Como o balanço é calculado para todos os horizontes tomando como referência o saprolito, isto significa que, da couraça aos latossolos, houve uma razoável conservação de massa do Al. Para o Si, há perda maior na couraça que nos latossolos, o que indica que há aporte desse elemento na gênese do latossolo a partir da couraça. Uma fonte possível para esse excesso de sílica, representado pelo quartzo, são os organismos do solo, que trazem a terra fina dos horizontes profundos para os mais superficiais, como bem demonstraram Eschenbrenner (1986) e Freyssinet (1990). O processo de degradação das couraças em latossolos acima descrito é comparável àquele descrito por Beauvais & Tardy (1991), Bilong *et al.* (1992) e Bitom & Volkoff (1993) na África, e por Nahon *et al.* (1989) na Amazônia oriental.

Do ponto de vista temporal, é possível emitir uma hipótese para a cronologia do encouraçamento. A fase de agradação da couraça estaria situada no final do Terciário, época do aplainamento Velhas (King 1956), em que o clima seria mais seco que o atual. Por outro lado, a fase de degradação das couraças, gerando os latossolos, estaria relacionada ao advento de climas mais úmidos correspondentes aos períodos interglaciais do Quaternário.

3. Morfologia e composição das partículas de ouro

O objetivo desse estudo foi examinar a morfologia e a composição química dos grãos de ouro no perfil laterítico buscando correlacionar os resultados aos processos intempéricos atuantes. As técnicas utilizadas são essencialmente as mesmas daquelas empregadas por Freyssinet & Butt (1988) num estudo similar feito na Austrália Ocidental. Os resultados permitiram comparar o comportamento do ouro no Garimpo Fazenda Pison com outras áreas que passaram por intemperismo laterítico seguido por regimes pós-lateríticos distintos: clima árido (Austrália) e de savana úmida (África).

A trincheira T2 foi selecionada para estudo devido à presença do perfil laterítico completo. Nesse estudo foram utilizadas 12 partículas recuperadas no furo de sondagem FFP-1 (entre 25 e 28 metros de profundidade), consideradas primárias e livres da ação intempérica; e 1842 partículas recuperadas no regolito (concentrados de bateia). Partículas encontradas em seções polidas de veios de quartzo também foram estudadas. A localização das amostras pode ser vista nas Figuras 10 e 13.

3.1. Morfologia e tamanho

As características morfológicas das partículas de ouro foram estudadas com o microscópio binocular óptico e com o microscópio eletrônico. Para a classificação morfológica foram utilizadas os seguintes critérios:

- **Forma**

Segundo Blatt *et al.* (1982), a forma de um grão é uma propriedade complexa, sendo difícil descrever o formato de maneira precisa exceto para grãos de se assemelhem às formas geométricas regulares. Neste estudo foram escolhidas as seguintes classes:

1 – *Dendrítica*: agregados irregulares de aparência arborescente desenvolvida em duas dimensões;

2 – *Poligonal*: estes grãos apresentam formato lembrando cristais bem formados, configurando grânulos facetados;

3 – *Estelar*: agregados irregulares apresentando desenvolvimento de ramificações em 3 dimensões; e

4 – *Irregular*: agregados irregulares apresentando 2 ou 3 dimensões bem desenvolvidas; na maior parte dos casos trata-se de uma combinação de dois ou mais tipos apresentados anteriormente.

- **Arestas**

- 1 – *Nítidas*: o contato entre as faces de um grão não apresenta arredondamento;
- 2 – *Pouco arredondadas*: o contato entre as faces apresenta baixo grau de arredondamento, sendo possível observar arestas parcialmente nítidas;
- 3 – *Arredondadas*: o contato entre as faces é arredondado; não se observam arestas nítidas; e
- 4 – *Muito arredondadas*: o contato entre as faces apresenta alto grau de arredondamento; as faces dificilmente são observadas.

- **Contorno**

- 1 – *Serrilhado*: o contorno externo apresenta vários “dentes”; e
- 2 – *Poligonal*: o contorno externo se assemelha a um polígono.

- **Comprimento**

Medida do maior eixo do cristal em micrômetros (μm).

- **Largura**

Medida do menor eixo em micrômetros (μm).

- **Tamanho**

Resultado obtido com a raiz quadrada do produto do comprimento e largura.

3.1.1. Minério fresco

Apenas doze grãos foram recuperados a partir do bateamento da amostra de minério fresco (940 g de material coletado no furo de sondagem FFP-1 entre as profundidades de 25 e 28 m). Isso impossibilitou o estudo estatístico das características encontradas. Outros nove grãos foram observados em seções polidas do minério (exemplos nas Figuras 19 a 22). O ouro está associado a veios de quartzo + pirita, estando também presente na rocha encaixante próxima a estes.

Duas morfologias foram observadas: (1) xenomófica irregular (58%) e (2) xenomófica poligonal (42%). Ambas apresentam faces lisas, arestas nítidas e mostram a impressão dos grãos que as envolvem (Figuras 41). O tamanho médio dos grãos é de 56 μm , com desvio-padrão igual a 22. Todos os grãos tem quantidade apreciável de prata; alguns mostram pequenos sinais de corrosão. Não foi possível recuperar os grãos de ouro hospedados na pirita.

Figura 41 – Imagem MEV (elétrons retroespalhados) de grão de ouro xenomórfico irregular (A) e poligonal (B) com arestas nítidas e faces lisas.

3.1.2. Regolito

As Figuras 42 a 53 apresentam as características e alguns exemplos das partículas recuperadas nas diferentes unidades encontradas no saprolito; as Figuras 54 a 63 apresentam as características das partículas recuperadas no pedolito. A Figura 64 e a Tabela 17 apresentam um resumo das características morfológicas dos grãos recuperados na trincheira T2.

Saprolito

a) Granófiro

Foram recuperados grãos de ouro em quatro pontos dessa unidade, a diferentes profundidades e dentro da rocha encaixante, buscando documentar a evolução dos mesmos frente aos processos intempéricos.

Analisando os resultados referentes às características das arestas, é possível notar que as amostras mais próximas à superfície apresentam maior grau de arredondamento, evidenciando um processo de dissolução da partícula no ambiente supérgeno.

- **Amostra T2-I (10 m)**

A Figura 42 apresenta as características e a Figura 43 alguns exemplos dos grãos encontrados nesse nível do granófiro. A forma mais comum é a irregular, perfazendo 70% dos grãos observados que apresentam tamanho entre 41 e 180 μm . Três grãos se destacam pelo tamanho maior que 170 μm ; dois deles são estelares e o outro é irregular. Sete grãos (2 irregulares, 4 dendríticos e 1 estelar) se destacam dos demais apresentando relação

comprimento/largura maior que dois. Foram observados grãos com arestas nítidas (4,3%) e a grande maioria dos grãos possui arestas pouco arredondadas (94,3%). Além disso, poucos *pits* foram observados na superfície dos grãos, caracterizando um processo de corrosão química pouco desenvolvido.

- **Amostra T2-H (8 m)**

As Figuras 44 e 45 apresentam, respectivamente, as características e alguns exemplos dos grãos recuperados nesse nível do saprolito. Esta foi a zona mais rica amostrada neste estudo, onde foram recuperadas 1474 partículas. A maior parte delas tem formato irregular (72,9%), seguido pelo dendrítico, estelar e poligonal. Foi também observado 1,7% de grãos tabulares. Os grãos de ouro nesse nível do saprolito apresentam comprimento variando entre 19 e 381 μm (média de 113 μm), largura entre 19 e 319 μm (média de 75 μm), e tamanho entre 19 e 381 μm (média de 91 μm). As razões comprimento/largura variam entre 1 e 5, com média de 1,55. Ainda foram descritas arestas nítidas (3,0%), e a grande maioria dos grãos (94,6%) continuou apresentando arestas pouco arredondadas. Alguns *pits* foram observados na superfície dos grãos. A julgar pelas características apresentadas, essas partículas não se mostram atacadas pelo intemperismo de maneira muito mais efetiva que as descritas anteriormente.

- **Amostra T2-G (7 m)**

A Figura 46 apresenta as características e a Figura 47 alguns exemplos das partículas encontradas nesse nível do saprolito. O formato irregular é o mais presente (80,1%) e o tamanho dos grãos varia entre 28 e 512 μm (média de 106). Destaca-se aqui a presença de uma partícula com comprimento de 763 μm e largura de 344 μm . A razão comprimento/largura varia entre 1 e 2,22 (média de 1,61). Arestas nítidas não foram observadas a partir desse nível, havendo um predomínio daquelas pouco arredondadas (90,5%). *Pits* foram observados com maior frequência na superfície das partículas (Figura 47F).

- **Amostra T2-F (4m)**

A Figura 48 apresenta as características e a Figura 49 alguns exemplos das partículas encontradas no topo do saprolito. O formato mais comum é o irregular (73,7%), seguido pelo estelar (15,8%). O tamanho varia de 34 a 201 μm (média de 114 μm). A razão comprimento/largura varia entre 1 e 3,18 (média de 1,64). As arestas pouco arredondadas são predominantes (89,5%). Vários *pits* foram observados na superfície dos grãos.

b) Bolsão de Quartzo (amostra T2-J)

A Figura 50 mostra as características e a Figura 51 alguns exemplos das partículas presentes nesse material. O principal formato observado foi o irregular (78,7%). O formato poligonal não foi observado. O tamanho dos grãos varia de 50 a 207 μm (média de 92 μm). A razão comprimento/largura varia de 1 a 3 (média de 1,61). As arestas são principalmente pouco arredondadas (85,2%). Vários *pits* foram observados na superfície dos grãos.

Figura 42 – Características das partículas presentes no saprolito – granófiro, profundidade de 10 m, amostra T2-I.

Figura 43 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados no granófiro a 10 m de profundidade (amostra T2-I). Os grãos xenomórficos são caracterizados por faces lisas e arestas nítidas e pela impressão dos grãos que os envolveram (provavelmente quartzo). Os grãos A, B e C têm formato poligonal a irregular; os grãos D e E têm formato irregular; e o grão F tem formato estelar.

Figura 44 – Características das partículas presentes no saprolito – granófiro, profundidade de 8 m, amostra T2-H.

Figura 45 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados no granófiro a 8 m de profundidade (amostra T2-H). Os grãos xenomórficos são caracterizados por facetas lisas, arestas nítidas (porém o grau de arredondamento aumenta em relação à Figura 43) e pela impressão dos grãos que os envolveram (provavelmente quartzo). Os grãos A e B têm formato poligonal a irregular; os grãos C e D são irregulares; e os grãos E e F têm formato estelar a dendrítico.

Figura 46 – Características das partículas presentes no saprolito – granófiro, profundidade de 7 m, amostra T2-G.

Figura 47 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados no granófiro a 8 m de profundidade (amostra T2-G). Os grãos xenomórficos mostram a impressão dos grãos que os envolveram (provavelmente quartzo). Os grãos A e B têm formato poligonal a irregular; os grãos C a E são irregulares, com diferentes graus de arredondamento. Em F pode-se observar os *pits* encontrados na superfície das partículas.

Figura 48 – Características das partículas presentes no saprolito – granófiro, profundidade de 4 m, amostra T2-F.

Figura 49 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados no granófiro a 4 m de profundidade (amostra T2-F). Os grãos xenomórficos guardam a impressão dos grãos que os envolveram (provavelmente quartzo); as faces e arestas são arredondadas e características da corrosão química. Os grãos A a C têm formato irregular; os grãos D e E são irregulares com tendência dendrítica. A Figura F apresenta detalhe das feições de corrosão encontradas na maior parte dos grãos presentes nesse nível.

Figura 50 – Características das partículas presentes no saprolito – bolsão de quartzo, profundidade de 3,5 m, amostra T2-J.

Figura 51 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados no bolsão de quartzo a 4 m de profundidade (amostra T2-J). Os grãos xenomórficos guardam a impressão dos grãos que os envolveram (provavelmente quartzo); as faces e arestas são arredondadas e características da corrosão química. Os grãos A e B são poligonais; os grãos C, D e E têm formato irregular; o grão F é dendrítico.

c) Zona de *Stockwork* (amostra T2-K)

Apenas dez partículas foram recuperadas na zona de *stockwork* e por isso o tratamento estatístico de cada uma das características ficou prejudicado. A Figura 52 apresenta as características e a Figura 53 alguns exemplos das partículas presentes nesse material. Apenas dois formatos foram observados: o irregular (90%) e o dendrítico (10%). O tamanho das partículas varia de 53 a 172 μm (média de 91 μm). A razão comprimento/largura varia de 1,38 a 3,29 (média 2). Predominam as arestas pouco arredondadas (90%). Vários *pits* foram observados nos grãos.

Pedolito

a) Zona de Transição – base (amostra T2-E)

A Figura 54 apresenta as características e a Figura 55 exemplos das partículas encontradas nesse material. Foram quatro as formas encontradas com predomínio da irregular (74,4%) e em seguida a estelar (15,4%). O tamanho dos grãos varia de 47 a 364 μm (média de 108 μm). Três grãos apresentaram tamanho acima de 300 μm . A razão comprimento/largura varia entre 1,08 e 3,84 (média de 1,52). Predominam arestas pouco arredondadas (87%). Vários *pits* foram observados na superfície dos grãos.

b) Zona de Transição – topo (amostra T2-D)

A Figura 56 apresenta as características e a 57 exemplos das partículas recuperadas nesse material. Quatro foram as formas encontradas, com predomínio da irregular (59,3%); as formas poligonal e estelar foram responsáveis por 11,5% cada. O tamanho varia entre 47 e 149 μm (média de 81 μm); duas partículas apresentaram tamanho superior a 120 μm . A razão comprimento/largura varia entre 1 e 2,75 (média de 1,52). Todas as partículas apresentaram arestas pouco arredondadas e vários *pits*.

c) Couraça Ferruginosa (amostra T2-C)

A Figura 58 apresenta as características e a 59 exemplos das partículas recuperadas nesse material. Quatro formas foram observadas com predomínio da irregular (56,3%); porém, as formas estelar e dendrítica apresentaram crescimento expressivo em relação aos materiais analisados anteriormente (21,1% e 12,7%, respectivamente). Outro aspecto interessante observado foi o tamanho das partículas, que varia de 37 e 541 μm , sendo o maior tamanho médio entre os materiais pesquisados (124 μm). Além de uma partícula se destacar com 541 μm , outras seis têm tamanho entre 217 e 240 μm . A razão comprimento/largura varia entre 1,08 e 3,43 (média de 1,65), com dois grupos podendo ser observados: um variando entre 1,08 e 1,75, e outro variando de 2,00 a 3,43. As arestas pouco arredondadas predominaram (95,8%). Vários *pits* foram observados nos grãos.

Figura 52 – Características das partículas presentes no saprolito – zona de *stockwork*, profundidade de 4 m, amostra T2-K.

Figura 53 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados na zona de *stockwork* a 4 m de profundidade (amostra T2-K). Os grãos xenomórficos guardam a impressão dos grãos que os envolveram (provavelmente quartzo); as faces e arestas estão parcialmente arredondadas caracterizando a corrosão química. Os grãos A e B são poligonais; os grãos C e D são irregulares e os grãos E e F dendríticos.

Figura 54 – Características das partículas presentes no pedolito – base da zona de transição, profundidade de 3,2 m, amostra T2-E.

Figura 55 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados na base da zona de transição (amostra T2-E). Os grãos xenomórficos ainda guardam a impressão dos grãos que os envolveram (provavelmente quartzo); as faces e arestas arredondadas são características da corrosão química, mas há grãos parcialmente preservados da corrosão (provavelmente envolvidos por quartzo). Os grãos A a C têm formato poligonal, poligonal/irregular e poligonal/dendrítico; os grãos D e E são irregulares com diferentes graus de arredondamento; o grão F tem formato dendrítico.

Figura 56 – Características das partículas presentes no pedolito – topo da zona de transição, profundidade de 3 m, amostra T2-D.

Figura 57 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados no topo da zona de transição (amostra T2-D). Os grãos xenomórficos ainda guardam a impressão dos grãos que os envolveram (provavelmente quartzo); as faces e arestas arredondadas são características da corrosão química, mas há grãos parcialmente preservados da corrosão (provavelmente envolvidos por quartzo). Os grãos A e B são poligonais, o grão C mostra um grão poligonal a levemente irregular; os grãos D a F têm formato irregular, os dois últimos com tendência dendrítica.

Figura 58 – Características das partículas presentes no pedolito – couraça, profundidade de 2,7 m, amostra T2-C.

Figura 59 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados na couraça (amostra T2-C). Os grãos xenomórficos ainda guardam a impressão dos grãos que os envolveram (provavelmente quartzo); as faces e arestas arredondadas são características da corrosão química, mas há grãos parcialmente preservados da corrosão (provavelmente envolvidos por quartzo). Os grãos A e B são poligonais, o grão C é dendrítico; os grãos E e F têm formato irregular e estelar, sendo o último formado pela junção de diferentes grãos menores.

d) Latossolo Vermelho (amostra T2-B)

A Figura 60 mostra as características e a Figura 61 exemplos das partículas encontradas nesse material. Três formas foram observadas, com predomínio da irregular (53,3%), mas com considerável participação da poligonal (40,0%). O tamanho dos grãos sofre sensível redução quando comparado ao observado na couraça, variando de 43 a 290 μm (média de 104 μm); uma partícula se destacou apresentando 290 μm . A razão comprimento/largura varia entre 1,14 e 2,4 (média de 1,6). Vários *pits* foram observados na superfície dos grãos, com diâmetro maior em relação aos observados anteriormente.

e) Latossolo Amarelo (amostra T2-A)

A Figura 62 mostra as características e a 63 exemplos das partículas encontradas nesse material. Quatro formas foram descritas, com predomínio da irregular (76,5%); em segundo lugar aparece a estelar com 11,8%. O tamanho das partículas varia de 62 a 178 μm (média de 86 μm), diminuindo em relação ao latossolo vermelho; uma partícula se destaca apresentando 178 μm . A razão comprimento/largura varia entre 1,18 e 2,5 (média de 1,74). Feições corrosivas de maior porte, originadas pela união de dois ou mais *pits* individuais, foram observadas na superfície dos grãos (Figura 63F).

Figura 60 – Características das partículas presentes no pedolito – latossolo vermelho, profundidade de 2 m, amostra T2-B.

Figura 61 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados no latossolo vermelho (amostra T2-B). Os grãos xenomórficos ainda guardam a impressão dos grãos que os envolveram; as faces e arestas arredondadas são características da corrosão química, mas há porção dos grãos parcialmente preservados da corrosão (provavelmente envolvidos por quartzo). Os grãos A e B são poligonais, os grãos C e D são irregulares; os grãos E e F têm formato dendrítico.

Figura 62 – Características das partículas presentes no pedolito – latossolo amarelo, profundidade de 1 m, amostra T2-A.

Figura 63 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) apresentando grãos de ouro recuperados no latossolo amarelo (amostra T2-A). Os grãos xenomórficos ainda guardam a impressão dos grãos que os envolveram; as faces e arestas arredondadas são características da corrosão química, mas há porção dos grãos parcialmente preservados da corrosão (provavelmente envolvidos por quartzo). Os grãos A e B são poligonais levemente irregulares; os grãos C e D são irregulares; e o grão E tem formato estelar. Em F é possível observar feições corrosivas de maior porte originadas pela união de dois ou mais *pits* individuais.

3.1.3. Resumo das observações sobre morfologia e tamanho

A Figura 64 e a Tabela 17 apresentam um resumo das características observadas nas partículas de ouro recuperadas no regolito. A análise do número de grãos presentes em cada amostra (Figura 64A) mostra que há uma grande heterogeneidade na distribuição das partículas no saprolito. Dentro do granófito há “bonanzas” (amostra T2-H) e zonas menos ricas (amostra T2-G); na zona de *stockwork* foi encontrado o menor número de partículas (amostra T2-K). No pedolito, há uma tendência de diminuição no número de partículas em direção ao topo da unidade. Na couraça é observado um aumento no número de grãos em relação ao horizonte inferior, o que provavelmente é devido ao processo de evolução intempérica do perfil (uma grande quantidade de material foi consumida para a formação da couraça). Nos latossolos há uma sensível diminuição no número de partículas recuperadas porém, os teores de ouro obtidos em análises químicas totais desse material mostram uma quantidade maior de Au em relação à couraça (ver item III.4.), o que leva à conclusão de que há uma diminuição muito acentuada no tamanho médio das partículas de modo que muitas delas não puderam ser recuperadas durante o bateamento.

Figura 64 – Resumo das características morfológicas das partículas presentes em T2.

Tabela 17 – Características morfológicas das partículas de ouro recuperadas no regolito.

Material	Amostra	N	Formato (%)				Nítida	Aresta (%)			Contorno (%)		Dimensões médias (microns)			Comp./Larg. (L/W)
			Irregular	Estelar	Dendritico	Poligonal		P. arred.	Arred.	M. arred.	Serrilhado	Poligonal	Comprimento	Largura	Tamanho	
L. Amarelo	T2-A	17	76,47	11,76	5,88	5,88	0	0	35,29	64,71	94,12	5,88	114	65	86	1,74
L. Vermelho	T2-B	15	53,33	0	6,67	40	0	0	13,33	86,67	60	40	136	81	17	1,6
Couraça	T2-C	71	56,34	21,13	12,68	9,86	0	95,78	4,22	0	91,55	8,45	157	100	124	1,65
Z. Trans. (topo)	T2-D	26	69,23	11,54	7,69	11,54	0	100	0	0	88,46	11,54	101	67	82	1,52
Z. trans. (base)	T2-E	39	74,36	15,38	7,69	2,56	0	87,18	12,82	0	97,44	2,56	136	89	108	1,52
Sap. Gran. (4 m)	T2-F	38	73,68	15,79	7,9	2,63	0	89,47	10,53	0	97,37	2,63	145	90	114	1,64
Sap. Gran. (7 m)	T2-G	21	80,95	9,52	4,76	4,76	0	90,48	9,52	0	95,24	4,76	142	80	106	1,61
Sap. Gran. (8 m)	T2-H	1474	72,93	9,36	9,97	6,04	2,98	94,64	2,37	0	92,2	7,8	113	75	91	1,55
Sap. Gran. (10 m)	T2-I	70	70	15,71	8,57	5,71	4,29	94,29	1,43	0	94,29	5,71	111	73	89	1,54
Sap. Bolsão Qz.	T2-J	61	78,69	11,48	9,84	0	0	85,25	14,75	0	100	0	115	74	92	1,61
Sap. Z. Stockw.	T2-K	10	90	0	10	0	0	90	10	0	100	0	126	67	91	2

O tamanho das partículas (Figura 64B), bastante irregular no saprolito e na zona de transição, aumenta na couraça, onde grãos primários individuais passam por um processo de amalgamação (pepitização), sendo cimentados por ouro secundário que reprecipita provavelmente a partir de soluções intempéricas que atacaram e dissolveram parcialmente os grãos primários dos níveis superiores do perfil. A partir da couraça, em direção ao topo do perfil, o tamanho das partículas diminui de forma consistente como reflexo do ataque intempérico.

A razão L/W , que exprime o grau de alongamento das partículas, é aproximadamente constante em todo o perfil, situando-se entre 1,5 e 1,7. Apenas as partículas provenientes da zona de *stockwork* apresentam-se mais alongadas, com a razão L/W em torno de 2,0, o que poderia estar relacionado a um tipo especial de fábrica encontrada nessa zona.

A forma das partículas (Figura 64C) varia no saprolito conforme o material amostrado. No granófiro foram observadas quatro classes de partículas: irregular, estelar, dendrítica e poligonal; na zona de *stockwork* foram encontradas partículas irregulares e dendríticas; e no bolsão de quartzo foram observadas partículas irregulares, estelares e dendríticas. Os quatro formatos foram encontrados nos materiais presentes no pedolito (exceto as partículas estelares no latossolo vermelho), havendo grande variação na proporção entre eles.

O grau de arredondamento apresentado pelas partículas aumenta em direção ao topo do perfil de alteração (Figura 64D). As partículas contendo arestas nítidas estão presentes apenas na base do perfil. Em direção ao topo há uma clara tendência ao aparecimento de feições mais arredondadas, que se acentua ainda mais nos latossolos, refletindo um processo progressivo de lixiviação do ouro da base para o topo do perfil. Ressalta-se que as partículas que ficaram protegidas das soluções intempéricas nos horizontes mais superficiais (por exemplo, encapsuladas em quartzo) apresentam menor grau de corrosão que as partículas expostas desde a base do perfil.

Ainda quanto ao grau de corrosão, não foram observados *pits* nas partículas recuperadas no minério fresco. No saprolito, os *pits* começam a ser vistos, ainda que de dimensões reduzidas (Figura 47F). Essas feições de corrosão tendem a ser mais desenvolvidas rumo ao topo do perfil, pois com a maior exposição às soluções intempéricas, os *pits* aumentam de tamanho, chegando a formar feições relativamente grandes pela junção de dois ou mais *pits* individuais (Figura 63F).

3.2. Composição dos grãos

Para a utilização da microsonda eletrônica na análise de elementos-traço no ouro é preciso cuidado redobrado, pois o número de elementos que podem estar presentes é grande. Boyle (1979) cita mais de quarenta elementos, sendo os principais a prata, o cobre e o ferro. Por esse motivo, como primeira abordagem, foram feitas 10 análises EDS em cada tipo de partícula encontrada (25 KV, 3,9 ηA , $\phi = 5\mu m$). Os espectros obtidos puderam ser classificados em três grupos, onde se observa a ocorrência de duas fases contendo Au e Ag em diferentes quantidades (Figura 65 A e B), e uma fase contendo apenas Au (Figura 65C).

Figura 65 – Espectros obtidos em microanálises EDS

Apesar de não terem sido encontrados, em quantidades apreciáveis, outros elementos além de Au e Ag nas partículas investigadas por EDS, foram escolhidos mais oito elementos para análise à microsonda, em função do tipo de depósito de ouro primário do Garimpo Fazenda Pison (Tabela 19). As condições analíticas da microsonda foram: (1) aceleração de 25 KV e corrente de 2,5 η A; essas condições buscavam um diâmetro de excitação na amostra de 2 a 5 μ m e a excitação de todos os elementos escolhidos (Robinson *et al.* 1998). Os efeitos de matriz foram corrigidos através do sistema ZAF, o tempo de contagem foi de 25 segundos para cada elemento e os resultados apresentam um grau de confiança de 95%. Foi utilizado um conjunto de padrões MASA para a calibração dos valores de pico e *background*.

A observação microscópica, principalmente por MEV, mostrou que existem partículas de ouro homogêneas e zonadas (Figura 66). A composição química foi determinada através de 214 análises por microsonda eletrônica realizadas em 54 grãos. Apenas os resultados com fechamento entre 99 e 101% foram considerados. A Tabela 18 mostra o número de partículas e o número de pontos analisados por tipo de partícula e por horizonte do perfil de alteração.

Tabela 18 – Número de partículas e pontos analisados por horizonte do perfil

Unidade	Partículas		Pontos	
	Zonada	Homogênea	Núcleo	Borda Homogêneo
Latossolo Amarelo	7		11	9
		3		11
Latossolo Vermelho	1		1	2
		4		15
Couraça	8		38	20
		6		21
Zona de Transição	5		19	4
Sap. Z. Stockw.	5		10	7
Sap. Granófiro	9		19	14

Foram analisados os seguintes elementos: Au, Ag, As, Bi, Cu, Fe, Hg, Pt, Sb e Zn. Os limites de detecção e os tempos de contagem estão na Tabela 19. Arsênio, Hg, Pt e Zn apresentaram resultados abaixo do limite de detecção para todas as análises. O antimônio apresentou mais de 50% dos resultados abaixo do limite de detecção, o mesmo aconteceu com 41% das análises para Bi e 38% para Fe. Os resultados abaixo do limite de detecção para Sb, Bi e Fe estão distribuídos por todas as classes de partículas.

Tabela 19 – Limites de detecção e tempo de contagem para análises de grãos de ouro.

	Au	Ag	As	Bi	Cu	Fe	Hg	Pt	Sb	Zn
Limite de detecção em %	0,131	0,033	0,031	0,092	0,018	0,017	0,071	0,067	0,027	0,023
Tempo de contagem em segundos	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

O processo utilizado na preparação das seções polidas eliminou boa parte das partículas pequenas ($< 100 \mu\text{m}$) que, portanto, não puderam ser analisadas. Além disso, muitas das partículas apresentaram alta porosidade interna, o que impediu o fechamento das análises entre os valores de 99 e 101%; nesse caso os resultados foram descartados.

De modo geral, as análises químicas realizadas em grãos individuais durante estudo com microsonda eletrônica confirmaram que Ag é o único elemento, além do ouro, presente como componente principal. A Figura 67 mostra os resultados analíticos para Au, Ag e Cu nas partículas homogêneas e zonadas (borda e núcleo).

Figura 66 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) mostrando exemplos de partículas homogênea e zonada.

Os grãos homogêneos apresentam como característica uma relação Au/Ag relativamente constante, não sendo possível observar diferenças de tonalidade nas imagens MEV obtidas através de elétrons retroespalhados. Apesar disso, as microanálises WDS realizadas revelaram pequenas variações ($< 2\%$ em valores absolutos) dentro de uma mesma partícula.

Os grãos zonados apresentam regiões internas com diferentes razões Au/Ag, identificáveis através do microscópio eletrônico (modo elétrons retroespalhados). As zonas mais ricas em Au (áreas cinza-claro na Figura 68) são geralmente estreitas (da ordem de alguns micrômetros) e tendem a se concentrar na borda das partículas como córtexes (Figura 68A) e lóbulos (Figura 68B), mas também são observadas em descontinuidades (Figuras 68C) e como formas irregulares penetrando os grãos (Figura 68D). Essas zonas são tratadas indiscriminadamente aqui como “bordas”. As zonas ricas em Ag (áreas cinza-escuro na Figura 69) são mais possantes e se concentram na parte central das partículas. Essas zonas são

tratadas como “**núcleos**”. O contato núcleo-borda é, na maior parte das vezes, abrupto; mas também foram observados contatos mais graduais (Figura 69) e, nesses casos, há uma estreita faixa entre a borda e o núcleo da partícula onde a concentração de prata é mais elevada (Figura 69B).

Figura 67 – Diagramas de freqüência para teores de Au, Ag e Cu para a totalidade das 214 partículas. Em preto estão destacados os resultados correspondentes às partículas homogêneas, bordas e núcleos.

Figura 68 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) mostrando partículas de ouro zonadas.

Figura 69 – (A) Imagem MEV (elétrons retroespalhados) mostrando zona de borda rica em Au (cinza-claro) entre duas zonas de núcleo (cinza médio). Na porção centro-direita da imagem há uma faixa rica em Ag (cinza-escuro) entre a zona de borda e de núcleo. (B) Mapa WDS para Ag da mesma região. As zonas mais ricas em Ag aparecem em tons mais claros.

Os diagramas de distribuição normal para Au e Ag elaborados a partir de todos os resultados obtidos mostram que existem três grupos distintos de liga ouro-prata (Figura 70):

1. **baixo ouro**, em azul no diagrama (entre 68,35 e 84,0% Au);
2. **alto ouro**, em vermelho no diagrama (entre 85,52 e 99% Au); e
3. **ouro puro**, em verde no diagrama (> 99% Au).

Figura 70 – Diagramas de distribuição normal para ouro e prata para todos os resultados obtidos.

Com relação às partículas, esses grupos assim se distribuem (Figura 71):

- as partículas homogêneas apresentam principalmente a composição **alto ouro**;
- as bordas das partículas zonadas têm composição **alto ouro e ouro puro**,
- os núcleos das partículas zonadas têm composição **baixo ouro e alto ouro**.

Figura 71 – Diagramas de distribuição normal para Au (N = 214). Em destaque as participações de cada tipo de partícula estudada.

Passaremos agora a apresentar os resultados composicionais das partículas em função de seus horizontes de proveniência.

3.2.1. Minério fresco

Um total de 13 resultados foram obtidos em 2 seções polidas de veios, uma das quais contendo ouro associado à pirita. As partículas recuperadas por bateamento não foram analisadas devido a seu tamanho reduzido. A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos e a Figura 72 os pontos analisados em duas partículas zonadas. Estão associadas à pirita tanto partículas homogêneas quanto zonadas, mas os quatro resultados aproveitados foram obtidos em grãos zonados. Somente foram observadas partículas homogêneas associadas ao quartzo. Porém, o pequeno número de observações não permite concluir que haja uma correlação entre o tipo de associação mineral e a composição do ouro.

O estudo composicional mostrou que a mineralização primária é heterogênea quanto à composição do ouro. Com os quatro resultados em partículas zonadas foi possível observar que (1) a porção rica em prata tem composição próxima a Au = 74% e Ag = 26% e que (2) a porção pobre em prata tem composição próxima a Au = 90% e Ag = 9%.

O pequeno número de análises realizadas impede a separação de classes de amostras conforme a razão Au/Ag. Porém observa-se que as partículas de ouro do minério fresco pertencem aos grupos de baixo ouro e alto ouro, não havendo córtexes de ouro puro.

Tabela 20 – Resultados das microanálises efetuadas em partículas de ouro primário.

	Ponto	Au (%)	Ag (%)	Cu (%)	Fe (%)	Sb (%)	Bi (%)	TOTAL (%)
Ouro em pirita	A	72,85	26,92	0,07	0,056	0,014	0,046	99,96
	B	91,8	7,65	0,053	0,042	0,029	0,119	99,7
	C	75,96	24,16	0,06	0,047	0,014	0,046	100,2
	D	89,19	10,53	0,866	0,031	0,014	0,187	100,8
Ouro no quartzo	E	91,27	8,16	0,08	0,045	0,014	0,352	99,9
	F	91,44	8,15	0,205	0,084	0,014	0,269	100,2
	G	88,29	10,64	0,173	0,1	0,053	0,271	99,5
	H	88,88	10,71	0,731	0,103	0,014	0,046	100,4
	I	82,25	17,05	0,018	0,048	0,088	0,173	99,63
	J	96,3	3,49	0,188	0,158	0,088	0,251	100,5
	K	96,69	3,62	0,171	0,138	0,014	0,211	100,8
	L	85,68	13,63	0,353	0,051	0,014	0,046	99,75
	M	86	13,5	0,207	0,009	0,014	0,358	100,1

Figura 72 – Imagens MEV (elétrons retroespalhados) mostrando partículas de ouro zonadas associadas à pirita (A, B, C e D referem-se aos pontos analisados – Tabela 20)..

Considerando o conjunto de resultados, observa-se que, além de Ag, Cu e Bi estão presentes em quantidades significativas. Para o Sb, mais da metade dos resultados ficaram abaixo do limite de detecção da técnica utilizada (Tabela 20). A Tabela 21 apresenta os coeficientes de correlação entre o Au e os demais elementos analisados. Exceto a óbvia correlação negativa do Au com a Ag, não há outras correlações significativas.

Tabela 21 – Correlação entre Au e demais elementos detectados nas partículas recuperadas no minério primário (N = 13).

Correlação (N = 13)						
	Au	Ag	Cu	Fe	Sb	Bi
Au	1	-0,989	0,17	0,308	0,145	0,435

3.2.2. Regolito

Saprolito

a) Granófiro

Um total de 33 análises foram feitas em partículas recuperadas no granófiro; todas eram zonadas. A Tabela 22 mostra que as bordas são geralmente de ouro puro; algumas bordas são de alto ouro, mas sempre acima de 90% (Figura 74). Os núcleos são geralmente de alto ouro; apenas duas partículas apresentam núcleo de baixo ouro (Figura 75). Mais da metade dos resultados para o Fe ficaram abaixo do limite de detecção; o mesmo ocorreu para a quase totalidade dos resultados para Bi e Sb. Nenhum elemento apresenta correlação significativa com o Au (Tabela 23).

Tabela 22 – Resultados das microanálises efetuadas sobre as partículas provenientes do saprolito de granófiro.

Análise	Ponto	Au (%)	Ag (%)	Cu (%)	Fe (%)	Sb (%)	Bi (%)	TOTAL (%)
ID = T2H15	N	68.35	31,100	0,071	0,008	0,014	0,046	99.55
ID = T2H16	N	75.07	24,700	0,085	0,008	0,014	0,046	99.86
ID = t2h1a	N	92.54	7,622	0,082	0,008	0,014	0,046	100.29
ID = t2h1e	N	94.76	5,279	0,067	0,008	0,014	0,046	100.12
ID = t2h1f	N	92.19	7,341	0,077	0,008	0,014	0,046	99.62
ID = t2h1g	N	92.21	7,661	0,087	0,008	0,030	0,046	99.99
jlsh10c1	N	96,28	4,29	0,071	0,008	0,014	0,046	100,67
jlsh10c2	N	95,68	4,79	0,086	0,008	0,014	0,046	100,56
jlsh10c3	N	96,08	3,84	0,083	0,008	0,014	0,046	100,05
jlsh11c1	N	94,98	4,94	0,040	0,143	0,014	0,046	100,10
jlsh11c2	N	94,7	5,34	0,040	0,023	0,014	0,046	100,13
jlsh12c1	N	93,68	7,05	0,046	0,043	0,014	0,046	100,83
jlsh12c2	N	92,56	7,27	0,067	0,008	0,014	0,046	99,91
jlsh13c1	N	89,59	10,86	0,077	0,008	0,014	0,046	100,54
jlsh13c2	N	90,15	10,58	0,087	0,008	0,030	0,046	100,85
jlsh13c3	N	86,07	13,03	0,152	0,030	0,014	0,046	99,34
jlsh14c1	N	88,03	11,79	0,071	0,008	0,014	0,046	99,92
jlsh14c2	N	88,48	10,55	0,086	0,008	0,014	0,046	99,12
jlsh15c1	N	90,3	9,99	0,083	0,008	0,014	0,046	100,42
t2h1j	B	94.85	5.818	0,041	0,031	0,014	0,046	100.9
jlsh10r1	B	100,26	0,018	0,040	0,139	0,014	0,046	100,46
jlsh10r2	B	100,74	0,018	0,046	0,022	0,014	0,046	100,85
jlsh10r3	B	100,48	0,018	0,068	0,042	0,014	0,046	100,60
jlsh11r1	B	100,45	0,018	0,077	0,008	0,014	0,046	100,55
jlsh11r2	B	100,01	0,82	0,087	0,008	0,014	0,046	100,92
jlsh12r1	B	98,96	1,02	0,153	0,008	0,030	0,046	100,10
jlsh12r2	B	99,53	0,61	0,071	0,029	0,014	0,054	100,38
jlsh13r1	B	99,89	0,16	0,086	0,008	0,014	0,046	100,15
jlsh13r2	B	100,02	0,06	0,083	0,008	0,014	0,046	100,17
jlsh13r3	B	100,04	0,018	0,041	0,008	0,014	0,046	100,19
jlsh14r1	B	98,92	1,3	0,040	0,135	0,014	0,046	100,40
jlsh14r2	B	99,04	0,44	0,046	0,022	0,014	0,046	99,57
jlsh15r1	B	99,85	0,23	0,009	0,041	0,014	0,046	100,18

N = Núcleo

B = Borda

Tabela 23 – Correlação entre Au e demais elementos em resultados obtidos no granófiro.

Correlação (N = 33)						
	Au	Ag	Cu	Fe	Sb	Bi
Au	1	-0,993	-0,329	0,31	-0,131	0,138

b) Zona de *Stockwork*

Um total de 17 análises foram feitas em partículas recuperadas na zona de *stockwork*; todas eram zonadas (Tabela 24). As Figuras 74 e 75 mostram que as bordas pertencem ao grupo alto Au (> 90%) e os núcleos estão geralmente no grupo baixo ouro. Mais da metade dos resultados para Sb ficaram abaixo do limite de detecção. A correlação do Au com os demais elementos é apresentada na Tabela 25.

Tabela 24 – Resultados das microanálises efetuadas sobre as partículas provenientes do saprolito da zona de *stockwork*.

Análise	Ponto	Au (%)	Ag (%)	Cu (%)	Fe (%)	Sb (%)	Bi (%)	TOTAL (%)
ID = T2k1	N	76,340	23,910	0,024	0,008	0,014	0,145	100.4
ID = T2k2	N	82,950	16,700	0,122	0,018	0,014	0,178	99.97
ID = T2k3	N	89,390	11,040	0,021	0,008	0,014	0,108	100.58
ID = T2k4	N	76,260	23,500	0,041	0,008	0,014	0,046	99.83
ID = T2k5	N	87,980	12,000	0,052	0,076	0,014	0,290	100.43
ID = T2k6	N	74,990	24,120	0,009	0,008	0,048	0,207	99.37
ID = T2k7	N	76,780	23,760	0,020	0,022	0,014	0,046	100.58
ID = T2k8	N	76,070	23,970	0,027	0,072	0,014	0,139	100.3
ID = T2k9	N	75,650	23,830	0,032	0,019	0,014	0,046	99.61
ID = t2k10	N	77,470	23,160	0,043	0,018	0,014	0,161	100.86
ID = t2k11	B	93,43	5,71	0,289	0,014	0,002	0,336	99,77
ID = t2k12	B	94,22	5,61	0,287	0,036	0,029	0,072	100,26
ID = t2k13	B	93,94	5,55	0,243	0,008	0,000	0,153	99,9
ID = t2k14	B	93,71	6,00	0,227	0,046	0,002	0,010	99,99
ID = t2k15	B	93,12	5,70	0,236	0,011	0,000	0,083	99,14
ID = t2k16	B	94,92	5,43	0,231	0,007	0,034	0,000	100,6
ID = T2k17	B	92,40	7,52	0,052	0,023	0,001	0,073	100,07

N = Núcleo B = Borda

Tabela 25 – Correlação entre Au e demais elementos em resultados obtidos na zona de *stockwork*.

Correlação (N = 17)						
	Au	Ag	Cu	Fe	Sb	Bi
Au	1	-0,971	0,819	-0,043	0,164	-0,102

Pedolito

Foram estudadas partículas da zona de transição, couraça e latossolos vermelho e amarelo. Na couraça e nos latossolos são observadas partículas homogêneas junto às zonadas. Ainda na couraça é observado um processo de “pepitação”, pelo qual pequenas partículas individuais, de composição distinta, são cimentadas juntas através de finos córtexes de Au puro que envolvem os grãos.

a) Zona de Transição

Um total de 23 resultados (Tabela 26) foram obtidos em partículas recuperadas na zona de transição; todas eram zonadas, mas, na maior parte dos casos, as bordas eram finas ou porosas demais para que pudessem ser analisadas. As Figuras 74 e 75 mostram que as bordas são geralmente de alto ouro e os núcleos de baixo ouro. Mais da metade dos resultados para o Sb ficaram abaixo do limite de detecção. Nenhum elemento apresenta correlação significativa com o Au (Tabela 27).

Tabela 26 – Resultados das microanálises efetuadas sobre as partículas provenientes da zona de transição.

Análise	Ponto	Au (%)	Ag (%)	Cu (%)	Fe (%)	Sb (%)	Bi (%)	TOTAL (%)
ID = JLB32D1A	N	78,60	21,23	0,022	0,008	0,014	0,085	99.95
ID = JLB32D1B	N	79,08	19,90	0,009	0,008	0,014	0,274	99.28
ID = JLB32D1C	N	80,07	20,63	0,025	0,008	0,014	0,056	100.8
ID = JLB32D1D	N	79,15	20,81	0,038	0,036	0,040	0,046	100.1
ID = JLB32D1E	N	80,62	19,24	0,020	0,008	0,014	0,353	100.24
ID = JLB32D1F	N	79,23	20,34	0,009	0,008	0,014	0,108	99.72
ID = JLB32D1G	N	79,15	20,32	0,009	0,019	0,014	0,153	99.66
ID = JLB32D1H	N	79,97	20,74	0,009	0,044	0,014	0,046	100.8
ID = JLB32D1I	N	79,30	20,69	0,009	0,041	0,042	0,106	100.2
ID = JLB32D1J	N	87,72	13,00	0,009	0,008	0,014	0,131	100.9
ID = JLB32D2A	N	79,11	20,76	0,029	0,037	0,014	0,189	100.1
ID = JLB32D2B	N	79,68	20,29	0,084	0,022	0,014	0,293	100.37
ID = JLB32D2B	N	79,70	20,84	0,009	0,002	0,014	0,046	100.5
ID = JLB32D2C	N	79,19	20,46	0,039	0,008	0,014	0,222	99.91
ID = JLB32D2C	N	79,67	20,70	0,009	0,036	0,014	0,209	100.6
ID = JLB32D2D	N	79,02	20,64	0,009	0,053	0,014	0,193	99.91
ID = JLB32D2D	N	79,37	20,45	0,026	0,008	0,014	0,141	100.01
ID = JLB32D2E	N	79,46	20,20	0,047	0,027	0,048	0,121	99.9
ID = JLB32D2F	N	79,30	21,00	0,009	0,008	0,035	0,221	100.58
ID = JLB32D3	B	92,01	8,62	0,021	0,036	0,014	0,176	100.86
ID = JLB32D3A	B	91,48	9,08	0,046	0,050	0,040	0,056	100.75
ID = JLB32D3B	B	92,29	8,36	0,103	0,024	0,014	0,046	100.8
ID = JLB32D3C	B	91,05	8,78	0,038	0,041	0,014	0,098	100.01

N = Núcleo

B = Borda

Tabela 27 – Correlação entre Au e demais elementos nas partículas recuperadas na zona de transição.

Correlação (N = 23)						
	Au	Ag	Cu	Fe	Sb	Bi
Au	1	-0,996	0,411	0,307	-0,029	-0,271

b) Couraça

Um total de 79 resultados foram obtidos em partículas recuperadas na couraça (Tabela 28); há partículas zonadas (72,73% dos resultados) e partículas homogêneas (27,27% dos resultados). As partículas homogêneas apresentaram resultados de alto Au, sendo a maioria com Au acima de 94,8% (Figura 73). As bordas de partículas zonadas apresentaram resultados variando de alto Au (Au > 90%) a Au puro (Figura 74). Os resultados obtidos em núcleos de partículas apresentam duas fases composicionais distintas: uma com baixo Au e outra com alto Au (Au < 90%, Figura 75). Mais da metade dos resultados para o Sb ficaram abaixo do limite de detecção. Nenhum elemento apresenta correlação significativa com o Au (Tabela 29).

Tabela 28 – Resultados das microanálises efetuadas sobre as partículas provenientes da couraça.

Análise	Ponto	Au (%)	Ag (%)	Cu (%)	Fe (%)	Sb (%)	Bi (%)	TOTAL (%)
ID = jsc9c	N	89,420	9,735	0,063	0,008	0,014	0,227	99,46
ID = jsc9d	N	90,600	9,291	0,054	0,041	0,014	0,258	100,20
ID = jsc9e	N	85,520	14,310	0,076	0,008	0,014	0,177	100,10
ID = jsc9f	N	87,070	13,140	0,074	0,004	0,014	0,279	100,60
ID = jsc2a	N	78,180	21,700	0,009	0,041	0,014	0,231	100,20
ID = jsc2b	N	78,660	21,890	0,009	0,008	0,014	0,133	100,70
ID = jsc2c	N	78,720	21,930	0,009	0,008	0,054	0,046	100,70
ID = jsc2h	N	78,840	21,200	0,019	0,018	0,014	0,130	100,20
ID = jsc2i	N	70,150	30,330	0,024	0,008	0,014	0,046	100,50
ID = jsc2o	N	88,920	11,760	0,081	0,008	0,014	0,046	100,90
ID = jsc2r	N	87,360	12,960	0,089	0,008	0,083	0,143	100,60
ID = jsc6c	N	89,880	10,190	0,097	0,034	0,039	0,116	100,40
ID = jsc6d	N	91,910	8,230	0,067	0,008	0,014	0,137	100,30
ID = jsc6e	N	87,380	12,610	0,060	0,057	0,038	0,202	100,40
ID = jsc6f	N	91,980	7,764	0,048	0,021	0,014	0,185	100,00
ID = jsc7a	N	90,350	9,710	0,055	0,050	0,045	0,132	100,30
ID = T2C1	N	89,950	9,890	0,068	0,024	0,027	0,122	100,10
ID = T2C2	N	90,340	10,150	0,044	0,023	0,078	0,182	100,80
ID = T2C3	N	90,270	9,744	0,049	0,016	0,014	0,274	100,40
ID = T2C4	N	90,820	9,777	0,037	0,008	0,014	0,191	100,90
ID = T2C14	N	77,660	23,100	0,034	0,008	0,014	0,046	100,80
ID = T2C15	N	76,880	23,490	0,026	0,008	0,014	0,260	100,70
ID = T2C17	N	77,510	23,350	0,042	0,008	0,014	0,046	101,00
ID = T2C26	N	75,520	23,580	0,009	0,047	0,014	0,096	99,25
ID = T2C28	N	76,590	24,080	0,049	0,023	0,014	0,129	100,90
ID = T2C29	N	78,770	21,610	0,023	0,041	0,014	0,046	100,50
ID = T2C31	N	78,630	21,660	0,054	0,036	0,046	0,046	100,40
ID = T2C33	N	79,590	21,040	0,025	0,008	0,014	0,118	100,80
ID = T2C36	N	78,100	20,740	0,045	0,074	0,014	0,182	99,11
ID = T2C39	N	77,030	23,150	0,062	0,017	0,014	0,172	100,40
ID = T2C40	N	77,560	22,560	0,040	0,020	0,014	0,135	100,30
ID = T2C47	N	80,730	20,110	0,048	0,033	0,014	0,046	100,90
ID = T2C48	N	87,540	12,980	0,051	0,049	0,032	0,176	100,80
ID = T2C49	N	86,960	13,680	0,130	0,024	0,014	0,133	101,00
ID = T2C50	N	88,840	11,600	0,045	0,026	0,014	0,046	100,60
ID = T2C53	N	88,380	12,210	0,071	0,032	0,014	0,046	100,70
ID = T2C54	N	90,460	9,325	0,041	0,008	0,014	0,159	TOTAL
ID = T2C55	N	88,950	11,020	0,050	0,008	0,014	0,046	100,10

Análise	Ponto	Au (%)	Ag (%)	Cu (%)	Fe (%)	Sb (%)	Bi (%)	TOTAL (%)
ID = jsc9a	B	96,30	3,75	0,076	0,008	0,014	0,099	100,30
ID = jsc9b	B	93,58	6,92	0,089	0,021	0,014	0,046	100,60
ID = jsc9g	B	93,52	7,14	0,129	0,026	0,048	0,133	101,00
ID = jsc9h	B	96,50	3,64	0,020	0,008	0,029	0,131	100,30
ID = jsc9hl	B	96,30	3,61	0,093	0,008	0,014	0,462	100,50
ID = jsc2d	B	99,70	0,69	0,037	0,019	0,054	0,177	100,60
ID = jsc2e	B	94,12	5,92	0,087	0,008	0,014	0,313	100,50
ID = jsc2f	B	100,00	0,16	0,025	0,008	0,014	0,046	100,20
ID = jsc2g	B	90,28	10,19	0,046	0,063	0,014	0,046	100,60
ID = jsc2j	B	95,20	4,84	0,024	0,028	0,014	0,046	100,00
ID = jsc2k	B	96,40	3,73	0,024	0,031	0,069	0,103	100,30
ID = jsc2l	B	97,60	2,37	0,036	0,031	0,029	0,404	100,50
ID = jsc2m	B	100,00	0,29	0,034	0,040	0,014	0,304	100,70
ID = jsc2n	B	100,20	0,22	0,046	0,043	0,014	0,200	100,80
ID = jsc2p	B	95,31	5,18	0,210	0,029	0,014	0,046	100,80
ID = jsc2q	B	96,96	3,84	0,033	0,008	0,027	0,093	101,00
ID = jsc6a	B	100,30	0,15	0,065	0,046	0,051	0,113	100,70
ID = jsc6b	B	100,30	0,07	0,034	0,033	0,061	0,206	100,80
ID = T2C51	B	93,97	6,59	0,073	0,018	0,036	0,046	100,70
ID = T2C52	B	91,30	9,17	0,096	0,008	0,014	0,264	100,80
ID = jsc1a	H	95,630	4,183	0,132	0,139	0,062	0,095	100,20
ID = jsc1b	H	96,900	3,315	0,121	0,008	0,014	0,284	100,60
ID = jsc1c	H	97,000	3,259	0,093	0,047	0,014	0,046	100,30
ID = jsc1d	H	96,480	3,215	0,140	0,295	0,014	0,205	100,40
ID = jsc1e	H	97,000	3,293	0,124	0,018	0,038	0,046	100,60
ID = jsc1f	H	96,900	3,263	0,124	0,008	0,014	0,046	100,30
ID = T2C5	H	90,470	9,656	0,078	0,008	0,014	0,046	100,20
ID = T2C6	H	93,110	5,945	0,075	0,886	0,014	0,214	100,20
ID = T2C7	H	95,190	5,548	0,104	0,047	0,014	0,046	101,00
ID = T2C8	H	94,880	5,220	0,078	0,051	0,014	0,151	100,40
ID = T2C9	H	95,520	5,230	0,092	0,045	0,040	0,046	100,90
ID = T2C10	H	96,690	3,820	0,049	0,047	0,014	0,046	100,70
ID = T2C11	H	95,690	4,632	0,152	0,008	0,028	0,046	100,60
ID = T2C12	H	96,130	2,593	0,195	0,035	0,075	0,509	99,54
ID = T2C13	H	97,800	2,690	0,135	0,022	0,014	0,231	100,90
ID = T2C41	H	95,950	4,362	0,065	0,029	0,014	0,200	100,60
ID = T2C42	H	95,680	4,498	0,062	0,041	0,062	0,336	100,70
ID = T2C43	H	95,500	4,494	0,062	0,008	0,014	0,259	100,30
ID = T2C44	H	98,200	2,399	0,116	0,025	0,014	0,046	100,80
ID = T2C45	H	97,650	2,426	0,121	0,037	0,014	0,046	100,20
ID = T2C46	H	97,500	2,431	0,127	0,054	0,014	0,046	100,10

N = Núcleo B = Borda H = Homogêneo

Tabela 29 – Correlação entre Au e demais elementos nas partículas recuperadas na couraça.

Correlação (N = 77)						
	Au	Ag	Cu	Fe	Sb	Bi
Au	1	-0,992	0,357	0,173	0,2	0,082

c) Latossolo Vermelho

Um total de 18 resultados foram obtidos em partículas recuperadas no latossolo vermelho (Tabela 30). Dezesete resultados foram obtidos em partículas homogêneas entre 88,83% Au e 10,80% Ag e entre 92,9% Au e 7,40% Ag (Figura 73). Apenas uma partícula zonada apresentou resultado satisfatório (borda com 92,18% Au e 7,76% Ag, e 98,4% Au e 0,32% Ag; núcleo com 75,25 % Au e 25,10% Ag; Figuras 74 e 75). Mais da metade dos resultados para o Sb ficaram abaixo do limite de detecção. Não há correlações significativas com o Au (Tabela 31).

Tabela 30 – Resultados das microanálises efetuadas sobre as partículas provenientes do latossolo vermelho.

Análise	Particle	Au (%)	Ag (%)	Cu (%)	Fe (%)	Sb (%)	Bi (%)	TOTAL (%)
ID = t2b35	N	75,25	25,1	0,069	0,031	0,014	0,098	100,60
ID = t2b33	B	92,18	7,76	0,046	0,075	0,014	0,046	100,15
ID = t2b34	B	98,4	0,3228	0,088	0,103	0,152	0,194	99,32
ID = t2b18	H	91,99	7,52	0,079	0,008	0,014	0,180	99,79
ID = t2b19	H	92,90	7,4	0,046	0,048	0,014	0,109	100,52
ID = t2b20	H	91,66	7,6	0,085	0,042	0,027	0,524	99,92
ID = t2b21	H	92,07	7,61	0,079	0,039	0,042	0,046	99,91
ID = t2b22	H	90,36	9,74	0,072	0,035	0,080	0,212	100,5
ID = t2b23	H	91,76	8,2	0,028	0,008	0,014	0,230	100,22
ID = t2b24	H	90,07	9,56	0,127	0,069	0,014	0,046	99,83
ID = t2b25	H	90,17	9,24	0,069	0,486	0,014	0,046	99,98
ID = t2b26	H	91,72	8,21	0,050	0,017	0,063	0,136	100,2
ID = t2b27	H	91,10	8,09	0,064	0,039	0,014	0,209	99,49
ID = t2b28	H	90,96	8,53	0,051	0,008	0,014	0,144	99,7
ID = t2b29	H	89,53	9,77	0,087	0,047	0,014	0,046	99,46
ID = t2b30	H	88,83	10,8	0,091	0,057	0,041	0,248	100,06
ID = t2b31	H	91,20	8,78	0,046	0,048	0,014	0,364	100,42
ID = t2b32	H	88,03	11,79	0,099	0,030	0,014	0,097	100,05

N = Núcleo B = Borda H = Homogêneo

Tendo em vista a escassez de boas análises no latossolo vermelho é difícil classificar os resultados obtidos para núcleo e borda de partículas zonadas. Porém, é possível notar que o resultado obtido no núcleo de uma partícula zonada apresenta teor compatível com a fase de baixo Au observada em outras partículas. Os resultados obtidos em zonas de borda são comparáveis aos de alto ouro observados para outras partículas. As partículas homogêneas podem ser classificadas como de alto Au.

Tabela 31 – Correlação entre Au e demais elementos nas partículas recuperadas no latossolo vermelho.

Correlação (N = 18)						
	Au	Ag	Cu	Fe	Sb	Bi
Au	1	-0,94	-0,43	0,085	0,253	0,109

d) Latossolo Amarelo

Um total de 31 resultados foram obtidos em partículas recuperadas no latossolo amarelo (Tabela 32): há partículas homogêneas (35,48% dos resultados) e partículas zonadas (64,52% dos resultados). As partículas homogêneas apresentaram resultados de alto Au (Figura 73). Nas partículas zonadas, os resultados obtidos nas bordas englobam as classes de alto Au e Au puro (Figura 74). Nos núcleos correspondem à classe baixo Au (Figura 75). Mais da metade dos resultados para o Sb ficaram abaixo do limite de detecção. Nenhum elemento apresenta correlação significativa com o Au (Tabela 32).

Tabela 32 – Resultados das microanálises efetuadas sobre as partículas provenientes do latossolo amarelo.

Regolith	Horizon	Particle	Au (%)	Ag (%)	Cu (%)	Fe (%)	Sb (%)	Bi (%)	TOTAL (%)
ID = jlb32a1		N	71,250	28,640	0,066	0,008	0,014	0,169	100,100
ID = jlb32a2		N	73,340	26,870	0,036	0,063	0,014	0,229	100,600
ID = jlb32a3		N	74,360	24,420	0,031	0,097	0,028	0,115	99,050
ID = jlb32a9		N	92,360	7,395	0,099	0,028	0,014	0,138	100,100
ID = jlb32aa1		N	73,940	25,230	0,046	0,024	0,014	0,100	99,340
ID = jlb32aa2		N	74,560	24,680	0,030	0,037	0,014	0,046	99,330
ID = jlb32aa3		N	77,940	21,210	0,051	0,020	0,014	0,255	99,470
ID = jlb32aa4		N	75,060	25,570	0,009	0,008	0,034	0,307	101,000
ID = jlb32aa5		N	85,750	14,090	0,029	0,037	0,014	0,395	100,300
ID = jlb32aa6		N	73,470	26,110	0,051	0,049	0,070	0,176	99,930
ID = jlb32aa7		N	73,960	24,610	0,046	0,008	0,014	0,253	98,880
ID = jlb32aa8		N	74,670	24,490	0,036	0,008	0,014	0,046	99,300
ID = jlb32a3		B	93,700	5,157	0,128	0,333	0,093	0,188	99,650
ID = jlb32a4		B	88,600	12,060	0,060	0,054	0,014	0,124	100,900
ID = jlb32a5		B	100,000	0,348	0,035	0,031	0,014	0,176	100,700
ID = jlb32a6		B	99,700	1,022	0,059	0,044	0,014	0,141	101,000
ID = jlb32a7		B	97,150	2,560	0,055	0,249	0,057	0,439	100,510
ID = jlb32a7		B	97,600	2,510	0,048	0,241	0,014	0,126	100,600
ID = jlb32a8		B	99,000	0,180	0,036	0,533	0,068	0,419	100,100
ID = jlb32a10		B	99,600	0,849	0,009	0,051	0,038	0,224	100,700
ID = jlb32a11		H	88,520	11,950	0,025	0,017	0,014	0,046	100,600
ID = jlb32a12		H	89,000	11,800	0,009	0,008	0,014	0,142	101,000
ID = jlb32a13		H	88,100	12,200	0,053	0,027	0,014	0,155	100,500
ID = jlb32a14		H	87,370	11,830	0,020	0,023	0,014	0,046	99,290
ID = jlb32a15		H	88,250	12,270	0,033	0,028	0,014	0,109	100,700
ID = jlb32aa9		H	82,900	17,340	0,057	0,044	0,014	0,249	100,600
ID = jlb32aa10		H	86,440	13,960	0,065	0,043	0,014	0,283	100,800
ID = jlb32aa11		H	87,460	12,820	0,040	0,008	0,014	0,151	100,500
ID = jlb32aa12		H	86,800	13,070	0,038	0,008	0,014	0,276	100,200
ID = jlb32aa13		H	86,500	14,100	0,025	0,027	0,014	0,277	101,000
ID = jlb32aa14		H	86,640	13,040	0,077	0,022	0,029	0,255	100,000
N = Núcleo			B = Borda			H = Homogêneo			

Tabela 33 – Correlação entre Au e demais elementos nas partículas recuperadas no latossolo amarelo.

Correlação (N = 31)						
	Au	Ag	Cu	Fe	Sb	Bi
Au	1	-0,981	0,021	0,337	0,139	0,02

3.2.3. Resumo dos resultados das microanálises

Partículas homogêneas (Figura 73)

Os resultados obtidos nas partículas homogêneas recuperadas no minério fresco mostram que a mineralização primária apresenta variação considerável na composição das partículas de ouro (Au entre 82,3 e 91,8%). No saprolito e na zona de transição não foram observadas partículas homogêneas. Na couraça todas as partículas homogêneas têm composição alto ouro. Da couraça para o topo do latossolo as partículas homogêneas tornam-se cada vez mais ricas em Ag, mas mantêm a composição alto ouro (exceto por um resultado baixo ouro no latossolo amarelo). Teores de Cu maiores que 0,5% somente são observados nas partículas provenientes do minério fresco; parece haver uma tendência de diminuição dos teores de Cu da couraça para o latossolo amarelo.

Partículas zonadas (Figuras 74 e 75)

Ocorrem partículas zonadas em todos os horizontes do perfil, mas as bordas vão se tornando mais estreitas nos horizontes superiores. Os núcleos podem apresentar tanto composição alto ouro como baixo ouro. As bordas são compostas por ouro de maior pureza e existe sempre uma correlação direta com a pureza do núcleo: quanto mais puro o núcleo, mais pura a borda. Assim, nas partículas zonadas do minério primário e do saprolito da zona de *stockwork* os núcleos são de baixo ouro e as bordas de alto ouro. No saprolito de granófiro os núcleos são de alto ouro e as bordas de ouro puro. Os maiores conteúdos de Cu são encontrados nas bordas das partículas provenientes do saprolito da zona de *stockwork*; os núcleos mais ricos em Cu foram observados no saprolito do granófiro.

Na zona de transição a grande maioria dos resultados apresenta características herdadas da zona de *stockwork*, isto é, núcleos de baixo ouro e bordas de alto ouro. Na couraça, parece haver partículas herdadas tanto do saprolito do granófiro quanto do saprolito da zona de *stockwork*. No latossolo vermelho só foram recuperadas duas partículas zonadas, de modo que não pode haver generalização dos resultados obtidos. No latossolo amarelo predominam as partículas com núcleos de baixo ouro e bordas de alto ouro.

Figura 73 – Diagramas de frequência para Au, Ag e Cu, para os resultados em partículas homogêneas. Em preto estão destacados os resultados correspondentes aos diversos meios amostrados.

Figura 74 – Diagramas de frequência para Au, Ag e Cu, para os resultados em bordas de partículas zonadas. Em preto estão destacados os resultados correspondentes aos diversos meios amostrados.

Figura 75 – Diagramas de frequência para Au, Ag e Cu, para os resultados em núcleos de partículas zonadas. Em preto estão destacados os resultados correspondentes aos diversos meios amostrados.

3.3. Síntese e comparações

No Garimpo Fazenda Pison o ouro está associado a veios de quartzo, ocupando espaços entre grãos e inclusos ou preenchendo fraturas na pirita; encontra-se também disseminado no granófiro, na zona de *stockwork* e nos bolsões de quartzo. O tamanho das partículas varia de alguns micrômetros a centenas de micrômetros. São xenomórficas, geralmente de forma irregular ou poligonal (refletindo a forma dos minerais circundantes), com faces lisas e arestas nítidas. Apresentam grande variação composicional, que se verifica de partícula para partícula e que pode também ocorrer dentro da mesma partícula. A prata é o principal elemento encontrado no ouro, com teores variando de 3 a 27%. Outros elementos podem estar presentes, mas sempre em quantidades muito baixas: Cu até 0,9%, Bi até 0,4%, Fe até 0,2% e Sb até 0,1%. O zoneamento composicional dentro de uma mesma partícula de ouro é um aspecto bastante comum em depósitos primários de ouro, tendo sido descrito, por exemplo, por Desborough *et al.* (1971), Antweiler & Campbell (1977), Morrison *et al.* (1991), Knight *et al.* (1999). A julgar pelas partículas encontradas no saprolito, o ouro do *stockwork* parece um pouco diferente daquele encontrado no granófiro: a forma das partículas é mais alongada, os teores de Ag são mais elevados; os de Cu mais baixos nos núcleos e mais elevados nas bordas das partículas.

Já na base do perfil de alteração, é possível perceber os efeitos do intemperismo sobre o ouro. As arestas das partículas tornam-se menos nítidas e vão aparecendo *pits* ($< 1 \mu\text{m}$) em suas superfícies. Em seção polida pode-se constatar a presença de bordas ou descontinuidades no interior das partículas muito empobrecidas em Ag. Essas regiões atingem uma pureza em Au que pode chegar a 100%, o que nunca foi observado em partículas do minério fresco. A forma de ocorrência e a composição desse ouro indica tratar-se de ouro secundário, depositado nas porções mais periféricas das partículas de ouro primário, ou nas suas descontinuidades, isto é, onde as soluções do intemperismo foram capazes de chegar.

Na couraça, além de partículas residuais de ouro primário, com ou sem bordas de ouro mais puro, são também encontradas partículas resultantes da amalgamação de grãos de ouro primário soldados por ouro secundário, de modo que é nesse horizonte que se encontram as partículas de maior tamanho de todo o perfil. No latossolo vermelho e amarelo essas partículas amalgamadas não foram observadas e o tamanho médio das partículas decresce gradualmente.

Acompanhando a diminuição do tamanho das partículas em direção ao topo do perfil, observa-se que as partículas apresentam faces cada vez mais rugosas, arestas menos nítidas e contorno em geral mais arredondado. Além disso, os *pits* tornam-se mais numerosos e de maior tamanho. Todas essas feições, indicativas de dissolução do ouro pelas soluções do intemperismo, são típicas do comportamento do ouro em perfis lateríticos (Freyssinet & Butt 1988, Colin *et al.* 1989b, Freyssinet *et al.* 1989, Colin & Vieillard 1991, Grant *et al.* 1991, Oliveira & Campos 1991, Santosh & Omana 1991, Edou Minko *et al.* 1992, Freyssinet 1993, Angélica *et al.* 1995, Porto & Hale 1996).

Uma característica especial do ouro no perfil do Garimpo Fazenda Pison é a diminuição da frequência e da espessura de bordas de ouro mais puro nas partículas dos latossolos. Assim, parece que o processo intempérico que ataca a couraça, transformando-a em latossolos, também retoma o ataque às partículas de ouro, destruindo suas bordas de ouro secundário e fragmentando os grãos amalgamados.

Uma feição observada em algumas partículas de ouro no perfil estudado, ainda não descrita na literatura, é a presença de uma zona muito rica em prata entre a partícula de ouro primário (ouro com quantidades de Ag geralmente > 10%) e a borda de ouro secundário muito puro. Essa distribuição da prata, associada ao fato de que as bordas de ouro secundário são tanto mais puras em Au quanto mais puro é o ouro da partícula primária, sugere que algumas das bordas não seriam o simples resultado de precipitação de ouro secundário a partir das soluções de alteração (cementação). Talvez mecanismos de auto-eletrorefinamento tais como os descritos por Groen *et al.* (1990) pudessem dar conta melhor desse fenômeno.

Finalmente, deve-se mencionar o fato de não terem sido observadas partículas homogêneas de ouro puro, de origem supergênica, no perfil de alteração. Isso não exclui sua existência, pois geralmente esses grãos neoformados são muito pequenos e podem ter sido perdidos durante o bateamento. Isso é o que acontece, por exemplo, nos perfis lateríticos do sul do Mali (Freyssinet *et al.* 1989), onde foram descritas partículas de ouro puro com dimensão de menos de 1µm. Não é de se esperar, no entanto, a ocorrência de ouro secundário em cristais euedrais de maior dimensão, típicos de perfis lateríticos modificados por mudança climática em direção à maior aridez (Lawrance & Griffin 1994, Vasconcelos & Kyle 1991).

4. Distribuição do ouro e elementos indicadores no perfil intempérico

A distribuição do ouro e de seus elementos indicadores foi estudada vertical e lateralmente no Garimpo Fazenda Pison. O principal objetivo foi estabelecer quais elementos podem indicar a presença da mineralização em profundidade e quais materiais oferecem a melhor resposta para a exploração geoquímica.

A assinatura geoquímica no minério primário é dada por Au, Ag, Bi, V, As, Sb, W (+ Cu-Pb-Zn), e por isso será dada ênfase a esses elementos, que têm maior potencial como elementos indicadores. Ouro, Ag, e Bi foram observados em quantidades consideráveis e em íntima ligação nas partículas de Au. O antimônio também foi observado em associação com o Au, mas em menor escala. Segundo Boyle (1979), V, As, W, Cu, Pb e Zn podem estar ligados aos sulfetos que acompanham o ouro nos veios mineralizados. No caso estudado, V pode ainda estar ligado à sericita, magnetita e ilmenita; não foram observados minerais de W como, por exemplo, a scheelita e wolframita.

4.1. A trincheira T2

4.1.1. Geoquímica multielementar: Au, Ag, Bi, V, As, Sb, W, Cu, Pb e Zn

A Tabela 34 apresenta um sumário estatístico para o ouro e elementos-traço associados à mineralização no perfil laterítico completo. A Tabela 35 e a Figura 76 ilustram a correlação entre esses elementos. As Figuras 77 a 86 ilustram a distribuição do ouro e dos elementos-traço associados à mineralização no perfil de alteração completo. Na parte superior das figuras os teores estão representados por símbolos referentes a quatro intervalos de concentração. Considerando as amostras em ordem crescente de teores, o primeiro intervalo corresponde à faixa de teor da primeira metade das amostras; o segundo, à faixa de teores das 50-75% amostras; o terceiro, à faixa de teores das 75-95% das amostras; e o quarto, aos teores das 5% de amostras mais ricas.

Tabela 34 – Sumário estatístico para os elementos associados do Au no minério, segundo horizontes presentes em T2.T

	Saprolito (N = 6)				Zona de Transição (N = 10)				Couraça (N = 10)				Latossolo Vermelho (N = 10)				Latossolo Amarelo (N = 10)			
Elemento	Média	Desvio p.	Mínimo	Máximo	Média	Desvio p.	Mínimo	Máximo	Média	Desvio p.	Mínimo	Máximo	Média	Desvio p.	Mínimo	Máximo	Média	Desvio p.	Mínimo	Máximo
Au	141	75	59	253	112	56	15	213	100	104	21	326	154	25	123	215	147	49	103	270
Ag	1,1	1,1	0,2	3,3	0,5	0,2	0,2	0,7	1,1	0,6	0,2	2,3	0,3	0,1	0,2	0,5	0,3	0,1	0,2	0,5
As	6,6	2,7	4,2	10,5	10,4	2,4	5,7	12,9	37,7	16,4	13,3	56,8	8,4	0,8	7,1	10,3	8,4	0,8	7,1	10,3
Bi	7,8	3,9	4,0	13,0	4,3	4,6	1,0	15,0	6,6	5,5	1,0	15,0	3,2	2,4	1,0	7,0	3,2	2,4	1,0	7,0
Cu	73,0	22,4	53,0	111,0	43,5	24,2	20,0	99,0	40,2	60,0	11,0	210,0	30,9	10,0	13,0	45,0	30,9	10,0	13,0	45,0
Pb	42,8	26,5	10,0	82,0	41,7	7,4	27,0	50,0	30,4	11,4	17,0	51,0	34,8	5,0	26,0	42,0	34,8	5,0	26,0	42,0
Sb	1,5	0,6	0,7	2,3	1,4	0,3	0,8	1,8	3,2	1,4	0,7	5,3	1,1	0,2	0,7	1,3	1,1	0,2	0,7	1,3
V	53,8	14,1	35,0	70,0	152,1	53,6	54,0	219,0	1000,5	588,9	128,0	1919,0	79,9	15,5	49,0	103,0	79,9	15,5	49,0	103,0
W	6,5	3,6	1,0	11,0	4,6	4,0	1,0	14,0	2,0	1,1	1,0	3,0	3,6	0,5	3,0	4,0	3,6	0,5	3,0	4,0
Zn	42,3	16,8	18,0	58,0	28,6	12,6	9,0	48,0	11,6	7,1	1,0	19,0	26,8	9,5	9,0	37,0	26,8	9,5	9,0	37,0

Os resultados obtidos mostram um padrão bastante irregular na distribuição dos teores de Au (inclusive dentro de um mesmo tipo de material) e a presença do “efeito pepita” no Garimpo Fazenda Pison. O comportamento do ouro no regolito é único, estando o elemento desvinculado de todos os demais que o acompanhavam no minério primário, como se pode observar nos baixos coeficientes de correlação da Tabela 35 e na Figura 76. Apenas com relação ao Cu, o Au apresenta coeficiente de correlação positivo, embora baixo. De forma geral, nota-se uma diminuição nos teores de Au na couraça (principalmente na base), teores esses que sobem nos latossolos vermelho e amarelo. Porém, o “efeito pepita” dificulta a interpretação dos resultados.

Vanádio, As, Sb, Bi e Ag apresentam entre si coeficientes de correlação positivos (Tabela 35 e Figura 76). De fato, V, As e Sb têm comportamento muito parecido, apresentando na couraça valores mais elevados que nos demais materiais. A prata segue de forma menos evidente o comportamento desses elementos, com picos. O bismuto, apesar de apresentar picos na couraça em quatro dos cinco perfis estudados, apresenta comportamento mais irregular. Todos esses elementos apresentam, porém, teores baixos nos latossolos.

Os metais-base (Cu-Pb-Zn) também estão correlacionados positivamente, embora com coeficientes bastantes baixos (Tabela 35 e Figura 76). Estes elementos apresentam valores elevados na zona de *stockwork* e na zona de transição imediatamente acima dela. Uma diminuição dos teores foi observada na couraça para a maioria dos perfis estudados, sendo mais evidente no caso do Zn. Nos latossolos os teores apresentam ligeiro crescimento em relação à couraça. O tungstênio apresenta comportamento parecido com o do Zn, com diminuição dos teores na couraça e valores no latossolo inferiores aos observados no saprolito.

Como pôde ser observado pelos dados acima comentados, a assinatura geoquímica primária do minério permanece parcialmente na couraça, através dos valores mais elevados de Bi, Sb, V, As e Ag. Nos latossolos, entretanto, essa assinatura desaparece, pois todos esses elementos apresentam queda de teor acentuada. O Cu apresenta um comportamento particular, guardando ainda alguma relação como ouro até os latossolos.

Tabela 35 – Correlação entre o ouro e elementos indicadores na trincheira T2 (N = 46).

	Au	Ag	As	Bi	Cu	Pb	Sb	V	W	Zn
Au	1.00	-0.22	-0.15	-0.07	0.30	-0.03	-0.12	-0.07	-0.05	0.10
Ag	-0.22	1.00	0.48	0.52	0.26	-0.17	0.60	0.53	0.18	0.03
As	-0.15	0.48	1.00	0.23	0.08	-0.14	0.89	0.92	-0.41	-0.50
Bi	-0.07	0.52	0.23	1.00	0.06	-0.26	0.39	0.33	0.16	0.15
Cu	0.30	0.26	0.08	0.06	1.00	0.44	0.18	0.13	0.28	0.31
Pb	-0.03	-0.17	-0.14	-0.26	0.44	1.00	-0.07	-0.20	0.11	0.19
Sb	-0.12	0.60	0.89	0.39	0.18	-0.07	1.00	0.93	-0.21	-0.29
V	-0.07	0.53	0.92	0.33	0.13	-0.20	0.93	1.00	-0.35	-0.50
W	-0.05	0.18	-0.41	0.16	0.28	0.11	-0.21	-0.35	1.00	0.46
Zn	0.10	0.03	-0.50	0.15	0.31	0.19	-0.29	-0.50	0.46	1.00

Figura 76 – Representação gráfica das correlações apresentadas na Tabela 35.

Figura 77 – Distribuição de ouro (ppb) nos perfis da trincheira T2.

Figura 78 – Distribuição de prata (ppm) nos perfis da trincheira T2.

Figura 79 – Distribuição de bismuto (ppm) nos perfis da trincheira T2.

Figura 80 – Distribuição de vanádio (ppm) nos perfis da trincheira T2.

Figura 81 – Distribuição de arsênio (ppm) nos perfis da trincheira T2.

Figura 82 – Distribuição de antimônio (ppm) nos perfis da trincheira T2.

Figura 83 – Distribuição de tungstênio (ppm) nos perfis da trincheira T2.

Figura 84 – Distribuição de cobre (ppm) nos perfis da trincheira T2.

Figura 85 – Distribuição de chumbo (ppm) nos perfis da trincheira T2.

Figura 86 – Distribuição de zinco (ppm) nos perfis da trincheira T2.

4.1.2. Extrações seletivas sequenciais para ouro

A trincheira T2 foi selecionada para estudo devido à presença do perfil laterítico completo. Nesse estudo foram utilizadas amostras totais *in natura* e moídas. Todos os materiais presentes foram estudados (exceto os bolsões de quartzo), tendo sido amostrados, sempre que possível, o topo e a base de cada horizonte exposto. A localização das amostras pode ser vista na Figura 10. A metodologia analítica está descrita em detalhes no capítulo II.

Tabela 36 – Resultado das análises para ouro (em ppb e recalculados em %) para as diferentes soluções e resíduos obtidos durante o processo de extrações sequenciais seletivas.

Amostra	Au Res	Au FCD	Au FH	Au FI	Au CI	Amostra	AuRes%	AuFcd%	AuFh%	AuFi%
AT-14	67	74	1	139	129	AT-14	23,9	26,4	0,2	49,5
AB-14	1530	2350	231	2010	126	AB-14	25,0	38,4	3,8	32,8
BT-14	42	57	1	192	154	BT-14	14,5	19,5	0,2	65,9
BB-14	42	78	1	162	141	BB-14	14,7	27,6	0,2	57,5
CT-14	31	18	1	81	33	CT-14	23,5	14,0	0,4	62,1
CB-14	1	1	1	29	5	CB-14	3,1	3,1	3,1	90,7
D-14	18	24	1	151	169	D-14	9,1	12,6	0,3	78,0
E-14	62	96	1	126	110	E-14	21,7	33,8	0,2	44,3
F-14	34	54	1	52	218	F-14	24,3	38,4	0,4	37,0
AT-15	101	29	1	97	133	AT-15	44,4	12,8	0,2	42,6
AB-15	65	24	1	178	172	AB-15	24,2	8,9	0,2	66,7
BT-15	106	26	5	171	198	BT-15	34,4	8,4	1,7	55,5
BB-15	51	45	11	209	244	BB-15	16,1	14,4	3,4	66,2
CT-15	11	1	1	96	167	CT-15	10,0	0,5	0,5	89,0
CB-15	10	1	5	114	223	CB-15	7,7	0,4	4,2	87,8
DT-15	78	23	8	439	273	DT-15	14,2	4,2	1,4	80,3
DB-15	99	30	8	158	176	DB-15	33,6	10,2	2,7	53,5
F-15	38	24	7	118	258	F-15	20,2	12,8	3,9	63,1
AT-18	11	14	1	124	101	AT-18	7,6	9,1	0,3	82,9
AB-18	109	38	6	124	113	AB-18	39,3	13,8	2,2	44,7
BT-18	21	29	1	140	151	BT-18	11,0	15,2	0,3	73,5
BB-18	43	45	1	136	161	BB-18	19,3	19,8	0,2	60,6
CT-18	9	9	1	93	92	CT-18	8,4	7,9	0,4	83,2
CB-18	1	6	1	48	32	CB-18	0,9	11,6	0,9	86,6
DT-18	15	29	1	140	193	DT-18	8,1	15,5	0,3	76,1
DB-18	11	23	1	124	155	DB-18	6,8	14,3	0,3	78,6
K-18	7	9	1	53	62	K-18	10,1	12,4	0,7	76,7
FFP1-25	369	214	7	69	13	FFP1-25	56,0	32,5	1,0	10,4

CI = Fração *in natura*, extração por iodeto;

FI = Fração moída, extração por iodeto;

FH = Fração moída, extração por hidroxilamina;

FCD = Fração moída, extração por citrato de ditionita;

Res = Fração moída, resíduo.

Os valores percentuais foram calculados com base nas amostras moídas.

A Tabela 36 apresenta os resultados obtidos nas análises para ouro no regolito e no minério primário para as diferentes fases obtidas durante o processo de extração parcial (Au

livre: iodeto de potássio; Au ligado ao Fe amorfo: hidroxilamina; Au ligado ao Fe cristalino: citrato de ditionita; Au residual). Considerando o conjunto de dados, nota-se que há correlação significativa entre Au total e: Au livre (0,9), Au ligado aos óxidos cristalinos de Fe (0,5) e Au residual (0,7). As amostras AB-14 e DT-15 apresentaram valores extremamente elevados para Au em sua fração moída, provavelmente devido ao “efeito pepita”. A Figura 87 mostra os teores totais (em ppb) e as participações do Au (em porcentagem) em cada fase estudada no regolito (amostras moídas).

Figura 87 – Teores totais de Au e participação do Au em cada uma das fases estudadas na trincheira T2.

No minério fresco, a maior parte do Au está associada à fase residual, ou seja, encapsulada no quartzo ou na pirita. Analisando o papel dos óxi/hidróxidos de Fe na distribuição do Au, nota-se que a fase amorfa apresenta valores de 7 ppb e a fase cristalina 214 ppb, indicando que o Au está ligado à goethita e hematita e que a amostra apresenta um certo grau de intemperismo. Au recuperado pelo iodeto na amostra *in natura* foi de apenas 13 ppb, apresentando significativo aumento na amostra moída (69 ppb). Isso indica que as soluções intempéricas têm pouco acesso ao ouro na amostra intacta, reforçando a idéia do encapsulamento por quartzo e pirita.

As amostras coletadas no regolito não apresentam grande coesão. Como consequência, durante os procedimentos de ataque, as amostras *in natura* foram desagregadas permitindo amplo acesso das soluções intempéricas à superfície dos grãos minerais constituintes. Portanto, as diferenças observadas nos resultados obtidos com o iodeto nas amostras *in natura* (CI) e moídas (FI) devem-se provavelmente a diferenças nos conteúdos em Au de cada amostra. A única exceção foram as amostras coletadas na couraça que sempre se mostraram pouco friáveis.

No saprolito, o Au está principalmente livre devido à (1) desagregação da rocha que mesmo guardando as estruturas primárias, apresenta pequenos deslocamentos entre os grãos que promovem a abertura de espaços e permitem o acesso das soluções intempéricas ao Au que antes se encontrava encapsulado; e (2) à oxidação dos sulfetos e liberação do Au que se encontrava incluso, por exemplo, na pirita. O ouro associado aos óxi/hidróxidos de Fe (Figura 88) é mais abundante na fase cristalina que na fase amorfa, que nunca supera os 4%. O ouro presente no resíduo é muito fino e está encapsulado no quartzo.

Figura 88 – Partículas de Au associadas à óxi/hidróxidos de Fe no saprolito.

Na zona de transição, com a total desagregação mecânica e/ou digestão dos minerais formadores da rocha e dos óxi/hidróxidos de Fe, há um aumento na quantidade de ouro disponível ao ataque do iodeto. Diminuem então a proporção do Au residual e do Au associado aos óxidos de Fe.

Na couraça, o processo de dissolução do quartzo contribui ainda mais para a liberação das partículas de Au, de forma que quase todo o ouro foi recuperado pelo iodeto. A quantidade de Au associada aos óxi/hidróxidos de Fe é muito pequena, embora esses sejam a fase dominante nesse material.

Nos latossolos a maior parte do Au ainda se encontra na forma livre e foram encontrados valores de Au associados aos óxi/hidróxidos de Fe superiores àqueles observados na couraça, indicando que parte do Au dissolvido se liga a esses minerais (principalmente à fase cristalina) e reprecipita no perfil. O ouro residual, apesar de apresentar valores irregulares, tende a mostrar um crescimento em relação ao que foi verificado na couraça. Isso provavelmente está ligado à concentração residual de quartzo que foi observada nas unidades de topo do perfil.

4.1.3. Balanço de massa para o ouro

Para quantificar as transferências de massa do ouro durante o processo intempérico, foi calculado o balanço de massa, de acordo com os princípios desenvolvidos por Brimhall & Dietrich (1987) e Brimhall *et al.* (1991), nos mesmos moldes do que foi executado anteriormente, tomando a média do saprolito como referência para o cálculo de perdas e ganhos em todos os horizontes (item 2.6., p. 79). Os resultados foram calculados em função dos teores de Au encontrados no perfil de alteração durante o estudo das extrações seletivas sequenciais ($Au_{total} = Au_{FI} + Au_{FH} + Au_{FCD} + Au_{Res}$). As amostras AB-14 e DT-15 mostram ganhos absolutos de ouro muito elevados, em contraste com as demais dos respectivos horizontes do perfil, o que provavelmente indica “efeito pepita”. Por esse motivo, elas foram desconsideradas no cálculo das perdas médias por horizonte.

Os valores calculados da função de transporte de massa τ , expressos em porcentagem, e suas médias constam da Tabela 37. De maneira geral foi possível constatar que há perda de ouro em todos os horizontes, com exceção do saprolito (E-14), onde parece ter havido ganho absoluto de ouro. Mas o fato de haver apenas uma amostra representando esse horizonte, não permite generalizar essa conclusão.

Há perda crescente de ouro do saprolito para a zona de transição, e perdas ainda mais intensas desta para a couraça. Da couraça para os latossolos as perdas se tornam menos intensas, o que significa que a transformação da couraça nos latossolos ocasiona um acúmulo de ouro.

Tabela 37 – Perdas e ganhos para o ouro (em %) nos diferentes horizontes do regolito.

Horizonte	Amostra	Au total (ppb)	Au-tau	Au-tau médio*
Latossolo Amarelo	AT-14	281	-33,6	
	AB-14	6121	1345,5	
	AT-15	228	-46,2	
	AB-15	267	-36,9	
	AT-18	150	-64,6	
	AB-18	278	-34,4	-43,1
Latossolo Vermelho	BT-14	292	-31,0	
	BB-14	282	-33,4	
	BT-15	308	-27,3	
	BB-15	316	-25,4	
	BT-18	191	-54,9	
	BB-18	224	-47,1	-36,5
Couraça	CT-14	131	-57,7	
	CB-14	32	-89,7	
	CT-15	108	-65,1	
	CB-15	130	-58,0	
	CT-18	111	-64,2	
	CB-18	55	-82,2	-69,5
Zona de Transição	D-14	194	-53,2	
	DT-15	547	31,8	
	DB-15	295	-28,9	
	DT-18	184	-55,7	
	DB-18	158	-61,9	-49,9
Saprolito muito evoluído E-14		284	73,2	
Saprolito	Média	164		

* Foram desconsiderados os resultados obtidos nas amostras AB-14 e DT-15, onde certamente ocorre o “efeito pepita”.

4.2. Amostragem de solo nas Linhas 1, 2 e 3

As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, a vista aérea da área estudada e seu substrato geológico (RTDM 1995). A Figura 12 mostra os materiais encontrados em cada linha e os locais de amostragem em cada furo. A Tabela 38 apresenta os resultados obtidos para o Au e para os elementos indicadores da mineralização nos latossolos vermelho e amarelo. O bismuto foi excluído do estudo pois todos os resultados obtidos estavam abaixo do limite de detecção da técnica utilizada (2 ppm).

4.2.1. Comportamento do ouro e elementos indicadores nos latossolos

As Figuras 89 a 97 apresentam, em mapa, a distribuição de Au, Ag, V, As, Sb, W, Cu, Pb e Zn nos latossolos vermelho e amarelo, através de uma simbologia que representa quatro intervalos, definidos segundo o item 4.1.1.. As Figuras 98 a 103 apresentam a distribuição dos mesmos elementos, em perfil, nas Linhas 1, 2 e 3. De modo geral, constata-se que os teores dos elementos considerados são ligeiramente superiores no latossolo vermelho em relação ao latossolo amarelo. A exceção é o Au, cujo comportamento é mais errático.

As figuras 89 a 103 mostram que o ouro é o único elemento que apresenta um agrupamento de valores razoavelmente elevados (> 18 ppb) imediatamente acima das mineralizações conhecidas (trincheira T1 na Linha 1 e trincheira T2 na Linha 2), tanto no latossolo vermelho quanto no latossolo amarelo. Pode também ser observada uma boa correlação dos teores de Au nos dois tipos de latossolo.

Também foram encontrados valores elevados nos latossolos vermelho e amarelo em locais onde não há mineralização conhecida na Linha 1 (amostra L1-1150-A; a amostra L1-1150-B apresentou teor de 70 ppb Au), na Linha 2 (amostras L2-1650-A e B e L2-1725-A e B) e na Linha 3 (amostras L3-2725-B e L3-3125-B). Visto que em L1 e L2 as anomalias de Au dos latossolos estão situadas exatamente sobre as mineralizações conhecidas, pode-se concluir que é bem possível que haja outras ocorrências de Au sob as anomalias acima assinaladas.

A prata apresenta apenas um valor elevado sobre a mineralização conhecida em T1 para o latossolo vermelho e, no latossolo amarelo, apresenta um valor elevado nas proximidades de T1 (topograficamente mais abaixo) e um valor exatamente acima de T2. Assim como o ouro, a prata mostra um valor elevado na Linha 1, a leste da trincheira T1.

Para melhor compreender o comportamento dos elementos associados ao nos latossolos, e para verificar sua utilidade na exploração geoquímica, foi realizado o estudo dos coeficientes de correlação do ouro com esses elementos em cada tipo de latossolo.

Tabela 38 – Resultados das análises de amostras de solo nas Linhas 1,2 e 3.

Latossolo Vermelho (N = 65)										Latossolo Amarelo (N = 66)									
Amostra	Au	Ag	As	Cu	Pb	Sb	V	W	Zn	Amostra	Au	Ag	As	Cu	Pb	Sb	V	W	Zn
L1-725-B	5	0,2	10,2	13	40	2,4	139	2	34	L1-725-A	5	0,2	5,7	11	26	1,6	70	1	25
L1-800-C	14	0,3	8,9	17	54	2,3	102	5	37	L1-800-A	1	0,3	7,8	9	21	1	134	1	23
L1-825-B	17	0,4	5,3	14	28	0,9	57	4	44	L1-825-A	10	0,3	4,2	10	29	0,9	57	3	35
L1-850-B	16	0,2	3,5	11	27	1,1	51	3	51	L1-850-A	14	0,4	3,6	9	33	0,8	45	2	39
L1-875-C	21	0,2	4,8	13	34	2,5	43	7	108	L1-875-A	27	0,3	3,4	12	21	1	51	4	37
L1-950-B	47	0,5	7,9	14	38	2,3	113	2	19	L1-900-A	39	0,4	3,1	11	24	1,2	37	4	39
L1-975-B	60	0,2	6,2	18	46	2,2	91	2	24	L1-950-A	57	0,2	5,1	13	33	2,5	63	2	24
L1-1000-C	33	0,6	10,1	16	37	0,5	24	1	9	L1-975-A	95	0,5	7,3	14	38	2	76	2	21
L1-1025-B	40	0,2	6,7	9	36	1,1	77	1	18	L1-1000-A	78	0,2	6	15	39	1,3	76	2	15
L1-1050-B	14	0,2	6,1	8	36	0,9	80	2	18	L1-1025-A	44	0,2	6,8	6	37	1	82	2	18
L1-1075-B	5	0,2	6,9	13	41	0,8	110	2	22	L1-1050-A	56	0,2	6,3	5	30	0,9	76	1	16
L1-1100-B	8	0,2	8	14	36	1	117	1	22	L1-1075-A	13	0,2	7,5	6	39	0,9	99	3	18
L1-1125-B	10	0,2	10,2	28	32	0,9	113	2	34	L1-1100-A	8	0,2	6,3	5	25	0,8	84	1	16
L1-1150-B	70	0,5	6,8	16	25	0,7	82	1	24	L1-1125-A	4	0,2	7,8	23	28	0,7	93	2	27
L1-1175-B	1	0,2	7,8	4	34	1	112	2	15	L1-1150-A	17	0,6	10	24	32	0,8	170	1	29
L1-1250-B	3	0,2	7	3	39	0,9	83	2	11	L1-1175-A	3	0,2	6,5	1	33	0,8	47	3	13
L1-1300-B	3	0,2	5,3	2	40	0,9	86	1	11	L1-1250-A	1	0,2	5,6	1	30	0,7	81	1	10
L1-1375-B	2	0,2	6	1	43	0,8	78	1	11	L1-1300-A	1	0,3	5,3	1	40	0,8	80	2	10
L2-1625-B	3	0,2	6,3	6	50	1	86	1	14	L1-1375-A	1	0,2	5,6	1	44	0,8	74	1	9
L2-1650-B	148	0,2	7,7	25	25	0,8	92	2	30	L2-1625-A	1	0,2	5,1	3	29	0,7	79	1	14
L2-1675-B	10	0,2	5,6	4	36	0,7	89	1	15	L2-1650-A	28	0,4	6,8	18	30	0,8	92	3	29
L2-1700-B	1	0,4	5,8	30	32	0,8	100	2	29	L2-1675-A	12	0,2	3,8	2	23	0,7	85	1	14
L2-1725-B	61	0,5	15,4	24	29	1,5	358	2	22	L2-1700-A	1	0,3	4,3	14	27	0,6	66	1	21
L2-1750-B	3	0,2	8	5	35	1	146	1	13	L2-1725-A	42	0,4	7	18	24	0,8	77	1	23
L2-1775-B	4	0,2	7,8	22	27	0,9	97	2	26	L2-1750-A	3	0,2	5,5	2	29	0,9	67	1	13
L2-1800-B	14	0,6	7,7	35	40	1,2	113	1	37	L2-1775-A	28	0,5	7	18	26	0,9	78	2	29
L2-1825-B	8	0,3	5,5	7	47	1	76	4	29	L2-1800-A	7	0,3	5,5	21	29	0,9	74	1	32
L2-1850-B	18	0,2	5,8	16	62	1,8	86	7	61	L2-1825-A	3	0,3	14,2	16	46	1,9	198	5	30
L2-1875-B	14	0,2	5,9	11	80	1,9	62	5	67	L2-1850-A	18	0,5	5,8	8	51	1,3	77	4	43
L2-1950-B	23	0,2	7,9	24	60	2,7	156	4	37	L2-1875-A	14	0,2	4,5	11	74	1,6	73	6	62
L2-1975-B	30	0,2	6,2	10	37	1,1	76	4	15	L2-1950-A	62	0,2	5,4	10	43	1,5	77	2	26
L2-2000-B	106	0,3	7,7	13	40	1,1	97	3	15	L2-1975-A	62	0,2	6,8	6	37	1,1	78	2	16
L2-2025-B	37	0,3	8,5	13	44	1,3	118	2	18	L2-2000-A	47	0,9	5,3	5	29	0,9	67	3	14
L2-2050-B	13	0,2	11,5	10	50	1,6	166	2	22	L2-2025-A	42	0,2	6,3	5	34	0,9	71	4	14
L2-2075-B	17	0,2	10,2	9	61	2,7	64	7	60	L2-2050-A	25	0,2	7,6	5	37	1,1	64	2	14
L2-2100-B	18	0,2	6,3	52	34	5,3	86	5	93	L2-2075-A	24	0,2	9,4	11	49	1,9	90	4	23
L2-2125-B	1	0,3	7,3	6	32	1	132	1	15	L2-2100-A	65	0,2	5,9	13	37	2,1	98	1	34
L2-2150-B	1	0,2	7,8	7	39	0,7	96	1	14	L2-2125-A	6	0,2	6,1	5	30	0,9	86	1	15
L2-2175-B	1	0,2	7	6	33	0,7	134	1	12	L2-2150-A	1	0,2	6,6	3	27	0,7	71	1	12
L2-2250-B	1	0,2	6,2	5	30	0,5	82	1	11	L2-2175-A	1	0,2	4,9	3	29	0,6	76	1	10
L2-2300-B	1	0,2	6,7	6	48	0,7	92	2	13	L2-2250-A	1	0,2	4,3	1	33	1	67	1	9
L2-2375-B	1	0,4	9,6	4	42	0,9	194	4	12	L2-2300-A	1	0,2	6,6	2	39	0,7	78	2	9
L3-2625-B	1	0,2	5	1	26	0,6	52	2	6	L2-2375-A	1	0,2	6,5	2	39	0,6	60	4	11
L3-2700-B	1	0,3	6,5	7	36	0,7	87	2	15	L3-2625-A	1	0,2	3,3	1	21	0,5	51	1	7
L3-2725-B	38	1,1	22,6	27	37	1,8	565	1	37	L3-2700-A	1	0,2	5,2	2	32	0,5	74	2	12
L3-2750-B	18	0,3	5,6	28	68	1,3	91	3	59	L3-2725-A	18	0,6	7,1	25	39	0,9	99	1	31
L3-2775-B	11	1,6	5,8	91	464	4,1	131	6	224	L3-2750-A	9	0,2	5,5	30	44	0,8	77	3	48
L3-2800-B	9	0,2	4,5	13	72	3,3	91	5	119	L3-2775-A	5	0,2	4,3	6	54	1	53	3	38
L3-2825-B	1	0,2	2,5	5	22	1,8	102	5	47	L3-2800-A	4	0,2	3,5	9	38	1	50	2	30
L3-2850-B	3	0,2	3,7	2	28	0,5	62	2	12	L3-2825-A	6	0,2	2,8	5	34	0,9	53	2	28
L3-2875-B	1	0,3	7,2	1	30	0,7	101	2	8	L3-2850-A	7	0,2	4,3	2	31	0,6	59	2	11
L3-2900-B	3	0,2	8,1	1	33	0,8	107	1	8	L3-2875-A	1	0,2	4,3	1	25	0,6	45	2	7
L3-2925-B	1	0,2	3,9	2	38	0,5	60	2	8	L3-2900-A	1	0,2	4	1	31	0,5	44	1	7
L3-2950-B	1	0,3	10,1	2	35	0,8	154	2	9	L3-2925-A	1	0,2	4	1	31	0,4	39	1	8
L3-2975-B	1	0,2	8,3	2	33	0,7	99	2	9	L3-2950-A	1	0,2	5,9	1	34	0,6	62	2	8
L3-3000-B	1	0,2	9,6	7	37	0,9	134	1	10	L3-2975-A	3	0,2	6,9	1	28	0,7	57	1	9
L3-3025-B	1	0,2	8,7	7	35	1	131	2	16	L3-3000-A	3	0,2	6,3	1	27	0,8	58	1	9
L3-3050-B	1	0,2	14,5	8	42	2,5	125	4	19	L3-3025-A	3	0,2	7,8	3	35	1	75	5	12
L3-3075-B	1	0,4	22,9	27	42	3,5	303	5	25	L3-3050-A	1	0,2	9,3	4	38	1,5	72	3	15
L3-3100-B	12	0,2	17,6	22	51	6,4	138	5	35	L3-3075-A	3	0,4	12,1	6	38	2,2	84	4	20
L3-3125-B	46	0,2	17,7	25	37	5,2	167	5	58	L3-3100-A	1	0,4	14,4	7	35	3,2	93	4	23
L3-3150-B	1	0,2	12,5	6	31	4,9	55	7	39	L3-3125-A	13	0,4	14,3	12	37	4	103	5	34
L3-3225-B	3	0,4	11,6	3	34	10,5	62	13	57	L3-3150-A	1	0,2	9,3	4	31	3,6	46	3	24
L3-3300-B	1	0,2	13,3	7	43	2,6	205	6	22	L3-3225-A	1	0,4	9,1	4	34	1,6	84	4	18
L3-3375-B	1	0,2	9,7	3	33	0,9	166	4	11	L3-3300-A	1	0,3	9	5	41	1,7	79	5	16
										L3-3375-A	1	0,2	6,2	1	31	0,8	71	3	10
Média	16,31	0,29	8,37	13,25	45,94	1,72	116,06	2,97	31,45	Média	15,98	0,27	6,42	7,74	33,97	1,14	75,33	2,30	20,70
Desvio p.	26,03	0,22	3,99	13,96	53,86	1,69	77,92	2,21	33,68	Desvio p.	22,06	0,13	2,50	6,94	8,65	0,71	26,02	1,34	11,46

Figura 89 - Distribuição de Au (ppb) em planta nas Linhas 1, 2 e 3.

Figura 90 - Distribuição de Ag (ppm) em planta nas Linhas 1, 2 e 3.

Figura 91 - Distribuição de V (ppm) em planta nas Linhas 1, 2 e 3.

Figura 92 - Distribuição de As (ppm) em planta nas Linhas 1, 2 e 3.

Figura 93- Distribuição de Sb (ppm) em planta nas Linhas 1, 2 e 3.

Figura 94 - Distribuição de W (ppm) em planta nas Linhas 1, 2 e 3.

Figura 95 - Distribuição de Cu (ppm) em planta nas Linhas 1, 2 e 3.

Figura 96 - Distribuição de Pb (ppm) em planta nas Linhas 1, 2 e 3.

Figura 97 - Distribuição de Zn (ppm) em planta nas Linhas 1, 2 e 3.

Figura 98 – Teores de Au, Ag, As e Cu para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 1.

Figura 99 – Teores de Pb, Sb, V, W e Zn para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 1.

Figura 100 – Teores de Au, Ag, As e Cu para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 2.

Figura 101 – Teores de Pb, Sb, V, W e Zn para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 2.

Figura 102 – Teores de Au, Ag, As e Cu para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 3.

Figura 103 – Teores de Pb, Sb, V, W e Zn para os latossolos vermelho e amarelo na Linha 3.

Latossolo vermelho

A Tabela 39 e a Figura 104 apresentam numérica e graficamente os coeficientes de correlação para os nove elementos considerados.

Tabela 39 – Coeficientes de correlação entre o ouro e elementos indicadores no latossolo vermelho (N = 65).

	Au	Ag	As	Cu	Pb	Sb	V	W	Zn
Au	1,000	0,236	0,049	0,585	0,151	0,250	-0,061	0,103	0,442
Ag	0,236	1,000	0,233	0,345	0,303	0,101	0,246	0,032	0,201
As	0,049	0,233	1,000	0,239	0,016	0,404	0,615	0,072	-0,026
Cu	0,585	0,345	0,239	1,000	0,363	0,437	0,228	0,242	0,692
Pb	0,151	0,303	0,016	0,363	1,000	0,377	0,088	0,276	0,485
Sb	0,250	0,101	0,404	0,437	0,377	1,000	0,205	0,637	0,720
V	-0,061	0,246	0,615	0,228	0,088	0,205	1,000	-0,095	-0,006
W	0,103	0,032	0,072	0,242	0,276	0,637	-0,095	1,000	0,583
Zn	0,442	0,201	-0,026	0,692	0,485	0,720	-0,006	0,583	1,000

Figura 104 – Representação gráfica das correlações apresentadas na Tabela 38.

O ouro aparece associado, por ordem de importância, ao Cu, Zn, Sb e Ag, que são os elementos com os quais o ouro apresenta coeficientes de correlação mais elevados. No entanto, a observação dos diagramas que mostram os teores dos elementos tomados dois a dois (Figura 104) indica que as correlações não são significativas.

Esse mesmo aspecto é confirmado pela observação da Figura 105. Essa figura ilustra como as amostras contendo os maiores teores de ouro, e que guardam a posição geográfica da área mineralizada, não coincidem, na maior parte dos casos, com as mais ricas em Cu e demais elementos, mostrando que a assinatura primária do minério fica pouco preservada no latossolo vermelho.

Figura 105 – Diagramas de freqüência destacando as amostras mais ricas em Au e seus respectivos teores nos elementos associados no latossolo vermelho.

Latossolo amarelo

A Tabela 40 e a Figura 106 apresentam numérica e graficamente os coeficientes de correlação entre os nove elementos considerados.

Tabela 40 – Coeficientes de correlação entre o ouro e elementos indicadores no latossolo amarelo (N = 66).

	Au	Ag	As	Cu	Pb	Sb	V	W	Zn
Au	1,000	0,273	-0,024	0,628	0,433	0,298	0,347	0,433	0,529
Ag	0,273	1,000	0,255	0,463	-0,028	0,236	0,174	0,105	0,439
As	-0,024	0,255	1,000	0,252	-0,230	0,562	0,065	-0,154	0,079
Cu	0,628	0,463	0,252	1,000	0,385	0,466	0,467	0,364	0,866
Pb	0,433	-0,028	-0,230	0,385	1,000	-0,025	0,715	0,691	0,429
Sb	0,298	0,236	0,562	0,466	-0,025	1,000	-0,078	0,074	0,509
V	0,347	0,174	0,065	0,467	0,715	-0,078	1,000	0,408	0,325
W	0,433	0,105	-0,154	0,364	0,691	0,074	0,408	1,000	0,477
Zn	0,529	0,439	0,079	0,866	0,429	0,509	0,325	0,477	1,000

Figura 106 – Representação gráfica dos coeficientes de correlação apresentados na Tabela 40.

O ouro apresenta coeficientes de correlação mais elevados com o Cu, Zn, Pb e W. No entanto, a observação dos diagramas que mostram os teores dos elementos tomados dois a dois (Figura 106) indica que as correlações não são muito significativas

Esse mesmo aspecto é confirmado pela observação da Figura 107. Essa figura ilustra como as amostras contendo os maiores teores de ouro, e que guardam a posição geográfica da área mineralizada, não coincidem com as mais ricas nos demais elementos. Isso mostra que, tal como no latossolo vermelho, a assinatura primária do minério é pouco preservada no latossolo amarelo.

Figura 107 – Diagramas destacando as amostras mais ricas em Au e seus respectivos teores nos elementos associados no latossolo amarelo.

4.2.2. Definição de anomalia e de *background* para o ouro

A definição de anomalia e limiar “threshold” é uma das tarefas mais importantes do geoquímico e pode ser executada de várias formas (Robertson 1995). Garret (1991) define o limiar como o limite “externo” da variação do *background* local. Isso porque é comum encontrarmos para alguns elementos anomalias negativas relacionadas à mineralizações (Robertson & Taylor 1987). Grunsky (1991) define limiar como o nível de abundância mínimo de uma anomalia.

No presente trabalho, considera-se anomalia o grupo de amostras onde um ou mais elementos apresentam abundância acima do limiar esperado para a população em estudo (Grunsky 1991). A média mais dois desvios-padrão (Hawkes & Webb 1962); a classificação em percentis; e a estimativa visual de histogramas e diagramas de distribuição normal aliadas ao uso de diagramas de agrupamento serão discutidos abaixo como formas de definição de limiar.

Média e desvio-padrão

A utilização da média e desvio-padrão sugerida por Hawkes & Webb (1962) não se aplica para o caso do Garimpo Fazenda Pison, uma vez que a técnica é indicada para conjuntos de dados com distribuição normal. Os valores obtidos para média e desvio padrão (Tabela 38) para o latossolo vermelho (16 e 26 ppb) e para o latossolo amarelo (16 e 22 ppb) resultariam em valores mínimos de 68 ppb e 60 ppb para as anomalias, respectivamente. Para o latossolo vermelho, não teríamos anomalia sobre a mineralização conhecida na Linha 1 (T1) e apenas uma amostra anômala sobre a mineralização conhecida na linha 2 (T2). Para o latossolo amarelo, teríamos duas amostras anômalas junto a T1 e duas amostras junto a T2.

Classificação em percentis

A técnica utilizada neste capítulo (item 4.2.1) para a representação dos teores de ouro nas amostras de solo coletadas nas Linhas 1, 2 e 3 mostrou-se eficiente na demarcação das mineralizações conhecidas. A organização das amostras em ordem crescente de teores e sua posterior divisão em quatro classes (0-50%, >50-75%, >75-95% e >95-100% das amostras) foi capaz de identificar a mineralização utilizando-se tanto o latossolo vermelho quanto o latossolo amarelo como meio de amostragem (Figuras 89, 98, 100 e 102). Pode-se dizer que teores maiores que 18 ppb Au no latossolo vermelho e maiores que 24 ppb Au no latossolo amarelo (amostras classificadas entre >75-100%) caracterizam bem as regiões anômalas. A zona mineralizada, que no saprolito apresenta largura aproximada de 30 m em planta (Figura 13), gera uma anomalia de 75 m no latossolo vermelho e de 100m no latossolo amarelo. Aparecem ainda duas regiões anômalas na Linha 1: uma topograficamente mais baixa que T1 (provavelmente devido ao transporte de material e de soluções contendo Au em direção a uma região mais baixa) e outra topograficamente acima de T1 e que mereceria ser melhor investigada. Na Linha 2 aparecem pontos anômalos a SW de T2 que também mereceriam ser melhor investigados e, na Linha 3, no latossolo vermelho com maior intensidade que no amarelo, duas anomalias que mereceriam atenção.

Diagramas de frequência, de distribuição normal e de agrupamento

A utilização dos diagramas de distribuição normal, juntamente com a técnica de análise de agrupamento, também apresenta resultados interessantes. As Figuras 108 e 109

mostram a disposição esquemática das amostras nas Linhas 1, 2 e 3, os diagramas de frequência, de distribuição normal e de agrupamento para as amostras no latossolo vermelho e no latossolo amarelo, respectivamente.

Para o latossolo vermelho, ficam agrupadas no alto do diagrama (Figura 108D) todas as amostras com teor menor que 30 ppb, que definem o *background* local para esse meio de amostragem. Assim, a anomalia localizada sobre a mineralização conhecida em T1 (Linha 1) possui largura de 75 m e a anomalia localizada sobre a mineralização conhecida em T2 (Linha 2) possui 50 m de largura. São ainda destacadas as anomalias acima de T1 (Linha 1), a SW de T2 e as duas anomalias na Linha 3.

Figura 108 – Disposição das amostras (A), diagrama de frequência (B), diagrama de distribuição normal (C) e diagrama de agrupamento para o ouro (D) no latossolo vermelho.

Para o latossolo amarelo, ficam agrupadas no alto do diagrama (Figura 109D) as amostras com teor abaixo de 39 ppb, que definem o *background* local para esse meio de amostragem. A anomalia localizada sobre a mineralização conhecida em T1 (Linha 1) apresenta largura de 100 m, aparecendo ainda um ponto anômalo topograficamente abaixo de T1; a mineralização conhecida em T2 (Linha 2) apresenta largura de 75 m e ficam destacados um ponto a SW e outro a NE de T2. As anomalias observadas no latossolo vermelho da Linha 3 não são destacadas no latossolo amarelo.

Figura 109 – Disposição das amostras (A), diagrama de frequência (B), diagrama de distribuição normal (C) e diagrama de agrupamento para o ouro (D) no latossolo amarelo.

4.3. Síntese das observações e consequências para a prospecção

Análises químicas multielementares de materiais coletados na trincheira T2 e nas Linhas 1, 2 e 3, juntamente com análises sequenciais seletivas e cálculos de balanço de massa para o ouro, foram utilizados para se determinar os padrões de distribuição dos elementos-traço associados à mineralização primária no regolito presente no Garimpo Fazenda Pison.

Trincheira T2

O ouro apresenta, no perfil laterítico, um comportamento único, dissociando-se dos demais elementos como já observado por outros autores (por exemplo, Boyle 1979, Butt *et al.* 1998). Não há muitas similaridades entre as situações encontradas na Amazônia brasileira e na Austrália. Enquanto lá, devido à evolução do clima para condições mais áridas, o ouro se concentra nos horizontes ferruginosos e carbonatados, aqui o ouro apresenta comportamento completamente distinto, se aproximando mais do que tem sido observado no Gabão (África) e na Guiana Francesa (América do Sul). A principal feição observada é um abaixamento dos teores na couraça, como observado por Freyssinet *et al.* (1990), Freyssinet (1993) e Freyssinet & Itard (1997). No latossolo, os teores são maiores mostrando um certo ganho em relação à couraça. Porém, são, na média, menores que os encontrados no saprolito, o que indica perda do metal, ao contrário do observado por Freyssinet & Itard (1997) que afirmam que as anomalias de ouro nos latossolos tendem a superestimar o potencial da mineralização oxidada em subsuperfície.

Arsênio, Sb e V têm comportamento muito parecido, com valores mais elevados na couraça, como observado por Lecomte & Zeegers (1992) e valores aproximadamente similares nos demais horizontes. A prata apresenta comportamento relativamente parecido ao desses três elementos, apresentando porém valores claramente mais elevados no saprolito que nos latossolos.

O bismuto apresenta como principal característica teores baixos nos latossolos e grande variação nos demais horizontes, sendo que em quatro dos cinco perfis estudados foram observados valores relativamente elevados na couraça. O tungstênio também apresenta teores mais baixos no latossolo que no saprolito, sendo que na couraça apresenta sempre teores muito baixos.

Os metais-base (Cu-Pb-Zn), apresentam em comum teores elevados na zona de *stockwork* e em algumas amostras na zona de transição. O cobre apresenta valores elevados no granófiro, o que não foi observado para os demais elementos. Todos apresentam teores baixos na couraça (com duas exceções para o Pb e uma para o Cu) e nos latossolos, principalmente no amarelo. Lecomte & Zeegers (1992) já haviam chamado a atenção para a possibilidade de lixiviação de Cu e Zn em horizontes fortemente intemperizados.

Os óxidos de ferro são de grande importância na prospecção devido à sua ampla ocorrência e à sua forte capacidade de reter íons metálicos (Chao & Theobald 1976). Como exemplo disso temos, no caso estudado, a concentração de elementos indicadores na couraça (notadamente As, Sb e V (+Ag +Bi)). Portanto, os nódulos ferruginosos presentes nos latossolos podem servir de meio de amostragem, onde deve-se procurar a assinatura geoquímica acima mencionada. Assim, a análise das amostras de solo em frações granulométricas separadas, fina e grossa, poderia gerar resultados de mais fácil interpretação.

Extrações parciais e seletivas sequenciais estão em uso principalmente na prospecção de depósitos recobertos por espessos mantos de solo e/ou sedimentos (Cohen *et al.* 1998, Hall, 1998, Mann *et al.* 1998, Smee 1998, Xueqiu 1998, Yeager *et al.* 1998, Gray *et al.* 1999, Gray 1996, 1999a,b). No presente trabalho a técnica de extrações seletivas sequenciais teve enfoque diferente e buscou identificar a quais fases minerais o ouro encontra-se ligado nos diferentes materiais que compõem o regolito no Garimpo Fazenda Pison. Trabalho no mesmo sentido foi realizado por Gray & Lintern (1998) para Au e por Fonseca & Silva (1998) para Pb e Zn. O presente estudo mostrou que, de forma geral, a maior parte do metal se encontra livre. Em segundo lugar aparecem o ouro ligado a óxi/hidróxidos de ferro cristalinos e ouro residual, que se alternam de posição conforme o perfil e o material estudado. O ouro associado aos óxi/hidróxidos de ferro amorfos tem participação muito reduzida no perfil.

Embora não tenha visado à prospecção, o uso da técnica de extrações seletivas sequenciais fornece informações que podem ser aplicadas à pesquisa mineral de ouro em ambientes lateríticos. Por exemplo, pelo fato de que a maior parte do ouro encontra-se na forma livre e que há correlação bastante elevada entre Au total e Au livre, poderiam ser utilizadas técnicas de ataque das amostras menos agressivas e menos caras que água-régia.

O balanço de massa para o ouro mostrou que há perda de ouro em todos os horizontes do perfil completo, sendo que na couraça foi encontrada perda mais significativa. Couraças pobres em ouro foram descritas por Freyssinet *et al.* (1990) e por Freyssinet & Itard (1997), sendo que esses últimos autores notaram que a transformação da couraça em latossolo proporcionou um ganho de Au, o que está de acordo com os resultados obtidos neste trabalho. Freyssinet (1994) também notou acumulação absoluta de Au nos latossolos instalados em perfis truncados na Guiana Francesa.

Linhas 1, 2 e 3 – latossolos

O ouro é o único elemento que apresenta anomalia geograficamente coincidente com a mineralização primária conhecida. De modo geral os dados indicam que, em escala local, o Au é o melhor indicador para mineralizações de ouro, apesar de sua mobilidade durante o intemperismo, conforme já observado em outros terrenos lateríticos (Butt & Zeegers 1992, Butt *et al.* 1998). Na verdade, o fato de o ouro apresentar tal mobilidade auxilia os trabalhos de prospecção, pois alarga as anomalias. Porém, as zonas de maior concentração de ouro podem estar deslocadas em relação à zona mineralizadas em subsuperfície (Hoffman & Thomson 1986), principalmente em determinadas situações topográficas, e a localização de poços, trincheiras e sondagens pode ser executada de maneira incorreta. Para se contornar esse problema pode-se utilizar os modelos tridimensionais de dispersão e a amostragem do topo do saprolito.

O presente estudo encontrou resultados semelhantes aos observados por Lecomte e Colin (1989) em perfis tipo *stoneline* no tocante à ampliação dos halos de dispersão do ouro no latossolo amarelo. Freyssinet (1994), por outro lado, encontrou halos limitados em perfis lateríticos truncados na Guiana Francesa. Pode-se deduzir então que a presença da couraça tem papel importante na mobilidade do ouro (Freyssinet 1993) e na ampliação dos halos de dispersão, e que o mapeamento do regolito e a compreensão de seus processos evolutivos ajudam em muito nos trabalhos prospectivos, uma vez que a resposta geoquímica do solo depende da história intempérica a que a região em estudo foi submetida.

Na área estudada a zona primária mineralizada, que possui largura da ordem de 30 metros, apresenta anomalias da ordem de 75 a 100 metros nos latossolos. A topografia exerce influência marcante nas anomalias observadas, sendo claro o maior desenvolvimento do halo de dispersão em direção às regiões mais baixas. Porém, a anomalia também se desenvolve em direção às cotas mais altas em relação à zona mineralizada, o que define o padrão “em cogumelo” já reportado por outros autores em terrenos lateríticos (Lecomte 1988, Glasson *et al.* 1988, Lecomte & Colin 1989, Colin *et al.* 1989a,b, Freyssinet *et al.* 1990, Costa 1993, Zang & Fyfe 1993, Freyssinet & Itard 1997). Tanto no latossolo vermelho quanto no amarelo os teores de Au diminuem conforme se aumenta a distância do ponto de amostragem em relação à zona mineralizada. Colin & Lecomte (1988), Colin *et al.* (1989a,b), Lecomte & Colin (1989) e Colin & Vieillard (1991) sugerem que a dissolução progressiva das partículas de ouro nos perfis intempéricos é um fator na formação dos halos de dispersão. Outro processo que pode ter importância na dispersão superficial do ouro é o de reciclagem do Au através da vegetação; exemplos desse mecanismo são dados por Andrade *et al.* (1991) em Carajás e por Gray & Lintern (1998) na Austrália. Benedetti *et al.* (1990), estudando a área do Salobo (Pará), concluem que a mobilidade do ouro é principalmente controlada por AuOH^0 , com pouca contribuição de AuCl_2 . Complexos orgânicos também foram aventados para explicar a mobilidade do ouro nessa área, ainda que localmente. No caso estudado, em face da inexistência de uma etapa da evolução intempérica sob clima árido, os complexos clorados não devem ter tido papel relevante na mobilização do ouro. A especiação deve ter se dado através dos complexos aquosos e orgânicos, a exemplo do que parece ter ocorrido no Salobo.

Em vista do complexo comportamento do ouro nos perfis lateríticos, é recomendável que a amostragem seja realizada sempre com o mesmo tipo de material, independentemente da profundidade em que ele se encontra. Esse aspecto já foi ressaltado por outros autores (Thomson 1986, Butt & Zeegers 1992, Butt *et al.* 1998).

Os elementos indicadores associados ao minério primário apresentam mobilidade maior que o ouro, mas apresentam baixo índice de correlação com ele, não sendo confiáveis para a localização exata da mineralização em profundidade. Porém, essa característica pode ser útil na prospecção, principalmente em escala de semi-detalle, uma vez que eles tendem a migrar para mais longe da zona mineralizada que o Au, gerando halos de dispersão maiores.

Definição das anomalias

A técnica estatística mais eficiente para a definição de áreas anômalas no Garimpo Fazenda Pison foi a da classificação por percentis. Porém, é recomendável sua utilização em conjunto com os diagramas de frequência, de distribuição normal e de agrupamento pois, como alerta Grunsky (1991), é normal a sobreposição de amostras pertencentes ao *background* e ao conjunto de amostras anômalas, de forma que o limiar passa a ser um conjunto de valores onde duas distribuições se confundem.

No latossolo, valores maiores que 39 ppb Au podem ser considerados anômalos em trabalhos de detalhe em terrenos similares ao encontrado no Garimpo Fazenda Pison. Os teores de Au encontrados na área mineralizada geralmente são menores que 100 ppb.

Tanto o latossolo vermelho quanto o amarelo podem ser utilizados como meio de amostragem. Apesar dos contrastes no latossolo amarelo serem menores, ele delimita bastante

bem a área mineralizada, e ainda apresenta como vantagens halos de dispersão mais amplos, além de ser o horizonte mais superficial e de mais fácil acesso.

Após a definição das áreas anômalas, as atividades de detalhamento poderão envolver (Hoffman & Thomson 1986):

- 1) amostragem complementar, envolvendo outros tipos de material, tais como húmus ou rocha;
- 2) análises complementares, por exemplo, o estudo por frações granulométricas; e
- 3) abertura de trincheiras, poços e furos sondagens.

Deve-se buscar sempre uma conexão entre as feições geológicas e os resultados geoquímicos, pois é necessário identificar os controles presentes na mineralização para o aperfeiçoamento do modelo prospectivo. A prospecção não pode ser considerada completa se a origem de uma anomalia não estiver completamente explicada e, neste ponto, a utilização de métodos geofísicos pode ser uma ferramenta interessante na identificação e posicionamento espacial da área fonte.

O modelo prospectivo

Não são muitas as propostas de modelos de prospecção para a região amazônica. Butt & Zeegers (1992) editaram um volume sobre prospecção geoquímica em regolitos situados em terrenos tropicais e subtropicais porém, são apenas três os casos estudados para o ouro na Amazônia e estes localizam-se na Guiana Francesa (Lecomte & Zeegers 1992). Trata-se dos depósitos de:

- (1) Espérance e Saint-Pierre, com pouca alteração recente (precipitação aproximada de 1600 mm, zona de transição entre savana e *rainforest*) e perfil parcialmente truncado. Os perfis apresentados por estes depósitos apresenta, da base para o topo: (a) saprolito, (b) horizonte de transição, (c) horizonte silte-argiloso de cor marrom avermelhada e (d) horizonte arenoso húmico. Os teores de ouro diminuem para o topo do perfil (até 50% dos teores encontrados no saprolito), podendo ou não haver deslocamento das anomalias na direção das regiões topograficamente mais baixas, e foi constatada alguma remobilização do Au na transformação da rocha-mãe em saprolito. Também foi constatado que a assinatura geoquímica da mineralização persiste por todo o perfil; e
- (2) Dorlin, com alteração recente moderada (precipitação podendo chegar a mais de 3000 mm) e perfil parcialmente truncado, localmente apresentando restos de couraça. O perfil apresenta, da base para o topo: (a) saprolito, (b) argila arenosa avermelhada contendo pequenos nódulos ferruginosos e (c) solo areno-argiloso avermelhado com algumas estruturas poliédricas. A mineralização é marcada por anomalias abruptas e contrastadas de Au, onde os teores caem da base para o topo do perfil (Taylor *et al.* 1989).

Os dois exemplos acima tratam de situações onde os perfis intempéricos foram truncados durante a sua evolução (Modelo Tipo B), fato não observado no Garimpo Fazenda Pison. No presente estudo foi observado que a couraça, na maior parte dos casos, foi

totalmente degradada pelo intemperismo químico, restando apenas nódulos e pisólitos ferruginosos imersos em matriz areno-argilosa.

Lecomte & Zeegers (1992) propõem, para áreas com intensa alteração recente (com temperaturas próximas a 25° C e precipitação > 2000 mm) e onde os perfis estão bastante preservados (Modelo Tipo A), a instalação de perfis lateríticos de linhas de pedra (*lateritic stone-line profiles*). O perfil idealizado apresenta, da base para o topo, os seguintes horizontes: (a) saprolito, (b) linha de pedra ferruginosa (*lateritic stone-line*) e (c) solo areno-argiloso (normalmente com matéria orgânica no topo). Infelizmente não são citados exemplos de jazimentos auríferos desse tipo localizados na Amazônia. Os casos apresentados são africanos:

- (1) Mavikou (Cu-Au), Gabão, com altas concentrações de V, Cr, Cu, Mo, Ag, Cd, As e W na fração grossa do solo. Anomalias de Au e Cu foram encontradas em cada horizonte sobre a mineralização. No horizonte superior, a anomalia de Au da fração fina apresenta maior contraste que nos horizontes inferiores;
- (2) Mégaba (Au), Gabão, onde as anomalias de Au no solo apresentam menor contraste que as encontradas no saprolito. Níquel, Zn e Cr marcam bem a mineralização no saprolito, mas a resposta desses elementos desaparece no solo, tornando difícil sua localização.
- (3) Dondo Mobi (Au), Gabão, onde a mineralização primária está claramente refletida no solo. No saprolito não há evidência de ampliação notável do halo de dispersão a partir da zona mineralizada, enquanto nos horizontes superiores o halo é significativamente ampliado, gerando o padrão de dispersão em cogumelo.
- (4) Ity (Au), Costa do Marfim, onde também foi observada a dispersão tipo cogumelo.

Costa (1993) trata da distribuição do ouro em perfis lateríticos da Amazônia, que segundo o mesmo autor (Costa 1991) podem ser classificados em dois grupos:

- (1) Lateritos maduros (Igarapé Bahia) – mais antigos (Terciário Inferior), mais complexos, localizados em platôs, onde existem crostas ferruginosas sobrepostas a um horizonte bauxítico ou de fosfatos aluminosos. Altos teores de Au foram encontrados nas zonas ferruginosas; e
- (2) Lateritos imaturos (Morro da Mina) – mais jovens (Quaternário), menos evoluídos, localizados em áreas de relevo ondulado mais baixo, com horizonte contendo concreções ferruginosas e solo (ou aluvião/colúvio) no topo do perfil, e horizonte argiloso logo abaixo do ferruginoso. Teores mais altos de Au foram encontrados nas zonas contendo concreções ferruginosas.

Para o autor, os perfis descritos acima são similares aos perfis descritos no Gabão, Mali e Filipinas.

Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os modelos propostos acima, nota-se que nenhum deles explica totalmente o que foi observado no Garimpo Fazenda Pison. Lecomte & Zeegers (1992) e Costa (1991) colocam horizontes encouraçados em zonas

de platô, o que não foi observado no Garimpo Fazenda Pison e nem em dezenas de outros garimpos visitados pelo presente autor na província Tapajós. A couraça observada possui dimensões modestas, ocorrência restrita e aparecendo em zona de meia encosta, seguindo a topografia atual. Nas zonas de topo sondadas a trado manual o que se observou foi o latossolo vermelho sobreposto diretamente sobre o saprolito, havendo uma zona de transição pouco espessa entre eles; nódulos ferruginosos foram encontrados no latossolo indicando a presença de couraça no passado. Costa (1991) descreve um horizonte argiloso entre o saprolito e o horizonte ferruginoso, o que também não foi observado no presente estudo. As características da dispersão geoquímica encontradas no Garimpo Fazenda Pison são similares àquelas propostas por Lecomte & Zeegers (1992), com concentração de, por exemplo, As e V na couraça, e dimensão do halo anômalo aumentando da base para o topo do perfil (cogumelo).

Portanto, o Garimpo Fazenda Pison ocupa uma posição intermediária entre as zonas de alteração moderada e intensa de Lecomte & Zeegers (1992), em terreno de relevo baixo a moderado, úmido tropical (*rainforest*), **modelo Tipo A2-A3**.

IV. CONCLUSÕES

A mineralização aurífera encontrada no Garimpo Fazenda Pison está hospedada em uma seqüência de rochas vulcânicas ácidas intrudida por granófiros, todos de idade paleoproterozóica. O ouro ocorre em depósitos aluviais já trabalhados por garimpeiros e em depósito filoneano que atualmente é lavrado em sua porção oxidada. O minério primário é constituído por um feixe de veios subverticais de direção N20E, com aproximadamente 30 metros de largura, 100 metros de comprimento e profundidade desconhecida; localmente ocorrem bolsões com estrutura *stockwork*. Falhas com direção NEE e movimentação sinistral deslocam os veios. A faixa de alteração hidrotermal pode ser subdividida em três zonas: (1) central – rica em Au mais quartzo, mica branca, epidoto, sulfetos (pirita, calcopirita e arsenopirita), hematita e magnetita; (2) zona intermediária – com pouco Au mais quartzo, mica branca, epidoto, fluorita e magnetita; e (3) zona distal – pobre em Au mais quartzo, mica branca, clorita e magnetita. A assinatura geoquímica do minério é dada por Au, Ag, Bi, V, As, Sb, W, Cu, Pb, Zn. As características encontradas permitem classificar a mineralização primária como *Sistema Aurífero Relacionado a Intrusões* (Sillitoe 1996, Santos *et al.* 2001).

A presença do feixe de veios de quartzo ao lado de uma zona de *stockwork* formada principalmente por vênulas feldspáticas indica a ocorrência de mais de um pulso hidrotermal na área. A diferença na composição das partículas de ouro encontradas em cada uma dessas unidades também reforça esta hipótese

O estilo da mineralização primária afeta a mobilidade supergênica do Au: (1) influenciando o acesso de soluções intempéricas ao ouro primário, pela presença de fraturas e outras descontinuidades; (2) determinando o estado do ouro primário que pode estar livre, associado a sulfetos ou encapsulado no quartzo; e (3) controlando a química das soluções intempéricas, através da dissolução dos minerais primários.

O estudo do regolito revelou que este deriva de uma evolução policíclica *in situ*. No local foram caracterizados dois tipos de perfil intempérico: (1) perfil completo que ocorre localizadamente (trincheira T2) constando de saprolito na base, zona de transição, couraça, latossolo vermelho e latossolo amarelo; e (2) perfil incompleto, de ampla ocorrência (trincheira T1 e Linhas 1, 2 e 3), e composto por saprolito, zona de transição, latossolo vermelho e latossolo amarelo. Mineralogicamente, o saprolito é composto por quartzo, mica branca e caolinita; a zona de transição por quartzo, caolinita, goethita, hematita e mica branca; a couraça por hematita, goethita, caolinita e quartzo; o latossolo vermelho por quartzo, caolinita, goethita e hematita; e o latossolo amarelo por quartzo, caolinita, goethita (e hematita). Quanto à composição química, o saprolito é a unidade mais rica em sílica e em elementos considerados móveis no ambiente supergênico (Mn, Mg, Na, Ca, K, Ba, Cu, Rb e Zn); a couraça é mais rica em óxidos de ferro, em alguns elementos pouco solúveis (Cr, Ga, S) e em alguns elementos indicadores da mineralização (V, As, Sb, Bi e Ag); os latossolos são

mais ricos em óxidos de alumínio e em elementos pouco solúveis (Ti, P, Sr, Zr, Ce, La, Nb e Y).

Puderam ser observadas as várias etapas de um processo intempérico complexo, caracterizado pela formação da couraça ferruginosa, e pela sua degradação e formação de latossolos. O processo de encouraçamento se deu pelo consumo do saprolito num clima de estações contrastadas. Nesse processo, a zona mineralizada foi atacada pelas soluções intempéricas, o que ocasionou a transformação da mineralogia primária, destacando-se a oxidação dos sulfetos (com liberação dos metais associados, inclusive o Au, e a provável formação de tiosulfetos, importantes na mobilização do Au); e a desagregação mecânica da rocha-mãe e a liberação do ouro que ocupava espaços entre grãos nos veios de quartzo e na rocha encaixante, com exposição dos grãos de Au à ação de agentes intempéricos. A partir do saprolito observam-se feições de corrosão nas partículas de Au (*pits* e arredondamento das arestas). A formação da couraça caracterizou-se ainda pela dissolução parcial do quartzo, o que resultou na liberação de eventuais grãos de Au nele encapsulados. Junto com a acumulação de ferro houve concentração V, As, Sb, Bi e Ag, metais que acompanhavam o Au no minério primário; todos os demais elementos foram lixiviados em maior ou menor grau, inclusive o Au. Assim, a assinatura geoquímica do minério primário foi parcialmente modificada. O ouro foi remobilizado durante o processo de formação da couraça, sendo que parte dele deve ter migrado para zonas mais baixas do perfil, reprecipitando junto às partículas de Au primárias gerando as partículas zonadas; e parte reprecipitou junto aos grãos de ouro na própria couraça, aglutinando partículas individuais num processo de pepitização.

Quando expostas a um clima cada vez mais úmido e a uma cobertura vegetal progressivamente mais densa, as couraças degradaram-se e deram lugar a blocos decimétricos, centimétricos, solo concrecionar e finalmente latossolos. A degradação se fez pela dissolução preferencial do Fe e elementos associados, e hidratação da hematita em goethita, e também por processos mecânicos como o transporte de massa em direção às zonas topograficamente mais baixas. Ambos os processos foram responsáveis pela ampliação dos halos de dispersão do ouro, pois as partículas de Au presentes na couraça foram parcialmente dissolvidas e fragmentadas, sendo parte do ouro mobilizado através de soluções e parte através dos movimentos de massa por gravidade.

Os latossolos formaram-se principalmente pelo acúmulo de caolinita e de quartzo, que permaneceram no perfil durante o processo de deferruginização da couraça. A matriz areno-argilosa contém ainda grânulos de Fe (pedorrelictos), vestígios da antiga couraça, tendo herdado também as partículas de Au que sobreviveram à dissolução da couraça.

Entre os meios disponíveis no regolito para prospecção geoquímica de ouro, os latossolos vermelho e amarelo devem ser preferencialmente utilizados. Isso se deve à sua ampla distribuição em área, proporcionando um meio constante de amostragem, e à presença de valores anômalos de Au exatamente sobre as mineralizações primárias conhecidas. O latossolo amarelo apresenta como vantagens halos de dispersão maiores e localização mais superficial

Nos latossolos o ouro não apresenta coeficientes de correlação muito significativos com os demais elementos indicadores da mineralização. Porém, a utilização de análises geoquímicas multielementares deve ser incentivada pois (1) os elementos indicadores podem ser utilizados na confirmação da mineralização em subsuperfície e na sua caracterização, (2) a

dispersão desses elementos é maior que a do ouro, permitindo a detecção de áreas potenciais em malhas de amostragens mais espaçadas, e (3) pode levar à descoberta de depósitos de outros bens minerais.

Os cálculos de balanço de massa mostraram que há perda de volume da ordem de 50% durante a transformação do saprolito em pedolito, implicando numa compactação significativa do material a partir da zona de transição. A destruição das estruturas primárias a partir deste horizonte, constatada macro e microscopicamente, confirma essa observação.

Para o Au, os cálculos de balanço de massa mostram que, tomando-se como base o saprolito, perdas aconteceram em todos os horizontes do pedolito, o que vai ao encontro dos resultados obtidos no estudo morfológico das partículas de Au os quais mostram que o ouro foi quimicamente atacado em todos os horizontes. Durante o processo de formação da couraça ocorreu a perda de Au mais intensa. Porém parte do Au que entrou em solução foi reprecipitado no próprio horizonte, amalgamando partículas individuais e gerando o efeito de pepitização, e parte do ouro migrou para a base do perfil, reprecipitando junto às partículas primárias gerando bordas de ouro puro. Na transformação da couraça em latossolo vermelho, a mobilidade do Au foi mais baixa, o que gerou um acúmulo relativo do metal; mas a dissolução do Au ainda foi evidente, pois notou-se uma diminuição significativa no tamanho das partículas, aumento no seu grau de arredondamento e diminuição nas bordas das partículas zonadas. Outro fenômeno observado nos latossolos foi o aparecimento de partículas homogêneas cada vez mais ricas em Ag em direção ao topo do perfil. A transformação do latossolo vermelho em amarelo é marcada por um aumento na mobilidade do Au e conseqüente perda do metal em relação ao latossolo vermelho; as partículas de Au mostraram-se mais arredondadas e corroídas que no horizonte subjacente.

A diferença dos teores de Au no minério e nos latossolos é muito grande. As áreas anômalas foram definidas em superfície com teores da ordem de dezenas de ppb, o que impõe a utilização de técnicas analíticas sensíveis nos trabalhos de pesquisa.

A análise em separado das frações grossa e fina das amostras de solo pode facilitar a interpretação dos resultados, uma vez que as assinaturas geoquímicas desses materiais são diferentes e complementares em relação à assinatura do minério. Os nódulos e pisólitos ferruginosos podem ser utilizados na prospecção, uma vez que vários elementos indicadores ficam concentrados nesse material. Esse material pode dar bons resultados em trabalhos de escala regional e sub-regional, principalmente se coletados em cursos d'água, o que pode auxiliar na definição de bacias anômalas e na escolha de áreas para *follow-up*.

A utilização de malhas de amostragem de solo de 25 m X 100 m se mostrou eficiente na delimitação das anomalias. A redução dos intervalos de amostragem não deve trazer benefícios significativos na localização da mineralização primária. Após a detecção da área anômala, poços e/ou trincheiras podem ser abertos para a confirmação da presença de mineralização em profundidade. A utilização de trado motorizado também pode apresentar bons resultados na amostragem do topo do saprolito.

Deve-se ressaltar a importância de um método rudimentar extremamente eficaz na localização de jazimentos auríferos: **concentrados de bateia**. Boyle (1979) e Friedrich *et al.* (1992), por exemplo, ressaltam o papel desempenhado por esta técnica na descoberta de jazidas auríferas em diferentes países. O Garimpo Fazenda Pison e centenas de outros foram encontrados por garimpeiros que, apenas de posse de uma “cuia” penetram na mata e realizam

trabalhos de prospecção nos milhares de igarapés da Amazônia. Ao encontrarem uma drenagem promissora, iniciam os trabalhos de retirada do metal do cascalho que repousa sobre o topo do saprolito; foi o que ocorreu nesta área de estudo. Durante a evolução da garimpagem, veios de quartzo com textura *boxwork* foram encontrados na drenagem existente entre o que chamamos hoje de trincheiras T1 e T2 (Figuras 4 e 5, onde existe uma lagoa). Estava descoberta a fonte do ouro aluvionar e então iniciou-se o trabalho de extração de ouro no minério oxidado, o que resultou na exposição dos perfis lateríticos incompleto (T1) e completo (T2). É de esperar que os concentrados de bateia possam ser utilizados como ferramentas de prospecção geoquímica de solo. Utilizando-se volumes de 50 litros do latossolo, coletados em furos de amostragem executados a trado manual (*auger*), seriam obtidos concentrados capazes de localizar a mineralização primária em subsuperfície. Para a definição do espaçamento das amostragens e das distâncias entre as linhas seria necessário um estudo orientativo que infelizmente não foi realizado neste projeto. Uma provável limitação deste método seria a diminuição que ocorre no tamanho das partículas ao se aumentar a distância de amostragem a partir da área fonte das mesmas (Colin & Lecomte 1988, Colin *et al.* 1989a,b, Lecomte & Colin 1989 e Colin & Vieillard 1991), uma vez que o método funciona apenas para o ouro disperso por processos mecânicos (Boyle 1979) e requer um tamanho mínimo ($> 50 \mu\text{m}$) de partículas para ser eficaz (Zeegers 1987). Porém, o método é de fácil execução e as respostas são dadas no campo, sem necessidade do envio de amostras para laboratórios, o que na Amazônia pode representar um ganho considerável de tempo e dinheiro. Um outro aspecto positivo é que os nódulos e pisólitos ferruginosos existentes no latossolo podem ser concentrados por este método, podendo ser enviados para análise para verificação de sua assinatura geoquímica (Farrel 1984). E isso pode ser aplicado na prospecção de diferentes bens minerais.

Os modelos prospectivos atualmente propostos para a região amazônica devem ser aplicados com cuidado e devem ser encarados como ponto de partida para estudos orientativos de detalhe em cada situação específica. A região amazônica ainda é bastante desconhecida, apresentando peculiaridades capazes de inviabilizar a utilização indiscriminada de modelos concebidos para outros países e para regiões da própria Amazônia.

Em resumo, a utilização de métodos geoquímicos na prospecção de Au (e outros metais) na região Amazônica apresenta ótimos resultados se aplicados de acordo com os processos atuantes na formação do regolito, mesmo com a presença de um espesso manto intempérico e uma densa cobertura vegetal.

ANEXOS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M de, Hasui, Y., Neves, B.B. de B., Fuck, R.A.A. (1981) Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Review*, **17**, 1-29.
- Ambrosi, J.P., Nahon, D. (1986) Petrological and geochemical differentiation of lateritic iron crust profiles. *Chemical Geology*, **57**, 371-393.
- Anand, R.R., Butt, C.R.M. (1988) The terminology and classification of the deeply weathered regolith. CSIRO Division of Exploration Geoscience Report. 29 p.
- Andrade, A.F. de; Santiago, A.F.; Melo, C.F.; Bizinella, G.A.; Moreira, H.L.; Santos, J.O.S.; Oliveira, J.R.; Moura, P.A., Lopes, R.C.; Rosa Filho, S.F.; Neves, S.A.V. (1978) Projeto Tapajós – Sucunduri: relatório de integração geológica. Manaus. CPRM/DNPM. 3v. (relatório inédito).
- Andrade W.O., Mackesky, M.L., Rose, A.W. (1991) Gold distribution and mobility in the surficial environment, Carajás region, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**, 95-114.
- Angélica, R.S. Costa, M.L., Pöllmann (1995) Mineralogia e geoquímica das partículas de ouro nos perfis laterito-gossânicos das áreas Igarapé Bahia e Águas Claras, Carajás, Pará. In: V Congr. Bras. Geoq., Anais, Niterói, RJ.
- Angélica, R.S. (1996) Mineralogia e geoquímica de gossans e lateritos auríferos na região de Carajás: depósitos de Igarapé Bahia e Águas Claras. Tese de doutoramento apresentada ao Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará, 138p.
- Antweiler, J.C., Campbell, W.L. (1977) Application of gold compositional analyses to mineral exploration in the United States. *Journal of Geochemical Exploration*, **8**, 17-29.
- Araneda, R., Liz, J.C., Madalosso, A., Andrade, P.J., Oliveira, G. (1998) Características geológicas e natureza das mineralizações auríferas de alguns prospectos da Província Tapajós. Relatório interno, Barrick Co. Rio de Janeiro. 21p.
- Baker, W.E. (1978) The role of humic acid in the transport of gold. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **42**, 645-649.
- Beauvais, A., Boeglin, J.L., Colin, F., Mazaltarim, D., Muller, J.C. (1990) Geochemical evolution and degeneration of ferricretes under a humid tropical climate in the east of Central African Republic. In: Geochemistry of the Earth; surface and of mineral formation (Abstracts). 2nd International Symposium, Provence, France. Edited by Y. Noack and D. Nahon. *Chemical Geology*, **84**, 25-26.
- Beauvais, A., Tardy, Y (1991) Formation et dégradation des cuirasses ferrugineuses sous climat tropical humide, à la lisière de la forêt équatoriale. *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences, Paris*, **309**, série II, 553-560.
- Beauvais, A., Colin, F. (1993) Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. *Chemical Geology* **106**, 77-101.

- Beauvais, A., Roquin, C. (1996) Petrological differentiation patterns and geomorphic distribution of ferricretes in Central Africa. *Geoderma*, **73**, 63-82.
- Benedetti, M., Boulège, J. (1991) Mechanism of gold transfer and deposition in a supergene environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**, 1539-1547.
- Bilong, P., Belinga, S.E., Volkoff, B. (1992) Séquence d'évolution des paysages cuirassés et des sols ferrallitiques en zones forestières tropicales d'Afrique Centrale. *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences, Paris*, **314**, série II, 109-115.
- Bitom, D., Volkoff, B. (1993) Altération déferruginisante des cuirasses massives et formation des horizons gravillonnaires ferrugineux dans les sols de l'Afrique Centrale humide. *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences, Paris*, **316**, série II, 1447-1454.
- Bizinella, G.A., Santiago, A.F.; Melo, A.F.F. de; Santos, A. dos; Borges, F.R.; Godoy, H.K.; Yamaguti, H.S.; Oliveira, J.R. de; Carmona, J.R.M.; D'Antona, R.J.G.; Oliveira, R.L. (1980) Projeto Tapajós-Sucunduri. Manaus. CPRM/DNPM. 8v (Relatório final).
- Blatt, H.; Middleton, G.; Murray, R.C. (1982) Origin of sedimentary rocks. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 782p.
- Boeglin, J.L., Mazaltarim, D. (1989) Géochimie, degrés d'évolution et lithodépendance des cuirassés ferrugineux de la région de Gaoua au Burkina-Faso. *Sci. Géol. Bull. Strasbourg*, **42**, 27-44.
- Boulange, B., Colin, F. (1994) Rare earth element mobility during conversion of nepheline syenite into lateritic bauxite at Passa Quatro, Minas Gerais, Brazil. *Applied Geochemistry*, **9**, 701-711.
- Bowell, R.J., Gize, A.P., Foster, R.P. (1993a) The role of fulvic acid in the supergene migration of gold in tropical rain forest soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**, 4179-4190.
- Bowell, R.J., Foster, R.P., Gize, A.P. (1993b) The mobility of gold in tropical rain forest soils. *Econ. Geol.*, **88**, 999-1016.
- Bowell, R.J. (1992) Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: Implications for the supergene behavior of gold. *Mineralogical Magazine*, **56**, 545-560.
- Boyle, R.W. (1979) The geochemistry of gold and its deposits. Geological Survey of Canada Bulletin, **280**, 564p.
- Bradshaw, P.M.D. (1975) Conceptual models in Exploration Geochemistry – the Canadian Cordillera and Canadian Shield. *Journal of Geochemical Exploration*, **4**, 1-213.
- Braun, O.P.G. (1971) Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. *Revista Brasileira de Geografia*, **3**, 3-40.
- Brimhall, G.H., Dietrich, W.E. (1987) Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: results on weathering and pedogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, 567-587.

- Brimhall, G.H., Lewis, C.J., Ford, C., Bratt, J., Taylor, G., Warin, O. (1991) Quantitative geochemical approach to pedogenesis: importance of parent material reduction, volumetric expansion, and eolian influx in lateritization. *Geoderma*, **51**, 51-91.
- Butt, C.R.M., Smith, R.E. (1980) Conceptual models in exploration geochemistry - Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, **12**, 89-367, Special Issue.
- Butt, C.R.M.; Zeegers, H. (eds.) (1992) Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains. Handbook of Exploration Geochemistry, **4**, Elsevier, Amsterdam, 607 p.
- Butt, C.R.M., Gray, D.J., Lintern, M.J., Robertson, I.D.M., Taylor, G.F., Scott, K.M. (1998) Gold and associated elements in the regolith – dispersion processes and implications for exploration. CRCLEME Open File Report 29.
- Butt, C.R.M. (1989) Genesis of supergene gold deposits in the lateritic regolith of the Yilgarn Block, Western Australia. *Economic Geology Monograph 6*. The geology of gold deposits. The perspective in 1988. Editors: R.R.Keays, W.R.H.Ramsey, D.I. Groves, 1989, The Economic Geology Publ. Co.
- Butt, C.R.M. (1992) Physical weathering and dispersion. In: Regolith Exploration Geochemistry in Tropical and Sub-tropical Terrains. Butt, C.R.M. e Zeegers, H. (eds.). Handbook of Geochemical Exploration, Elsevier, Amsterdam, **4**, 93-113.
- Carvalho, I.G. (1984) Mineralizações auríferas de Gentio do Ouro (Bahia): Características micromorfológicas. In: Congr. Brasil. Geol., 33, Rio de Janeiro, 1984. Anais..., Rio de Janeiro, SBG, **8**, 4024-4031.
- Chao, T.T., Theobald, P.K. (1976) The significance of iron and manganese oxides in geochemical exploration. *Economic Geology*, **71**, 1560-1569.
- Chao, T.T. (1984) Use of partial extraction techniques in geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **20**, 101-135.
- Cloke, P.L., Kelly, W.C. (1964) Solubility of gold under inorganic supergene conditions. *Economic Geology*, **59**, 259-270.
- Cohen, D.R., Shen, X.C., Dunlop, A.C., Rutherford, N.F. (1998) A comparison of selective extraction soil geochemistry and biogeochemistry in the Cobar area, New South Wales. *Journal of Geochemical Exploration*, **61**, 173-189.
- Colin, F., Lecomte, P. (1988) Le profil d'alteration du prospect aurifere de Mégaba-Mvomo. *Chron. Rech. Min.*, **491**, 55-65.
- Colin, F., Edou-Minko, A., Nahon, D. (1989a) L'or particulaire dans les profils latéritiques: altérations géochimiques et dispersion superficielles en conditions équatoriales. *Comptes Rendues de l' Académie des Sciences, Paris*, **309**, série II, 553-560.
- Colin, F., Lecomte, P., Boulangé, B. (1989b) Dissolution features of gold particles in a lateritic profile at Dondo Mobi, Gabon. *Geoderma*, **45**, 241-250.
- Colin, F., Vieillard, P. (1991) Behavior of gold in the lateritic equatorial environment: weathering and surface dispersion of residual gold particles, at Dondo Mobi, Gabon. *Applied Geochemistry*, **6**, 279-290.

- Colin, F., Vieillard, P., Ambrosi, J.P. (1993) Quantitative approach to physical and chemical gold mobility in equatorial rainforest lateritic environment. *Earth and Planetary Sciences Letters*, **114**, 269-285.
- Cosgrove, J.W. (1995) The expression of hydraulic fracturing in rocks and sediments. In: Ameen, M.S. (ed.), *Fractography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis*. Geological Society Special Publication No. 92, p. 187-196.
- Costa, M.L., Costa, J.A.V., Angélica, R.S. (1993) Gold-bearing bauxitic laterite in a tropical rain forest climate: Cassiporé, Amapá, Brazil. *Chron. Rech. Min.*, **510**, 41-51.
- Costa, M.L. (1991) Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Rev. Bras. Geociências*, **21**, 146-160.
- Costa, M.L. (1993) Gold distribution in lateritic profiles in South America, Africa, and Australia: applications to geochemical exploration in tropical regions. *Journal of Geochemical Exploration*, **47**, 143-163.
- Costa, M.L. (1997) Laterization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Explor. Mining Geol.*, **1**, 79-104.
- Coutinho, M.G. da N., Liverton, T., Souza, E.C. (1998) Granite magmatism and related gold mineralization in Tapajós Mineral Province, Amazon area, Brazil. Rio de Janeiro. CPRM. 30p. (Série Estudo de Prospectos 01/98).
- CPRM (1996) Carta-imagem de garimpos. Folha SB.21-V-D, Vila mamãe Anã. Programa de Levantamentos Geológicos, CPRM, Manaus. (CD ROM).
- CPRM (1999) Geologia e Recursos Minerais da Folha Vila Mamãe Anã (SB.21-V-D). Nota Explicativa, escala 1:250.000. CPRM, Manaus, 60p., ilustrado, inédito.
- Dall'Agnol, R.; Silva, C.M.G.; Scheller, T. (1999) Fayallite-Hedembergite rhyolites of the Iri Formation, Tapajós Gold Province, Amazonian Craton: implications for the Uatumã vulcanism. In: *Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados*, 1, Gramado. Boletim de Resumos. Gramado/RS. SBG. p. 31.
- Davies, T.C., Friedrich, G., Wiechowski, A. (1989) Geochemistry and mineralogy of laterites in the Sula Mountains greenstone belt, Lake Sonfon gold district, Sierra Leone. *Journal of Geochemical Exploration*, **32**, 75-98.
- Davis, J.C. (1986) *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Willey & Sons Inc. Second edition, 646p.
- Davy, R., El-Ansary, M (1986) Geochemical patterns in the laterite profile at the Boddington gold deposit, Western Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, **26**, 119-144.
- Delvigne, J.E. (1998) *Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering*. The Canadian Mineralogist, Special Publication 3. Mineralogical Association of Canada, Ottawa, 495p.

- Desborough, G.A., Heidel, R.H., Raymond, W.H., Tripp, J. (1971) Primary distribution of silver and copper in native gold from six deposits in the Western United States. *Mineral. Deposita*, **6**, 321-334.
- Dreher, A.M., Vlach, S.R., Martini, S.L. (1998) Adularia associated with epithermal gold veins in the Tapajós Mineral Province, Pará State, Northern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**, 433-442.
- Edou Minko, A., Colin, F., Trescases, J.J., Lecomte, P. (1992) Altération latéritique du gîte aurifère d'Ovala (Gabon), et formation d'une anomalie superficielle de dispersion. *Mineral. Deposita*, **27**, 90-100.
- Eilu, P.K., Mathison, C.I., Groves, D.I., Allardyce, W.J. (1999) Atlas of alteration assemblages, styles and zoning in orogenic lode-gold deposits in a variety of host rock and metamorphic settings. Geology and Geophysics Department (Centre for Strategic mineral Deposits). University of Western Australia. Publication no. 30.
- Eschenbrenner, V. (1986) Contribution des termites a la micro-agrégation des sols tropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Pédologie., **22**, 397-408.
- Faraco, M.T.L., Carvalho, J.M. de A., Klein, E.L. (1996) Carta Metalogenética da Província Aurífera do Tapajós, escala 1:500.000, Nota Explicativa, CPRM, Superintendência Regional de Belém, 13p.
- Farrel, B.L. (1984) The use of "loam" concentrates in geochemical exploration in deeply weathered arid terrains. *Journal of Geochemical Exploration*, **22**, 101-118.
- Ferreira, A.L. (1997) Grupo Jacareacanga. In: Geologia, petrografia, litoquímica preliminar e mineralizações da Folha Vila Mamãe Anã (SB.21-V-D). Projeto PROMIN/Tapajós. CPRM, Manaus. p. 7-8. (Relatório de progresso).
- Fonseca, E.C., Silva, E.F. da (1998) Application of selective extraction techniques in metal-bearing phases identification: a south European case study. *Journal of Geochemical Exploration*, **61**, 203-212.
- Fortescue, J.A.C. (1975) The use of landscape geochemistry to process exploration geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*, **4**, 3-13.
- Freyssinet, Ph., Butt, C.R.M. (1988) Morphology and geochemistry of gold in a lateritic profile, Reedy mine, Western Australia. Restricted Report, MG59R, CSIRO Australia, Division of Exploration Geoscience, Perth, 14p.
- Freyssinet, P., Zeegers, H., Tardy, Y. (1989) Néoformation d'or dans les cuirasses latéritiques: dissolution, migration, précipitation. *Comptes Rendues de l' Académie des Sciences, Paris* **305**, série II, 867-874.
- Freyssinet, Ph., Roquin, C., Muller, J.C., Paquet, H., Tardy, Y. (1990) Geochemistry and mineralogy of soils covering laterites and their use for gold exploration. In: Geochemistry of the Earth; surface and of mineral formation (Abstracts). 2nd International Symposium, Provence, France. Edited by Y. Noack and D. Nahon. *Chemical Geology*, **84**, 58-60.

- Freyssinet, Ph., Itard, Y. (1997) Geochemical mass balance of gold under various tropical weathering conditions: application to exploration. In: Gubins (ed.), Proc. Exploration 97: 4th Intern. Conf. Min. Explor., 347-354.
- Freyssinet, Ph. (1990) Géochimie de l'or dans les couvertures latéritiques. Thèse Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 269p.
- Freyssinet, Ph. (1993) Gold dispersion related to ferricrete pedogenesis in South Mali: application to geochemical exploration. *Chron. Rech. Min.*, **510**, 25-40.
- Freyssinet, Ph. (1994) Gold mass balance in lateritic profiles from savanna and rain forest zones. *Catena*, **21**, 159-172.
- Garret, R.G. (1991) The management, analysis and display of exploration geochemical data. Paper #9, *Exploration Geochemistry Workshop*, Prospectors and Developers Association of Canada, Toronto, March, 1991.
- Girard, J.P., Razanadranoroa, D., Freyssinet, Ph. (1997) Laser oxygen isotope analysis of weathering goethite from the lateritic profile of Yaou, French Guiana: paleoweathering and paleoclimatic implications. *Applied Geochem.*, **12**, 163-174.
- Girard, J.P., Freyssinet, Ph., Chazot, G. (2000) Unraveling climatic changes from intraprofile variations in oxygen and hydrogen isotopic composition of goethite and kaolinite in laterites: An integrated study from Yaou, French Guiana. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 409-426.
- Glasson, M.J., Lehne, R.W., Wellmer, F.W. (1988) Gold exploration in the Callion area, Eastern Goldfields, Western Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, **31**, 1-19.
- Goleva, G.A. (1970) Geochemical trends in the occurrence and migration forms of gold in natural waters. *Geochemistry International*, **7**, 518-529.
- Grant, A.H., Lavin, O.P., Nichol, I. (1991) The morphology and chemistry of transported gold grains as an exploration tool. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**, 73-94.
- Gray, D.J., Butt, C.R.M., Lawrance, L.M., 1992. The geochemistry of gold in lateritic terrains. In: Butt, C.R.M., Zeegers, H. (Eds.) *Handbook of Exploration Geochemistry*, Amsterdam, Elsevier, **4**: 461-482.
- Gray, D.J., Lintern, M.J., Longman, G.D. (1998) Readsorption of gold during selective-extraction – observations and potential solutions. *Journal of Geochemical Exploration*, **61**, 21-37.
- Gray, D.J., Lintern, M.J. (1998) Chemistry of gold in soils from the Yilgarn Craton, Western Australia. *The State of Regolith*, Geological Society of Australia Special Publication **20**, 209-221.
- Gray, D.J., Wildman, J.E., Longman, G.D. (1999) Selective and partial extraction analysis of transported overburden for gold exploration in the Yilgarn Craton, Western Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, **67**, 51-66.

- Gray, D.J., (1988) The Aqueous Chemistry of Gold in the Weathering Environment. (CSIRO/AMIRA P240/P241). CSIRO Division of Exploration Geoscience Restricted Report EG 4R. 64pp.
- Gray, D.J., (1996) Selective extraction techniques for the recognition of buried mineralization, Curara Well, Western Australia. (CSIRO/AMIRA P409: Weathering Processes Group). CSIRO Division of Exploration and Mining Restricted Report 210R., 72 pp.
- Gray, D.J., 1999a. Extraction techniques in exploration for buried mineralization, Curara Well, Western Australia. In: "New Approaches to an Old Continent, Proceedings of Regolith'98" (Editors Graham Taylor and Colin Pain), 271-282.
- Gray, D.J., 1999b. Partial leaches, selective extractions and mobile ions. In: "Exploration Geochemistry for the New Millennium". Australian Institute of Geoscientists, Bulletin No. 30 (Editors Susan E. Ho, Graham Jeffress and Brian Davis), 137-141.
- Grimm, B., Friedrich, G. (1989) Gold-bearing soils from Central Bahia, Brazil. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, **1**, H.5/6, 1193-1203.
- Grimm, B., Friedrich, G. (1990) Weathering effects on supergene gold in soils of a semiarid environment, Gentio do Ouro, Brazil. In: Noack, Y. & Nahon, D. (eds.), Geochemistry of the Earth's surface and of mineral formation. *Chem. Geol.*, **84**, 70-73.
- Groen, J.C.; Craig, J.R.; Rimstidt, J.D. 1990. Gold-rich rim formation on electrum grains in placers. *Canadian Mineralogist*, **28**, 207-228.
- Grunsky, E. (1991) Strategies and Methods for the Interpretation of Geochemical Data. Discussion paper applied to laterite geochemistry. CSIRO/AMIRA Laterite Geochemistry Project P240.
- Hall, G.E.M. (1998) Analytical perspective on trace element species of interest in exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **61**, 1-19.
- Hawkes, H.E., Webb, J.S. (1962) Geochemistry in mineral exploration. Harper & Row, London. 415p.
- Hieronimus, B., Kotschoubey, Boulègue, J. (2001) Gallium behaviour in some contrasting lateritic profiles from Cameroon and Brazil. *J. Geoch. Explor.*, **72**, 147-163.
- Hocquard, C., Zeegers, H., Freyssinet, Ph. (1993) Supergene gold: an approach to economic geology. *Chron. Rech. Min.*, **510**, 3-11.
- Hoffman, S.J.; Thomson, I. (1986) Models, Interpretation, and Followup. In: Robertson, J.M. (Ed.). *Reviews in Economic Geology – Exploration Geochemistry: design and interpretation of soil surveys*, **3**, 117-128.
- Juliani, C., Silva, R.H.C, Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Nunes, C.M.D. (2001) Gênese e evolução da alteração hidrotermal no Granito Batalha, Província Aurífera do Tapajós. In: SBG/Núcleo Norte, Simpósio de Geologia da Amazônia, 7, Manaus. Boletim de Resumos Expandidos (CD-ROM).

- Juliani, C. (2001) Metalogênese do ouro e metais de base associadas com o vulcano-plutonismo da porção W da província Aurífera do Tapajós. In: SBG/Núcleo Norte, Simpósio de Geologia da Amazônia, 7, Manaus. Boletim de Resumos Expandidos (CD-ROM).
- Kauranne, L.K. (1976) Conceptual models in Exploration Geochemistry – Norden 1975. *Journal of Geochemical Exploration*, **5**, 173-420.
- King, L.C. (1956) A geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, **2**, 3-265.
- Kistler, P. (1954) Historical resumé of the Amazon Basin. Belém. PETROBRÁS-RENOR. (Relatório técnico interno 129-A).
- Klein, E.L. (1999) Estudo de inclusões fluidas em veio de quartzo aurífero do garimpo Guarim, região do Cuiú-Cuiú, província Tapajós, SW do Estado do Pará. In: SBG/Núcleo Norte, Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, Belém, Boletim de Resumos Expandidos. 559-562.
- Knight, J.B., Mortensen, J.K., Morison, S.R. (1999) Lode and placer gold composition in the Klondike district, Yukon Territory Canada: implications for the nature and genesis of Klondike placer and lode gold deposits. *Econ. Geol.*, **94**, 649-664.
- Krauskopf, K.B. (1951) The solubility of gold. *Economic Geology*, **46**, 858-870.
- Lamarão, C.N.; Dall'Agnol, R. Lafon, J.M.; Lima, E.F. (1999) As associações vulcânicas e plutônicas de Vila Riozinho e Moraes de Almeida, Província Aurífera do Tapajós, SW do Estado do Pará. In: Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, 1, Gramado. Boletim de Resumos. Gramado/RS. SBG. p. 93.
- Lang, J.R.; Baker, T.; Hart, C.J.R.; Mortensen, J.K. (2000) Intrusion Related Gold Systems. *SEG Newsletter*, **40**, 12p.
- Lawrance, L.M., Griffin, B.J. (1994) Crystal features of supergene gold at Hannan South, Western Australia. *Mineralium Deposita*, **29**, 391-398.
- Lawrance, L.M. (1988) Behaviour of gold in the lateritic weathering profile of the Yilgarn Block, Western Australia. In: Ho, S.E., Groves, D.I. (eds.) *Advances in understanding Precambrian gold deposits (II)*. Geology Dept. & Univ. Extension, University of Western Australia Publ., **12**, 299-313.
- Lecomte, P., Colin, F. (1989) Gold dispersion in a tropical rainforest weathering profile at Dondo Mobi, Gabon. *Journal of Geochemical Exploration*, **34**, 285-301.
- Lecomte, P., Zeegers, H. (1992) Humid tropical terrains (rainforests). In: Regolith Exploration Geochemistry in Tropical and Sub-tropical Terrains. Butt, C.R.M. e Zeegers, H. (eds.). Handbook of Geochemical Exploration, Elsevier, Amsterdam, **4**, 241-294.
- Lecomte, P. (1988) Stone line profiles: importance in geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **30**, 35-61.

- Loen, J.S. (1995) Use of placer gold characteristics to locate bedrock gold mineralization. *Explor. Mining Geol.*, **4**, 335-339.
- Lovering, T.G.; McCarthy, J.H. Jr. (1978) Conceptual Models in Exploration Geochemistry – the Basin and Range province of the Western United States and Northern Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, **9**, 113-276.
- Lucas, Y., Chauvel, A. (1992) Soil formation in tropically weathered terrains. In: Regolith Exploration Geochemistry in Tropical and Sub-tropical Terrains. Butt, C.R.M. e Zeegers, H. (eds.). Handbook of Geochemical Exploration, Elsevier, Amsterdam, 4, 57-76.
- Mann, A.W.; Birrell, R.D.; Mann, A.T.; Humphreys, D.B.; Perdix, J.L. (1998) Application of mobile metal ion technique to routine geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **61**, 57-86.
- Mann, A.W. (1984) Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles: some observations from Western Australia. *Economic Geology*, **79**, 38-49.
- Mann, A.W. (1998) Oxidised gold deposits: relationships between oxidation and relative position of the water table. *Australian Journal of Earth Sciences*, **45**, 97-108.
- Martini, S.L. (1998) An overview of main auriferous regions of Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**, 307-314.
- Michel, D. (1987) Concentration of gold in *in situ* laterite from Mato Grosso. *Mineralium Deposita*, **22**, 185-189.
- Morrison, G.W., Rose, W.J., Jaireth, S. (1991) Geological and geochemical controls on the silver content (fineness) of gold in gold-silver deposits. *Ore Geology Reviews*, **6**, 333-364.
- Nahon, D. (1986) Evolution of iron crust in tropical landscape. In: S.M.Colman and D.P. Dethier (eds.) Rates of chemical weathering of rocks and minerals. Academic Press, London, pp.169-191.
- Nahon, D. Melfi, A. J., Conte, C.N. (1989) Présence d'un vieux système de cuirasses ferrugineuses latéritiques en Amazonie du Sud. Sa transformation *in situ* en latosols sous la forêt équatoriale actuelle. *Comptes Rendues de l' Académie des Sciences, Paris*, **308**, série II, 755-760.
- Nery, M.A.C., Silva, E.A., Maron, M.A.C. (2000) Gold. In: Mineral summary 2000. National Department of Mineral Production (DNPM) Brasília. p. 53-54.
- Oliveira, M.A. de, Luzardo, R., Larizzatti, J.H. (1999) Ocorrência de ouro em xisto máfico na região do rio Amana – Província Aurífera do Tapajós. In: SBG/Núcleo Norte, Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, Belém. Boletim de Resumos Expandidos. 132-135.
- Oliveira, S.M.B. de, Campos, E.G. (1991) Gold-bearing iron duricrust in Central Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, **41**, 233-244.
- Oliveira, S.M.B. de, Oliveira, N.M. de (2000) The morphology of gold grains associated with oxidation of sulphide-bearing quartz veins at São Bartolomeu, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **13**, 217-224.

- Pain, C. (2001) Landforms and surficial sediments. In: Regolith Geology and Mineral Exploration – Masters Short Course. WASM, Kalgoorlie.. CRCLEME Report 163, 31p.
- Plyusnin, A.M., Pogrelnyak, Y.F., Mironov, A.G., Zhmodik, S.M. (1981) The behavior of gold in the oxidation of gold-bearing sulfides. *Geochemistry International*, **18**, 116-123.
- Popini, M.V.F.; Almeida, M.E. (1997) Complexo Cuiú-Ciui. In: Geologia, petrografia, litoquímica preliminar e mineralizações da Folha Vila Mamãe Anã (SB.21-V-D). Projeto PROMIN/Tapajós. CPRM, Manaus. p. 8-11. (Relatório de progresso).
- Porto, C.G., Hale, M. (1995) Gold redistribution in the stone-line lateritic profile of the Posse deposit, Central Brazil. *Economic Geology* **90**, 308-321.
- Porto, C.G., Hale, M. (1996) Mineralogy, morphology and chemistry of gold in stone line lateritic profile of the Posse deposit, Central Brazil. *J. Geochem. Explor.*, **57**, 115-125.
- Robert, F. (1996) Tapajós Gold Project, Pará State, Brazil. Canadian Geological Survey. Mission Report, CIDA Project 204/13886, Canada-Brazil cooperation project for sustainable development in the mineral sector. 35p.
- Robertson, I.D.M., Taylor, G.F. (1987) Depletion haloes in fresh rocks surrounding the Cobar orebodies, N.S.W., Australia: implications for exploration and ore genesis. *J. Geochem. Explor.*, **27**, 77-101.
- Robertson I.D.M., Butt, C.R.M. (1993) Atlas of weathered rocks. CSIRO Division of Exploration Geoscience, Restricted Report 390R. 99p.
- Robertson, I.D.M., Butt, C.R.M., Chaffee, M.A. (1997) Fabric and chemical composition: from parent lithology to regolith. CSIRO Division of Exploration. In: Regolith geology and mineral exploration – Masters short course, Kalgoorlie (WA), 4-15 June 2001.
- Robertson, I.D.M. (1995) Data analysis and data interpretation. CRCLEME/CSIRO Exploration Geochemistry – Geology Series 308. 10p.
- Robertson, I.D.M. (1997) Ferruginous lag geochemistry on the Yilgarn Craton of Western Australia; practical aspects and limitations. *J. Geoch. Explor.*, **57**, 139-151.
- Robinson, B.W.; Ware, N.G.; Smith, D.G.W. (1998) Modern Electron-Microprobe Trace-Element Analysis in Mineralogy. In: Cabri, L.J. & Vaughan, D.J. (Eds.), Modern Approaches to ore and Environmental Mineralogy. Miner. Assoc. of Canada. Short Course Series, vol. 27. Ottawa, Ontario.
- Roslyakov, N.A., Peshevitsky, B.I., Nepeyna, L.A., Timbalist, V.G. (1971) Geochemistry of gold in the processes of weathering crust formation. International Geological Congress, Moscow, Abstracts of reports. **II**, 179-180.
- RTDM (1995) Relatório de Avaliação do Potencial Aurífero da Área Fazenda Pison (AM). Rio Tinto Desenvolvidos Minerais. 29p. (Relatório interno)
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Gaudetti, H.E. (1997) Reconnaissance U-Pb in zircon, Pb-Pb in sulphides and review of Rb-Sr geochronology in the Tapajós gold Province,

- Pará/Amazonas States, Brazil. South American Symposium on Isotope Geology-Brazil (SSAGI), Campos do Jordão, SP. Proceedings...280-282.
- Santos, J.O.S., Groves, D.I., Hartmann, L.A., Moura, M. A., McNaughton, N.J. (2001). Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta Domains, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil, *Mineralium Deposita*, **36**, 278-299.
- Santos, J.O.S. (1980) Ouro na Amazônia. Cia. de Pesquisa de Recurso Minerais (CPRM). Superintendência Regional de Manaus. 35p. (Relatório interno)
- Santosh, M., Omana, P.K. (1991) Very high purity gold from lateritic weathering profiles of Nilambur, southern India. *Geology*, **19**, 746-749.
- Santosh, M., Philip, R., Jacob, M.K., Omana, P.K. (1992) Highly pure placer gold formation in the Nilambur Valley, Wynad Gold Field, southern India. *Mineralium Deposita*, **27**, 336-339.
- Sillitoe, R.H. (1991) Intrusion-related gold deposits. In: Gold Metallogeny and Exploration, Foster, R.P. (ed.), London, Blackie, 165-209.
- Sillitoe, R.H. (1996) Granites and metal deposits. *Episodes*, **19**, 126-133.
- Smee, B.W. (1998) A new theory to explain the formation of soil geochemical responses over deeply covered gold mineralization in arid environments. *Journal of Geochemical Exploration*, **61**, 149-172.
- Stoffregen, R. (1986) Observations on the behavior of gold during supergene oxidation at Summitville, Colorado, U.S.A., and implications for electrum stability in the weathering environment. *Applied Geochemistry*, **1**, 549-558.
- Tardy, Y., Nahon, D. (1985) Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite and Fe³⁺-kaolinite in bauxites and ferricretes: an approach to the mechanism of concretion formation. *Am. J. Sci.*, **285**, 865-903.
- Tardy, Y., Mazaltarim, D. Boeglin, J.L., Roquin, C., Pion, J.C., Paquet, H., Millot, G. (1988) Lithodépendance et homogénéisation de la composition minéralogique et chimique des cuirasses ferrugineuses latéritiques. C. R. Acad. Sci. Paris Sér. II, **307**, 1765-1772.
- Tardy, Y., Kobilsek, B., Paquet, H. (1991) Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical palaeoclimates during the past 150 m.y. and implications for India and Australia. *Journal of African Earth Sciences*, **12**, 283-295.
- Tardy, Y. (1993) *Pédrologie des latérites et des sols tropicaux*. Masson, Paris.
- Théveniaut, H., Freyssinet, Ph. (1999) Paleomagnetism applied to lateritic profiles to assess saprolite and Duricrust formation processes: the example of mont Baduel profile (French Guiana). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **148**, 209-231.
- Thompson, J.F.H.; Sillitoe, R.H.; Baker, T.; Lang, J.R.; Mortensen, J.K. (1999) Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Mineralium Deposita*, **34**, 323-334.

- Thomson, I. (1986) Getting it right. In: Robertson, J.M. (Ed.). *Reviews in Economic Geology – Exploration Geochemistry: design and interpretation of soil surveys*, **3**, 1-18.
- Thorner, M.R. (1992) The chemical mobility and transport of elements in the weathering environment. In: Govett, G.J.S. (ed.) *Handbook of Exploration Geochemistry*, **4**, Amsterdam, Elsevier. p. 79-96.
- Trarbach, M., Kotschoubey, B. (1991) Estudo do comportamento do ouro nas lateritas ferruginosas e corpos gossânicos na região de Cachoeira, nordeste do estado do Pará. *Anais do III Simpósio de Geologia da Amazônia*, 584-595.
- Varajão, C.A.C. (1994) Evolution supergène de l'or riche en palladium de lamine de Maquiné, Quadrilatère Ferrifère, Minas Gerais, Brésil. Tese de doutoramento, Faculté des Sciences et Techniques d'Aix-Marseille, França, 215pp.
- Vasconcelos, P.M., Kyle, J.R. (1991) Supergene geochemistry and crystal morphology of gold in a semiarid weathering environment: application to gold exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**, 115-132.
- Vasconcelos, P.M., Renne, P.R., Brimhall, G.H., Becker, T.A. (1994) Direct dating of weathering phenomena by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar analysis of supergene K-Mn oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 1635-1665.
- Ventura, L.M., Ávila, L.M., Barbosa, G.V. (1975) Geomorfologia. In: Levantamento de Recursos Minerais, volume 7, Folha SB.21 Tapajós, Projeto Radam, MME, DNPM, Rio de Janeiro.
- Vlassopoulos, D., Wood, S.A. (1990) Gold speciation in natural waters. I. Solubility and hydrolysis reactions of gold in aqueous solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**, 3-12.
- Webster, J.G., Mann, A.W. (1984) The influence of climate, geomorphology and primary geology on the supergene migration of gold and silver. *Journal of Geochemical Exploration*, **22**, 21-42.
- Webster, J.G. (1986) The solubility of gold and silver in the system Au-Ag-S-O₂-H₂O at 25°C and 1 atm. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **50**, 1837-1846.
- Wilson, A.F. (1984) Origin of quartz-free gold nuggets and supergene gold found in laterites and soils - a review and some new observations. *Australian Journal of Earth Sciences*, **31**, 303-316.
- Xueqiu, W. (1998) Leaching of mobile forms of metals in overburden: development and application. *Journal of Geochemical Exploration*, **61**, 39-55.
- Yeager, J.R., Clark, J.R., Mitchell, W., Renshaw, R. (1998) Enzyne leach anomalies associated with deep Mississippi Valley-type zinc ore bodies at the Elmwood Mine, Tennessee. *Journal of Geochemical Exploration*, **61**, 103-112.
- Zang, W., Fyfe, W.S. (1993) A three-stage genetic model for the Igarapé Bahia lateritic gold deposit, Carajás, Brazil. *Economic Geology*, **88**, 1768-1779.
- Zeegers, H. (1987) Remaniements de surface et prospection géochimique de l'or. *Chron. Rech. Min.*, **488**, 55-61.

GLOSSÁRIO (adaptado de Butt & Zeegers 1992 e de Delvigne 1998)

Alteração

Termo de significado amplo que inclui processos supérgenos e hipógenos que em condições magmáticas tardias, pós-magmáticas, hidrotermais ou metamórficas, são responsáveis pelos processos de transformação das rochas e minerais anteriores aos processos intempéricos.

Alterito

Sinônimo de saprolito. Entretanto, para alguns autores, “altérite” se refere menos especificamente ao material residual intemperizado e “isaltérite” se refere a saprolito.

Alteromorfo

Termo utilizado em todos os casos de transformação (alteração ou intemperismo) de minerais primários em produtos secundários, qualquer que seja a forma dos minerais primários e secundários e qualquer que seja o grau de preservação de seus formato e volume originais.

Alteroplasma

Plasma de primeira geração consistindo de micropartículas cristalinas secundárias desenvolvidas a partir de ou dentro de minerais primários cujo tamanho e volume geralmente são mantidos. O domínio formado dessa maneira é um alteromorfo.

Alterorelictos

Fragmento de rocha intemperizada, ou associação de minerais intemperizados, isolados em uma matriz mais evoluída. É reconhecido por sua textura petrográfica original e pela composição de seus alteromorfos. Pode estar, em muitos casos, associado a minerais menos intemperizados. Os alterorelictos correspondem a litorelictos cujo conteúdo, e eventualmente textura, foi modificado por processos intempéricos, ou a relictos de alteritos (ou de alteroplasmas) isolados dentro da matriz que resulta da substituição do alterito por um plasma de origem pedológica neoformado (pedoplasma).

Aluvião

Um termo genérico para argila, silte areia e cascalho depositado como sedimento classificado ou semiclassificado sedimentado durante um tempo geológico comparativamente recente no leito ou planície de inundação de um rio ou córrego.

Coluvião

Um termo genérico para depósitos em declives ou na base de declives que foram principalmente transportados por fluxo de massa. Pode ser ampliado para incluir material que foi transportado pela água superficial (*sheetwash*, i.e. fluxo de água não confinado a canais específicos).

Concreção

Uma massa/agregado de matéria mineral compacta, de formato arredondado ou irregular e composição normalmente distinta de seu substrato. Nesse sentido, “concreção” é um termo geral que inclui pisólitos e nódulos. Concreções são tidas como formadas pela precipitação a partir de uma solução sobre um núcleo ou centro.

Córtex

Uma camada ou pele externa; aplicado às camadas externas de concreções.

Couraça

Termo francês para “ironstone”. Fácies ou horizonte altamente endurecido da zona ferruginosa de um regolito laterítico, com estrutura maciça, pisolítica, nodular ou vesicular. Sinônimo de “duricrust” laterítico.

Cutan

Uma modificação da textura, estrutura ou estrutura de um material de solo em uma superfície natural pela concentração de um constituinte particular; por exemplo, pele de argila.

Duricrust

Materiais endurecidos na superfície ou logo abaixo dela. O material pode ser ferruginoso, aluminoso, silicoso ou calcário ou uma combinação desses. Materiais silicosos e calcários são normalmente chamados de silcrete e calcrete respectivamente.

Fábrica

A natureza física de uma unidade ou componente física do regolito de acordo com seu arranjo espacial, orientação (ou sua ausência) e as relações mútuas de elementos individuais tais como partículas, cristais, cimentos, orifícios dos quais ela é composta. Estrutura se refere às menores feições (microscópicas e mesoscópicas); o termo é usado para feições maiores. Usado em detrimento de “textura”.

Ferrasol, solo ferralítico, sol ferrallitique

Solo tropical úmido caracterizado por um alto conteúdo em óxidos de Fe, formado pela lixiviação da sílica e das bases. Normalmente usado como sinônimo de laterito, latossolo, oxisolo.

Ferricrete

Um conglomerado de areias superficiais e cascalhos cimentados por oxi/hidróxidos de Fe. De forma mais geral, material endurecido formado pela cimentação ou substituição in-situ, ou ambos, do regolito pré-existente por oxi/hidróxidos de Fe precipitados da água contida no solo ou subterrânea. A fábrica, mineralogia e composição dos ferricretes podem refletir as do regolito original ou da litologia subjacente. Alguns autores restringem o termo ao horizonte ferruginoso dos regolito lateríticos (sinônimo de couraça, duricrust laterítico) mais o termo mais genérico é preferido.

Frente de intemperismo

Frente de transformação marcando o início do intemperismo na base do regolito. Interface saprolito-rocha

Frente de pedoplasmação

Frente de transformação onde a fábrica lítica é destruída, muitas vezes com pouco retrabalhamento químico (Pedoplasmação, Flach et al., 1968 *in* Butt & Zeegers, 1992). Ele forma a divisa entre o saprolito e o pedolito em perfis profundamente intemperizados.

Horizonte

Uma camada dentro do regolito aproximadamente paralela à superfície do solo e diferente quanto às propriedades físicas, químicas e/ou biológicas das camadas adjacentes geneticamente relacionadas, ou em características tais como cor, pH, estrutura, fábrica, textura, consistência, e em termos de tipo e número de organismos.

Iluviação

Processo de deposição de material do solo movido de um horizonte para outro dentro do solo; normalmente de um horizonte superior para um inferior dentro do perfil, mas também lateralmente dentro de uma toposequência. Refere-se particularmente a sólidos, especialmente partículas coloidais.

Laterito

(Do latim *later* = tijolo). Material altamente intemperizado, pobre em elementos alcalinos e alcalino-terrosos, composto principalmente por oxi/hidróxidos de Fe (goethita, hematita, maghemita), e hidróxidos de alumínio (e.g. gibbsita). Os óxidos de Fe e Al podem conter outros minerais incluindo argilas e outros minerais secundários (caolinita, halloisita, anatásio, rutilo), minerais primários resistentes (quartzo, zircão etc.) e minerais primários intemperizáveis (ilmenita, muscovita). O horizonte laterítico é duro ou sujeito a endurecimento quando exposto. O termo laterito é utilizado por alguns autores para designar o perfil intempérico laterítico completo (zona ferruginosa, zona mosqueada, saprolito), mas o uso mais restrito, aplicado apenas ao horizonte ferruginoso/aluminoso, é mais comum. Talvez seja melhor considera-lo como um termo informal.

Latossolo

Solo altamente lixiviado, rico em ferro, alumina, ou sílica formado em clima muito úmido e temperatura relativamente alta.

Lítico

Relacionado a rocha. *Fábrica lítica*: fábrica da rocha; aplicada a materiais frescos e intemperizados (e.g. saprolito, litorelictos) que retêm a fábrica original. Quando intemperizados, a maioria ou todos os minerais primários estão pseudomorfizados por minerais secundários.

Litorrelicto

Um pequeno fragmento ou entidade altamente intemperizado possuindo uma fábrica lítica primária. Normalmente aplicado onde a totalidade do material no qual ele ocorre tem fábrica secundária (e.g. um litorelicto pode formar o núcleo de um nódulo). Um *litorelicto* é um fragmento não intemperizado em uma associação de minerais secundários.

Maciço

Homogêneo, sem fábrica interna visível.

Nódulo

Pequena massa ou substância mineral de formato irregular, geralmente arredondado, mas com reentrâncias, e com menos de 60 mm de diâmetro, apresentando normalmente um córtex ou camada superficial. A maioria dos nódulos observados num perfil laterítico tem diâmetro inferior a 40 mm. Com o aumento da esfericidade, os termos “nódulo laterítico” e “pisólito laterítico” se fundem. Nódulos lateríticos se formam pela precipitação de óxidos de Fe em poros. Se o processo é iniciado no saprolito ou em blocos saprolíticos, a fábrica primária da rocha pode ser preservada como litorelictos no seu interior. Quando iniciado em material que passou por uma reorganização, a fábrica secundária pode ser preservada.

Oólito

Similar a pisólito, mas com diâmetro menor que 2 mm.

Pedolito

Parte superior do regolito, acima da frente de pedoplasmação, que esteve sujeito aos processos de formação de solo resultando na perda da fábrica da rocha-mãe e o desenvolvimento de uma nova fábrica, incluindo estruturas secundárias tais como pisólitos. O pedolito pode se desenvolver a partir de um material residual, i.e. do saprolito, ou de material transportado.

Pedorrelicto

Um pequeno fragmento ou entidade altamente intemperizado desprovido de uma fábrica lítica primária, cuja gênese se deu por processos pedológicos (e.g. um pedorrelicto pode ser um fragmento de couraça imerso na matriz argilosa de um latossolo).

Pisólito

Corpo concrecionário esférico ou elipsoidal lembrando o formato de uma ervilha com mais de 2 mm de diâmetro. Pode apresentar estrutura interna concêntrica; a maioria dos pisólitos possui um córtex externo.

Protólito

Termo geral para o material parental que deu origem ao regolito.

Regolito

Toda a cobertura inconsolidada e cimentada secundariamente que cobre o embasamento rochoso mais coerente e que foi formado por intemperismo, erosão, transporte e/ou deposição de material mais antigo. O regolito inclui rochas do embasamento fraturadas e intemperizadas, saprolitos, solos, acumulações orgânicas, depósitos glaciais, colúvio, alúvio, sedimentos evaporíticos, loess e depósitos eólicos. Pode ser subdividido em unidade basal, o saprolito, e a unidade superior, o pedolito.

Saprolito

Rocha-mãe intemperizada na qual uma fábrica fina, originalmente expressa por arranjos de constituintes minerais primários da rocha (e.g. cristais, grãos), está retida. Mais que 20% dos minerais passíveis de intemperismo estão modificados. Pode-se estender o saprolito até a inclusão de rochas intemperizadas nas quais apenas estruturas grandes podem ser observadas, tais como acamamento, xistosidade, venulações, ou contatos litológicos. A presença do saprolito implica em intemperismo essencialmente isovolumétrico.

Solo

Parte superior do regolito, geralmente definida como aquela que suporta a vida vegetal. Em particular se refere àqueles horizontes superficiais que estão reagindo com o ambiente superficial atual.

Textura

A natureza física de uma unidade ou componente do regolito de acordo com a proporção das diferentes frações granulométricas (e.g. areia, silte, argila). Para as características físicas relacionadas ao arranjo espacial dos constituintes em microescala e mesoescala, o termo fábrica é preferido.

Vesícula

Um pequeno interstício no formato de uma célula ou bolha.