

GEOLOGIA E PETROGRAFIA DE FORMAÇÕES FERRÍFERAS COM ÊNFASE NA GÊNESE DE CAVIDADES EM SERRA NORTE, CARAJÁS-PA

GEOLOGY AND PETROGRAPHY OF BANDED IRON FORMATIONS WITH EMPHASIS ON CAVES GENESIS IN SERRA NORTE, CARAJÁS-PA

Soraia da Silva Abreu (1,2), Joel Buenano Macambira (1) & Erica da Solidade Cabral (1,2)

(1) Faculdade de Geologia – Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA.

(2) Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica-Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA.

Contatos: soraiaabreu@ufpa.br; joel@ufpa.br; ericacabral@ufpa.br.

Resumo

Esta pesquisa objetiva entender os principais fatores responsáveis pela formação de cavernas associadas a jaspilitos, no platô N4 (jazidas N4WS e N4E), da Unidade Espeleológica Carajás. Estudos petrográficos permitiram observar as mudanças texturais e mineralógicas ocorridas no jaspilito, desde pouco alterado até sua transformação em minério de ferro. Constatou-se que, quanto mais alterada é a rocha, maior o número de micro-cavidades de dissolução, que se concentram nas bandas silicosas. O jaspilito mais alterado apresenta maior quantidade de hematita-2, hematita-3 e goethita e menor quantidade de chert e jaspe. A solubilização da sílica acarreta grande redução de volume da rocha levando, após a dissolução, ao dismantelamento das bandas residuais e até erosão em sub-superfície. Verificou-se que a origem das cavernas está ligada, inicialmente, a processos de dissolução, em que a retirada da sílica foi causada pela percolação de uma solução aquosa descendente. Posteriormente, processos de erosão e colapso, fizeram com que as micro-cavidades de dissolução evoluíssem e alargassem. O próprio bandamento da rocha, além de estruturas como dobras, falhas e fraturas, devem ter servido de conduto para passagem da água meteórica. A atuação de fluidos hidrotermais na gênese das cavernas é descartada, pela falta de evidências nos materiais estudados.

Palavras-Chave: caverna; dissolução; alteração supergênica; Carajás.

Abstract

This research aims to understand the main factors responsible for the formation of caves associated with jaspilite in N4 plateau (N4WS and N4E iron ore bodies), at Carajás Speleological Unit. Petrographic studies allowed to observe the textural and mineralogical changes in jaspilite from least weathered until its transformation into iron ore. It was found that as the rock is more altered, greater is the number of dissolution micro-cavities, which are concentrated in the siliceous bands. The most weathered jaspilite has a greater amount of hematite-2, hematite-3 and goethite and a smaller amount of chert and jasper. The solubilization of silica causes a great reduction in volume of rock leading to, after the dissolution, the dismantling of the residual bands and even erosion in sub-surface. It was verified that the origin of the caves is linked, at first, to dissolving processes and silica removal was caused by downward percolation of an aqueous solution. Thereafter, erosion process and collapse caused the evolution and expansion of dissolution micro-cavities. The banding of the rock, as well as structures such as folds, faults, and fractures, should have served as conduits for flow of meteoric water. The action of hydrothermal fluids in the genesis of the caves is discarded, by the lack of evidence in the studied materials.

Key-Words: cave; dissolution; supergene alteration; Carajás.

1. INTRODUÇÃO

As cavidades na região de Carajás ocorrem em formações ferríferas e/ou lateríticas e foram formadas pela combinação de fatores físico-químicos, pela percolação de água sobre rochas relativamente solúveis, que levam à dissolução e posterior precipitação de minerais. Desse modo, o estudo dessas rochas se reveste de grande

importância, tanto do ponto de vista econômico quanto científico.

O patrimônio espeleológico, principalmente ligado a minério de ferro, ainda é pouco conhecido no país. Os primeiros trabalhos geológicos foram realizados por Tolbert *et al.* (1971), e em 1985 o Grupo Espeleológico Paraense (GEP) fez diversos trabalhos de reconhecimento e mapeamento nas

cavernas localizadas nas encostas dos platôs de Serra Norte, paralelamente aos levantamentos arqueológicos realizados pelo Museu Paraense Emílio Goeldi (Pinheiro *et al.*, 1985, Pinheiro; Maurity, 1988). Até o presente nenhum trabalho de petrografia foi realizado nas cavidades da Serra Norte com a finalidade de entender os processos que podem ter dado origem a cavidades ali existentes. O presente estudo tem o objetivo de entender os principais fatores responsáveis pela gênese das cavidades em Serra Norte, Carajás, e teve como base, estudos petrográficos sistemáticos em formações ferríferas bandadas (BIF, segundo Trendall; Morris (1983), “qualquer rocha sedimentar cuja principal característica química é um conteúdo de Fe anormalmente alto”) buscando posicionar a origem das cavernas na evolução do relevo e na gênese do minério.

As cavidades estudadas fazem parte da Unidade Espeleológica de Carajás (UEC), mais precisamente na Unidade Geomorfológica Serra Norte (Valentim; Olivito, 2011), no município de Parauapebas (Figura 1) sudeste do Estado do Pará, nas minas N4WS e N4E. Ocorrem sobre as rochas do Grupo Grão Pará, principalmente da Formação Carajás, constituída pelos jaspilitos e depósitos de minério de ferro associado.

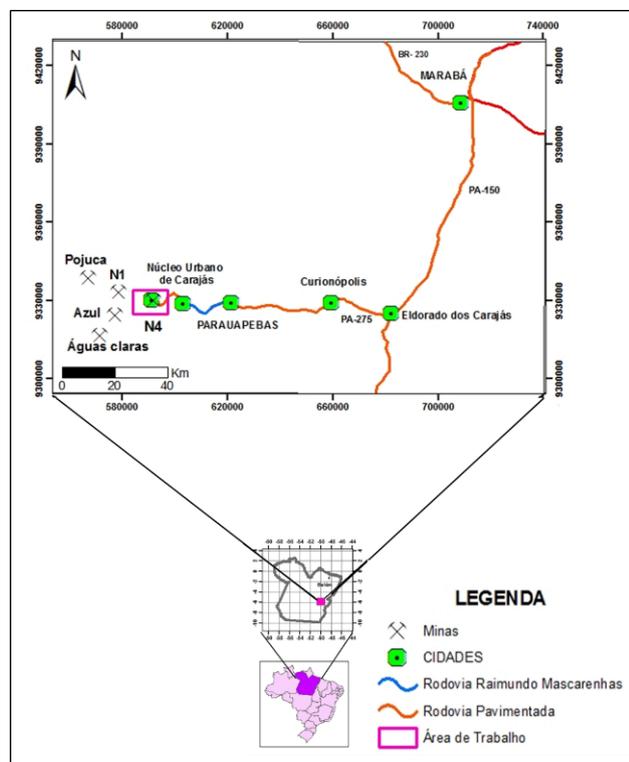


Figura 1: Mapa com a localização e acesso à jazida de ferro N4 com as principais vias terrestres.

2. MÉTODOS

O trabalho foi dividido em três etapas, iniciando com uma pesquisa e revisão bibliográfica sobre a geologia regional de Carajás, geoespeleologia, petrografia de Formações Ferríferas Bandadas e sobre gênese do minério de ferro.

Na segunda etapa foi realizada visita às 5 cavidades (2 na mina N4E e 3 na mina N4WS) para mapeamento, medidas, fotografias e coleta de amostras. Foram coletadas 26 amostras de jaspilito no interior das cavidades, tanto da parede quanto do teto com o objetivo de observar os variados graus de alteração, para se verificar as principais mudanças ocorridas desde a rocha sã até a rocha mais alterada e interpretar os processos ocorridos com a progressão do intemperismo.

A terceira etapa, realizada no laboratório de Petrografia do Instituto de Geociências da UFPA consistiu na análise petrográfica dos jaspilitos, iniciando com a descrição das amostras de mão com o auxílio da lupa binocular. As características microscópicas foram observadas com o auxílio do microscópio petrográfico de luz transmitida e refletida, porém, como se tratavam de rochas intensamente alteradas e ricas em minerais opacos, foram confeccionadas 21 seções polidas e 03 lâminas delgadas. Procurou-se observar principalmente as feições que evidenciavam a alteração da rocha, como as micro-cavidades de dissolução, substituição e neoformação de minerais. Foram feitos levantamentos estatísticos nas duas áreas de estudo, buscando verificar e quantificar tendências na distribuição geográfica das cavidades.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo compreende o corpo N4, em suas porções leste e oeste (minas N4E e N4WS), onde afloram rochas do Grupo Grão Pará, representado pelos basaltos da Formação Parauapebas na base, recobertos pelos jaspilitos e minério de ferro da Formação Carajás, e em seguida pelas rochas máficas com intercalações de tufos, seguidos por sedimentos clásticos e químicos da Formação Igarapé Cigarra (Macambira, 2003) (Figura 2). O relevo é sustentado por uma espessa cobertura laterítica (Canga) onde comumente são observadas as cavidades, seja na interface formação ferrífera/laterita, seja na interface formação ferrífera/rochas máficas (Gonçalves; Sousa, 2001). A Formação Carajás tem espessura de aproximadamente 220 m (Macambira *op. cit.*),

mergulha para oeste e encontra-se quase que totalmente transformada em minério hematítico.

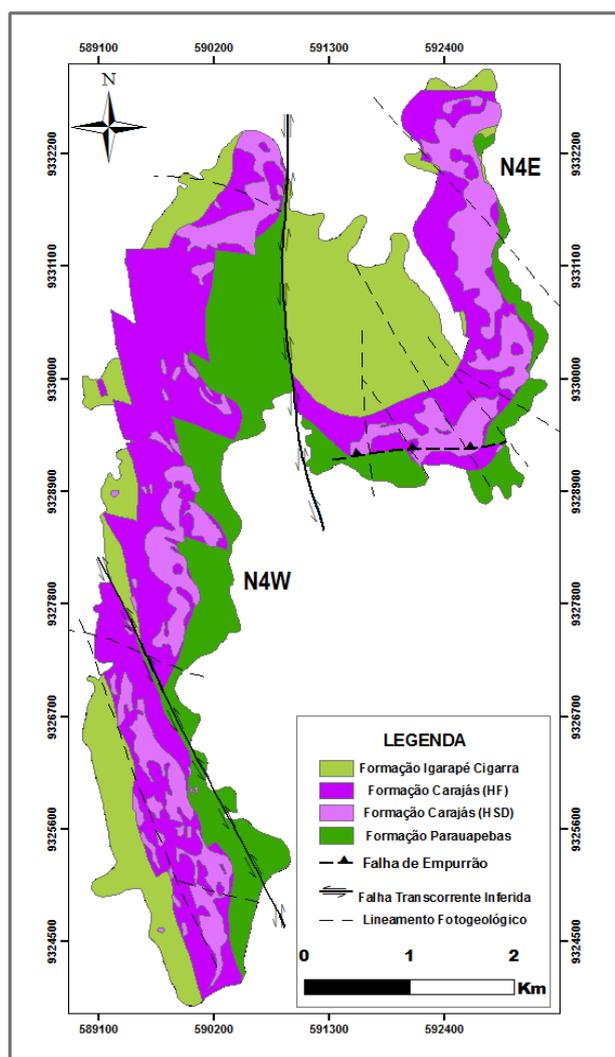


Figura 2: Mapa Geológico do platô N4, corpos N4E e N4WS onde estão localizadas as cavidades estudadas (Modificado de Rezende; Barbosa (1972)). Sendo HF (Hematita Friável) e HSD (Hematita Semi-dura) Rezende e Barbosa (*op. cit.*).

3.2 Petrografia: graus de alteração

A análise petrográfica permitiu a caracterização dos processos de alteração química que atuaram no jaspilito. Acredita-se que o processo de dissolução da sílica seja o fator básico inicial para a formação das cavidades nessa litologia. Desse modo, foram observadas feições que registram as mudanças ocorridas desde a rocha menos alterada, até a rocha mais intensamente alterada para que fosse possível estabelecer a ordem dos eventos, registradas nas mudanças texturais e mineralógicas.

De acordo com a progressão dos processos intempéricos, evidenciados principalmente pela ocorrência de diferentes micro-cavidades de dissolução e formação de novos minerais, Sobrinho

(2012), estabeleceu quatro categorias para agrupar o jaspilito/minério, são elas: A) Jaspilito não alterado, B) Jaspilito pouco alterado, C) Jaspilito alterado e D) Minério (friável e compacto). Alguns outros autores como Meirelles 1986; Lindenmayer *et al.* 2001 e Macambira, 2003 e outros já fizeram esta separação do jaspilito em diferentes categorias, mas pouco discutem sobre a mineralogia do minério. Neste trabalho será usada essa classificação, já que pela análise dos materiais coletados na parede e no teto das cavernas, todas as amostras apresentam-se intensamente alteradas, sendo agrupadas na categoria C), Jaspilito alterado.

3.2.1 Análise Macro e Microscópica das Feições de Alteração

Com o objetivo de identificar os possíveis fatores que resultaram na formação das cavidades, foram feitas comparações das feições primárias do jaspilito em meso e micro escala com as estruturas resultantes dos processos de alteração. Desse modo foi possível analisar a progressão dos fatores intrínsecos ao intemperismo atuante. O acamamento primário do jaspilito independentemente do estágio de alteração permaneceu “preservado”, no entanto, mesmo em nível de amostra de mão, foram observados sinais de formação de novos minerais e micro-cavidades de dissolução desenvolvidas principalmente na banda de minerais silicosos, porém, devido ao intenso grau de intemperismo, até mesmo nas bandas de minerais opacos foram encontradas estas micro-cavidades de dissolução (Figura 03-a e b).

Minerais Secundários

As feições de alteração resultam da atuação dos processos intempéricos impostos à rocha. Essas feições compreendem principalmente as micro-cavidades de dissolução, bem como a formação de novos minerais, que foram analisados para tentar estabelecer os processos que eventualmente originaram as cavernas. Os minerais secundários comumente observados nas amostras são: hematita-2, hematita-3, maghemita e goethita.

A identificação de diferenças texturais marcantes nos cristais de hematita, permitiram classificá-las em três tipos distintos: hematita-1, -2 e -3; A hematita-1, juntamente com o chert e o jaspe são os minerais mais comuns no jaspilito, compõe a massa criptocristalina, de cor branca acinzentada (sob luz refletida), muito abundante nas bandas de óxidos de ferro, é caracteristicamente sedimentar e primária. A hematita-2 (secundária), é formada pelo

processo de martitização da magnetita. Neste processo a magnetita sofre modificação química, transformando-se, às vezes primeiramente no mineral de maghemita (forma meta-estável), ou mesmo transforma-se diretamente para hematita, porém preservando seu hábito cristalográfico octaédrico original. Cristais bem formados, muito finos, aparentemente com a forma de finos cristais alongados, com hábito placóide que ocorrem geralmente preenchendo micro-cavidades, fraturas ou substituindo a goethita em suas bordas correspondem à hematita-3 (Figueiredo e Silva, et al. 2008).

A maghemita, forma meta-estável da hematita, forma-se pelo processo de martitização, ou seja, alteração da magnetita, com substituição para maghemita no centro e hematita-2 nas bordas (Figueiredo e Silva, op. cit.), como citado anteriormente. Em alguns casos foi observado que a magnetita foi substituída diretamente para hematita-2, sem passar pelo seu estágio meta-estável (Figura 03-c). Em alguns casos a forma octaédrica da magnetita foi preservada, resultando nos pseudomorfos de hematita, porém, nas situações em que a alteração foi intensa, até os pseudomorfos de hematita encontram-se em fase avançada de dissolução (Figura 03-d).

A hematita-3 é um dos minerais secundários mais comuns e apresenta-se na forma de cristais alongados, prismáticos ou tabulares, que estão mais concentrados nas bandas de jaspe (Figura 03-e), preenchendo os espaços deixados por ele. Às vezes, estes cristais ocorrem nas bordas de cristais de goethita (Figura 03-f) ou como preenchimento de microfaturas ou vesículas causadas pela dissolução da sílica. A goethita também é um mineral secundário abundante, principalmente nas amostras mais intemperizadas já que a mesma se forma pela alteração da hematita. Foi comumente observada nas bordas de hematita, evidenciando o processo de substituição, ou preenchendo fraturas ou micro-cavidades de dissolução, indicando seu caráter secundário, geralmente com hábito colóide (Figura 03-f).

Micro-Cavidades de Dissolução

As micro-cavidades de dissolução resultam dos processos de lixiviação dos minerais menos estáveis, como o chert e o jaspe. O tamanho, as formas e seu padrão de distribuição nas bandas, são resultado da progressão dos processos intempéricos, ou seja, quanto maior o grau de alteração da rocha,

maiores serão as micro-cavidades e tenderão a ser arredondadas e coalescidas e a se distribuir também nas bandas menos solúveis.

As análises petrográficas permitiram observar que, primeiramente, as micro-cavidades se desenvolvem nas bandas ricas em sílica, ou nas lâminas e lentes silicosas dentro da banda de opacos. O seu desenvolvimento ocorre do centro para as bordas, ou seja, primeiro na porção rica em chert e depois nas porções ricas em jaspe (Figura 03-g). Essas afirmações foram confirmadas pela observação do desvio da rota de dissolução ao encontrar os minerais opacos, indicando sua maior resistência à dissolução (Figura 03-h). À medida que as bandas silicosas vão sendo lixiviadas, maiores serão os "vazios" de dissolução por onde a água irá percolar, sendo assim, até mesmo as bandas opacas podem ser dissolvidas. À medida que esses processos evoluem, maiores serão os diâmetros dos "vazios" de dissolução, devido à união de duas ou mais micro-cavidades (Figura 03-d), desenvolvendo-se principalmente na banda silicosa, ou ainda observadas na banda de opacos. A ordem de dissolução dos minerais silicosos é: primeiro o chert, e em seguida o jaspe.

3.3 Dados Geológicos Estatísticos das Cavidades Nas Minas N4WS e N4E

Os dados obtidos nas três cavidades estudadas em N4WS foram comparados com informações de 48 cavidades (Carste, 2011) que ocorrem nessa área para correlações estatísticas. Vale lembrar que na área existe um número maior de cavidades, no entanto essas 48 foram selecionadas por localizarem-se em porções em que havia maiores informações geológicas e topográficas disponíveis (Rezende; Barbosa, 1972).

Cerca de 92% das cavernas encontram-se desenvolvidas na Formação Carajás, sendo que 6% localizam-se na Formação Igarapé Cigarra e apenas 2% inserem-se na Formação Parauapebas. A tabela 01 mostra as quatro classes de cavernas em Formações Ferríferas, excluindo-se as 4 que ocorrem na canga química (produto de alteração de basalto) ou ocorrem exclusivamente em rocha máfica.

A mesma classificação de cavidades foi feita para N4E, analisando 57 das 61 cavidades (Carste, op. cit) (excluindo-se 4 pelo mesmo critério anterior) (Tabela 2).

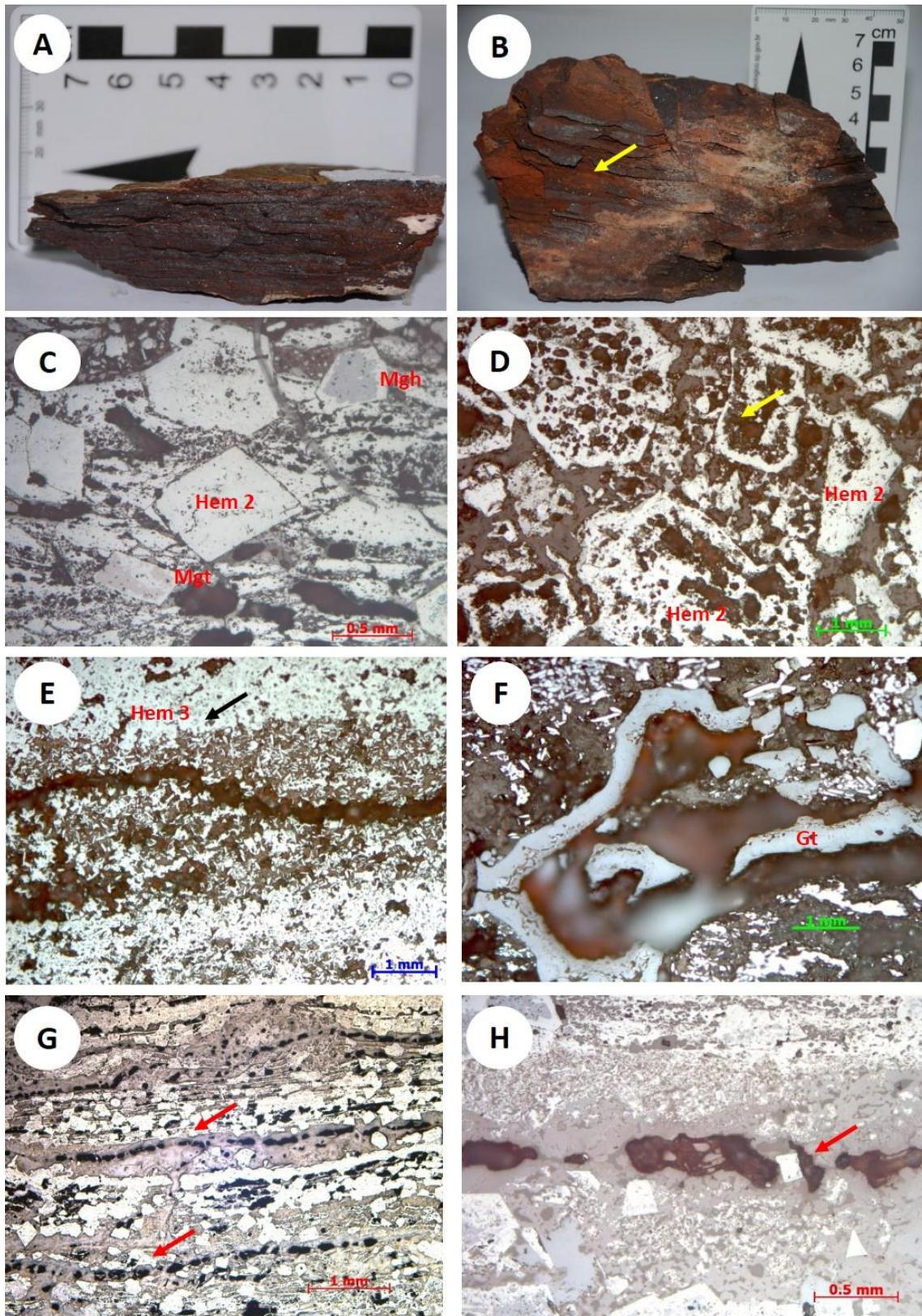


Figura 03: (A) Acamamento primário do jaspilito, com poucas feições de alteração; (B) Intensa dissolução da sílica e muito menor dos opacos, indicados pela seta; (C) Fotomicrografia mostrando ao centro cristal de magnetita totalmente substituído pela hematita-2, acima cristal de magnetita/maghemita substituído pela hematita nas bordas. Abaixo hematita substituindo diretamente magnetita a partir das bordas; (D) Feições de dissolução em pseudomorfos de hematita, indicados pela seta; (E) Fotomicrografia mostrando cristais de hematita-3, indicados pela seta; (F) Goethita com hábito coliforme preenchendo microcavidades, notar que está sendo substituída por hematita-3 nas bordas; (G) Micro-cavidades de dissolução (cinza escuro) alinhadas na banda de jaspe, principalmente no centro (chert), indicadas pela seta; (H) Micro-cavidades de dissolução alongadas e irregulares, notar o desvio da rota de dissolução causado pelo cristal de hematita-2, indicado pela seta. Luz refletida. Nicóis //.

Tabela 01: Classificação das Cavidades desenvolvidas em Formação Ferrífera na mina N4WS.

Litotipo/Classificação	Quantidade	%
Teto e parede de Jaspilito	19	43
Teto e parede de Canga de minério	2	5
Teto de Canga e parede de jaspilito	22	50
Mista (parede de jaspilito e teto ora de jaspilito ora de canga)	1	2
Total	44	100

Tabela 02: Classificação das Cavidades desenvolvidas em Formação Ferrífera na mina N4E.

Litotipo/Classificação	Quantidade	%
Teto e parede de Jaspilito	17	30
Teto e parede de Canga de minério	7	12
Teto de Canga e parede de jaspilito	33	58
Total	57	100

O relevo em N4WS apresenta duas feições: o topo e a borda do platô, sendo que a distribuição das cavernas não é homogênea nessas duas porções. Para quantificar essa diferença foi calculada a área total de N4WS (apenas da parte estudada) e estabelecidas às áreas de borda e topo do platô para calcular a densidade de cavidades por km² encontrada nessas feições. A delimitação das áreas foi feita nos locais em que haviam informações geológicas disponíveis, retiradas do mapa de Rezende; Barbosa (1972), porém há também ocorrência de cavidades nas porções médias e inferiores das encostas que não foram levadas em consideração para tais cálculos.

Em N4WS ocorrem 48 cavernas em uma área total de 2 km², sendo que a área correspondente à borda do platô é de 1 km², resultando numa densidade de 39 cavidades por km². Nas porções do topo do platô, com área também de 1 km², a densidade é de 9 cavidades por km² (Figura 04).

Esses dados mostram que as áreas de topo de platô, concentram 9% das cavidades, enquanto nas regiões de borda a concentração chega a 81%, cerca de 9 vezes mais.

A mesma metodologia usada para o cálculo da densidade em N4WS também foi usada em N4E, onde foram selecionadas 30 cavidades distribuídas em uma área total de 1 km². Feitos os cálculos proporcionais verificou-se que na borda do platô concentra-se 90% das cavidades enquanto no topo encontra-se apenas 10% (Figura 05), ou seja, nas bordas existem 9 vezes mais cavernas que no topo. Isso mostra que a exposição dessas cavidades, assim como em N4WS, podem estar relacionadas aos processos de erosão das encostas dos platôs, à

medida que há o colapso das encostas, cavidades já formadas, principalmente as que se localizam nas porções mais laterais do relevo, são expostas à superfície.

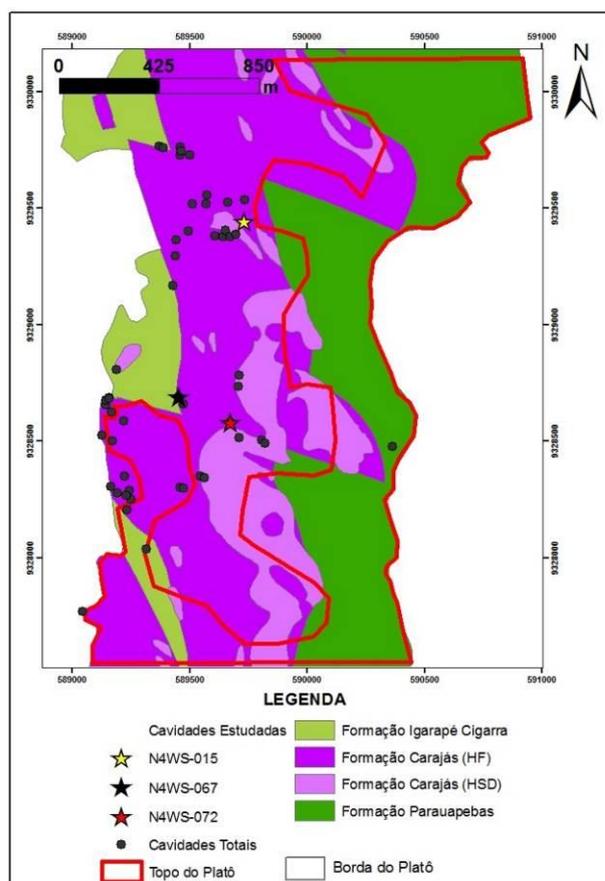


Figura 04: Mapa de N4WS mostrando a densidade de cavidades no topo (delimitado pela linha vermelha) e nas bordas dos platôs (área restante, maior densidade). Sendo HF (Hematita Friável) e HSD (Hematita Semi-dura). Rezende; Barbosa, 1972.

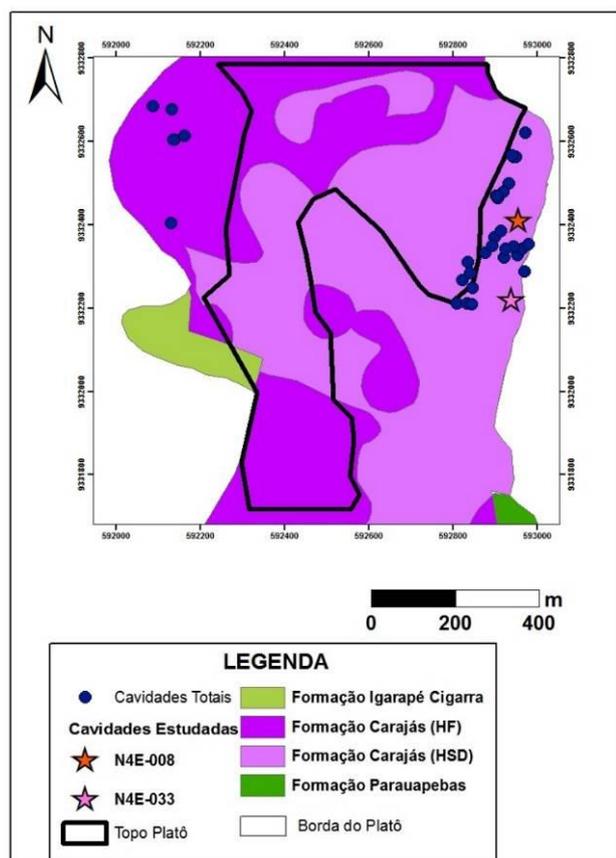


Figura 05- Mapa mostrando a distribuição de cavidades no topo e nas bordas do platô (área restante, maior densidade) em N4E (delimitado pela linha preta). Sendo HF (Hematita Friável) e HSD (Hematita Semi-dura). Rezende; Barbosa, 1972.

4. DISCUSSÃO

Pinheiro & Maurity (1988), estudando as grutas da Serra dos Carajás apontaram dois mecanismos principais para a formação das cavidades. No primeiro, os processos químicos prevalecem estando diretamente ligados à formação das lateritas ferruginosas. O segundo seria marcado pela ação dos fatores mecânicos, onde os processos físicos atuam sobre as rochas que se encontram fragilizadas pelo ataque químico anterior. Pelas análises feitas das cavidades em N4WS e N4E, tanto em macro como em micro escala, acredita-se que há a atuação desses diferentes processos na geração das cavidades. Os fatores químicos e físicos atuantes serão abordados separadamente a seguir.

4.1 Processos Químicos (dissolução)

As análises petrográficas dos jaspilites permitiram verificar evidências dos processos de dissolução sofridos pela rocha. Assim foi possível identificar pequenas cavidades que se distribuem ao longo das bandas do jaspilito, permitindo fazer inferências quanto à sequência de dissolução dos

diferentes minerais, além de permitir identificar a sequência de alteração e substituição que se tornavam mais nítidas quanto maior o grau de alteração da rocha.

Além da dissolução, foram constantemente observadas feições de alteração e substituição de minerais, como a alteração da magnetita para maghemita e finalmente para hematita-2, além de goethita substituindo a hematita, ou hematita-3 substituindo goethita secundária. O fato das microcavidades de dissolução se concentrar preferencialmente nas bandas silicosas (chert e jaspe), indica que essa banda é a primeira a ser dissolvida, o que pôde ser confirmado também pelo desvio da rota de dissolução ao encontrar os minerais opacos presentes nessa banda. Mesmo entre as variedades de quartzo presentes no jaspilito foi atestada uma diferença de resistência à lixiviação.

Sobrinho (2012) estabeleceu a seguinte sequência: chert, quartzo granular e jaspe. Essa autora acredita que o acúmulo de cavidades nas regiões outrora ricas em chert, o desvio que muitas vezes a “rota de corrosão” faz ao encontrar o jaspe e sua maior eficácia nos níveis de chert e quartzo granular, levam a crer que o chert, uma forma de quartzo micro a criptocristalino relativamente mais “puro” é menos resistente à dissolução do que o jaspe. Ela diz que esta característica pode estar diretamente relacionada à impregnação no jaspe por hematita finamente granulada. Todavia, o chert mostra ainda maior susceptibilidade à alteração quando comparado ao quartzo granular. Esta característica poderia ser explicada pela constatação feita por Dorr (1964). De acordo com este autor, grãos de quartzo com tamanhos maiores que 0,1 mm têm solubilidade reduzida. Outra justificativa dada pela autora seria o posicionamento do jaspe na banda de sílica, mais próximo do contato com as bandas de opacos, enquanto a sílica “pura” (chert e quartzo granular) ocupa a parte central da banda. Possivelmente, as camadas sobre e sotopostas de opacos, menos permeáveis, “protegeriam” mais o jaspe, canalizando a maior parte do fluido para a região central da banda silicosa.

A saída da sílica por processos de lixiviação ocasionados pelo intemperismo químico do jaspilito pode reduzir drasticamente o volume da rocha (Ribeiro, 2003), esse processo pode ser responsável inicialmente pela formação das cavidades em Serra Norte. O clima equatorial da região é muito favorável à ação do intemperismo químico, ocasionado pelas altas temperaturas e elevada pluviosidade. Redução de 30 a 50 % do volume do jaspilito (Ribeiro, *Op. Cit*) é suficiente para formar,

pequenas, médias ou até mesmo grandes cavidades, pois essa redução inicial pode ser acompanhada por colapsos erosivos posteriores em que dois pequenos "vazios" ou mais podem se unir, evoluindo para a formação de grandes salões ou galerias dentro das cavidades, do mesmo modo como foi visto nas figuras do tópico de petrografia, onde as pequenas cavidades de dissolução a nível microscópico se unem e alargam seus tamanhos.

Será abordado mais adiante que a gênese das cavidades está intimamente ligada com os processos de formação do minério. Na literatura a hipótese de formação do minério por substituição hidrotermal dos minerais de ganga, ou seja, por hidrotermalismo, é bastante discutida (Lobato *et al.* (2005), no entanto, não foi observado nos diferentes litotipos estudados, evidências mineralógicas que comprovassem a passagem de soluções aquecidas, portanto a hipótese hidrotermal foi descartada, sendo mais coerente a hipótese de alteração supergênica, como descrito a cima.

4.2 Processos Físicos (erosão e colapso)

À medida que os processos intempéricos de dissolução alteram e fragilizam as rochas, processos de erosão e colapso entram em cena para reequilibrar o sistema compensando a perda de volume. A perda de volume é acompanhada pelo desmantelamento das bandas residuais ou mesmo erosão em subsuperfície. O colapso também pode ser atribuído à fragilidade e instabilidade da zona de baixa densidade, essa zona é formada pela saída do material solúvel. Ribeiro (2003) afirma que parte do volume do material dissolvido e removido, resulta em colapso topográfico, enquanto o restante transforma-se em vazios ou poros na zona de alteração. O autor acrescenta que durante a acomodação, as bandas residuais preenchem espaços vazios deixados pela lixiviação das bandas removidas em solução e buscam o equilíbrio isostático.

Simmons (1963) acredita que quando a inclinação da encosta do vale é acentuada, a rocha intemperizada e o material detrítico não cimentado são rolados encosta abaixo, expondo pequenas cavidades. Pinheiro & Maurity (1988) por sua vez, apontam que no segundo mecanismo de formação das cavidades, onde atuam os processos físicos, a variação de nível do lençol freático, provocado por alteração do relevo em decorrência de movimentos epigenéticos e/ ou variações climáticas, favoreceriam a expansão de pequenas cavidades formadas no estágio anterior de dissolução. Assim

gradativamente cresceriam os espaços que formariam as galerias e salões.

4.3 As Cavidades na Evolução do Minério

Os dados estatísticos do capítulo anterior mostraram que mais de 90% das cavidades, tanto em N4WS quanto em N4E, estão associadas ao jaspilito, mesmo aquelas descritas em canga de minério, pois esta resulta da alteração intempérica do minério, que por sua vez é resultado da alteração do jaspilito.

É conveniente afirmar que a evolução do minério ocorre concomitante à gênese das cavidades, pois como foi mostrado, os mecanismos envolvidos nos primeiros estágios de formação das cavidades (dissolução da sílica) são os mesmos processos de formação do minério. Alguns autores (Morris, 1980,1985, Harmsworth, *et. al.*, 1990, Dardenne; Schobbenhaus, 2001, Costa, 2006), sugerem que a formação do minério friável de Carajás ocorre por lixiviação progressiva da sílica por percolação de águas meteóricas descendentes atrelado também à oscilação da água subterrânea, portanto por processos de enriquecimento supergênico.

Sobrinho (*op cit*), desenvolveu um esquema interessante para mostrar a evolução da formação do minério de ferro em Carajás (figura 06), que pode ser usado para contar a história de formação das cavidades, que pode ser concomitante tanto à evolução do minério, quanto à evolução do relevo.

A autora explica que a exposição da camada de jaspilito e de suas encaixantes, Formação Igarapé Cigarra e Formação Parauapebas, dá início ao processo de alteração pelo intemperismo (Figura 06-a). A alteração dos basaltos produz saprolito mais resistente do que o produto gerado pela alteração dos jaspilitos, causando relevo depressivo sobre as BIFs da Formação Carajás. Lagos são desenvolvidos sobre essa superfície (Figura 06-b). A partir do momento que há instalação de uma rede de drenagem associada à formação dos lagos, pode-se dar início também à formação das cavernas, não na superfície ou nas bordas do relevo como afirmado por alguns autores, mas em sub-superfície (Figura 06-c). Ao longo do perfil de alteração, onde as soluções são canalizadas por fraturas ou falhas e, neste caso, pelo próprio bandamento, o mergulho das camadas pode favorecer ainda mais a infiltração da água. Na área do platô N4, as camadas de jaspilito têm mergulhos que alcançam 40° para oeste. Esse fato foi abordado nos trabalhos de Ribeiro (2003) que afirma que quanto à atitude do bandamento ou da foliação, é provável que estratos ou foliação com mergulhos acentuados favoreçam a infiltração de água e a dissolução dos minerais.

O fluxo contínuo de água durante a estação chuvosa é possivelmente facilitado por amplas zonas de saída, pois conforme a evolução do relevo prosseguia, a incisão dos cursos d'água aumentava, mantendo a eliminação do material (Sobrinho, 2012). A autora conclui que com a evolução do

processo de enriquecimento supergênico uma crosta laterítica foi desenvolvida sobre o minério e saprolito dos basaltos. A maior resistência da canga de minério e o contínuo processo de intemperismo causou a inversão do relevo (Figura 06-c).

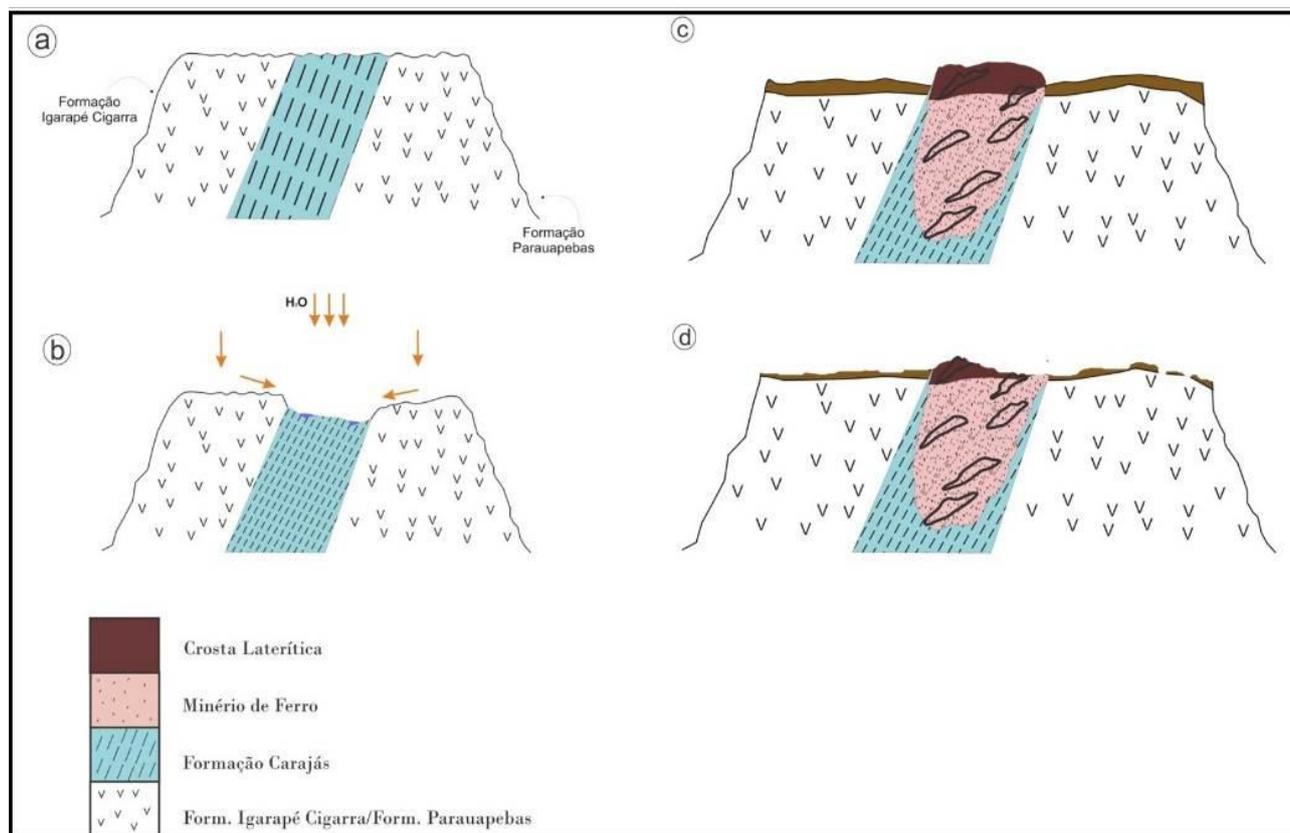


Figura 06: (A) Exposição do Grupo Grão Pará à superfície, e à intensa ação do intemperismo; (B) Alteração dos basaltos produz saprolito mais resistente do que o produto gerado pela alteração dos jaspilitos, causando relevo depressivo sobre as BIFs da Formação Carajás. Lagos são desenvolvidos sobre essa superfície; (C) A evolução do processo supergênico desenvolveu uma crosta laterítica sobre o minério, mais resistente do que a laterita química desenvolvida sobre o saprolito basáltico, ao mesmo tempo há evolução das cavernas juntamente com a evolução do relevo e do minério. Essa diferença de resistência causou a inversão do relevo e preservou o minério de uma possível ação erosiva após seu desenvolvimento; (D) À medida que os processos de denudação mais recentes ocorrem, cavidades outrora escondidas são expostas à superfície e cavidade com cotas mais altas tendem a apresentar teto de canga e parede de jaspilito. (Modificado de Sobrinho, 2012).

4.4 As Cavidades na Evolução do Relevo

A formação das cavidades pode estar relacionada tanto com a evolução do minério quanto a evolução do relevo, destaca-se dois momentos: No primeiro, quando os lagos são instalados sobre a Formação Ferrífera, há condições propícias à formação do minério e das cavidades, ao mesmo tempo em que o relevo acima das camadas de BIF's evolui de depressivo para um relevo em forma de platôs, sustentados por uma crosta laterítica como são observados hoje em dia.

Por outro lado, num segundo momento, quando as cavidades já estão completamente formadas em subsuperfície, principalmente aquelas constituídas por teto e parede de jaspilito, a evolução

do relevo terá o papel de expor suas entradas nas encostas. À medida que os processos de denudação mais recentes evoluem, o nível de erosão vai se tornando cada vez mais profundo, rebaixando o relevo a cotas altimétricas cada vez menores, e expondo cavernas outrora escondidas (Figura 06-d). Essa constatação foi confirmada pelos dados estatísticos do item anterior que mostraram que 81% das cavidades em N4WS e 90% em N4E ocorrem na borda dos platôs. Isso nos leva a pensar que os processos de colapso das encostas apenas expõem cavidades já formadas por processos intempéricos mais antigos, principalmente as cavidades formadas à cota mais elevada ou nas porções mais laterais dos platôs (Figura 07).

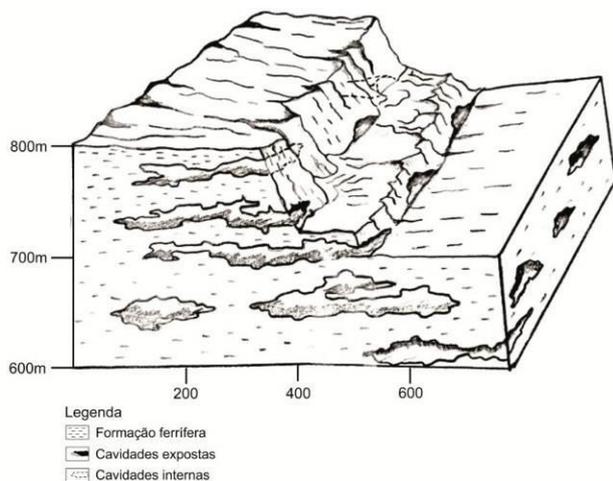


Figura 07: Bloco diagrama esquemático, mostrando que o colapso das encostas e o desgaste no topo do platô podem expor cavidades já formadas principalmente as que se localizam em cotas altimétricas mais elevadas ou nas laterais dos platôs.

A tabela 03 mostra uma forte tendência das cavidades constituídas com teto de canga e parede de jaspilito, se concentrarem principalmente nas cotas mais elevadas, acima de 600m, ou seja, pode-se supor que inicialmente parte das cavidades, com exceção das cavidades em rocha máfica, apresentavam tanto parede quanto teto de jaspilito, mas à medida que o intemperismo e a erosão agiam sobre as porções mais elevadas dos platôs, os tetos que anteriormente eram de jaspilito ou de minério foram gradativamente dando lugar ao teto de canga, produto de seu intemperismo.

Os processos que hoje estão expondo as cavidades são os mesmos que nesse momento estão formando novas em profundidade. Essa constatação já havia sido feita por Maurity; Kotschoubey (1994), quando sugeriram a presença de “cavidades ocultas, localizadas sobretudo, no domínio das formações ferríferas, abaixo da canga hematítica, e detectadas somente através de sondagem e durante as campanhas de prospecção”.

Tabela 03: Mais de 80% das cavidades com teto de canga e parede de jaspilito em N4WS se concentram nas porções com cotas altimétricas superiores a 600m.

Litologia	Topografia	%
Teto e parede de Jaspilito	500 a 550	11
	550 a 600	21
	600 a 650	47
	650 a 700	21
Teto de Canga e parede de jaspilito	550 a 600	18
	600 a 650	32
	650 a 700	50

4.5 Espeleogênese

Foram verificados alguns fatores que podem estar ligados à gênese e desenvolvimento das cavidades (Relatório interno do PROCAV, 2012), são eles:

- Litológico:** rochas naturalmente mais suscetíveis à dissolução que teriam maior possibilidade de desenvolver cavernas.
- Estrutural:** estruturas tais como dobras, falhas, fraturas, contatos litológicos, etc. desenvolveriam caminhos preferenciais para as soluções, facilitando a percolação e dissolução em determinadas zonas, cujo arranjo espacial seria propício para o desenvolvimento de cavidades.
- Hidrológico (ou Hidrogeológico):** o controle da infiltração, percolação, oscilação do lençol freático e presença de zonas menos permeáveis poderia favorecer a concentração da migração de água em determinados locais, onde a dissolução seria mais efetiva e haveria o desenvolvimento das cavidades.
- Estratigráfico:** haveria níveis estratigráficos mais propícios à dissolução dentro de uma determinada camada de rocha ou de uma formação litoestratigráfica. Poderia ser uma mudança na composição mineral ou na textura, naturalmente limitada a esse nível.
- Abatimento:** a dissolução de minerais provoca diminuição de volume em uma rocha sendo alterada pelo intemperismo. Caso essa dissolução alcance um volume expressivo (~30 a 40%) de rocha, certamente haverá um re-arranjo espacial para compensar a perda de volume, causando o abatimento e a formação de “vazios”.
- Rocha “seladora”:** a presença de rochas pouco permeáveis sobre rochas relativamente mais permeáveis é uma situação favorável ao desenvolvimento de cavernas.

É importante destacar que nenhum dos fatores deve atuar isoladamente na formação das cavidades, ao contrário, a combinação de um ou mais fatores, com o predomínio de um ou outro são importantes no desenvolvimento das mesmas.

5. CONCLUSÕES

Foi constatada a ordem de dissolução dos diferentes tipos de minerais silicosos: primeiro o chert e em seguida o jaspe, fato evidenciado pelo maior número de cavidades de dissolução desenvolvidas principalmente nas bandas silicosas e pelo desvio da rota de dissolução dos minerais

opacos. Dependendo da intensidade do intemperismo sofrido pela rocha, até mesmo os minerais opacos sofrem dissolução, no entanto há substituições e formação de minerais secundários, como hematita-2 e -3 e goethita. Há presença marcante de maghemita, substituindo a magnetita pelo processo de martitização. Após os processos de dissolução da sílica há grande redução de volume da rocha, levando ao desmantelamento das bandas residuais e mesmo erosão em subsuperfície. O mergulho das camadas e o próprio bandamento podem ter favorecido a percolação da água por esses caminhos preferenciais. A evolução das cavidades se dá concomitante à evolução do minério e do relevo, mas em um momento posterior (processos de denudação recentes) a evolução do relevo, terá o papel de expor as cavernas que já se encontram formadas em sub-superfície, além de colaborar para a formação de outras. As cavernas expostas hoje podem ser apenas alguns exemplares de centenas de cavernas escondidas dentro dos platôs em que os processos erosivos ainda não foram suficientes para expô-las.

REFERÊNCIAS

- CARSTE. Consultores associados-VALE/SA. Geoespeleologia e Análise de Relevância /Bioespeleologia e Análise de Relevância. **Relatório técnico**. 2011.
- COSTA, U. A. P. Avaliação dos processos geradores do minério de ferro da Serra Norte de Carajás, sudeste do Pará. Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará. **Dissertação de mestrado**. P 85. 2006.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. Depósitos minerais no tempo geológico e épocas metalogenéticas. In **Geologia, Tectônica e Recursos minerais do Brasil**, CPRM, Brasília, p.365-378. 2001.
- DORR, J. V. N. Supergene Iron ore of Minas Gerais, Brazil – **Economic Geology**, vol 59. p. 1203-1240. 1964.
- FIGUEIREDO E SILVA R.C., LOBATO L.M., ROSIÈRE C.A., HAGEMANN S.G, ZUCCHETTI M., BAARS F.J., MORAIS R., ANDRADE I. Hydrothermal origin for the jaspilite-hosted, giant Serra Norte iron ore deposits in the Carajás Mineral Province, Para State, Brazil. In: Hagemann, S.G., Rosière, C.A., Gutzmer, J., and Beukes, N.J. (eds.), BIF-related high-grade iron mineralization. *Reviews in Econ. Geo.*, 15: 255-290. 2008.
- GONÇALVES. D. F; SOUSA. D.L. Aspectos morfológicos de Espeleotemas em feições pseudocársticas da região de Carajás-PA. **Anais do 31º CBE**. p. 141-145. 2011. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais31cbe/31cbe_141-145.pdf.
- HARMSWORTH, R. A., KNEESHAW, M., MOSSIS, R. C., ROBINSON, C. J. and SRIVASTAVA, P. K. – BIF Derived Iron of Hamersley Province. **Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea** p. 617-642. 1990.
- LINDENMAYER Z. G., LAUX J. H., TEIXEIRA J. B. G. Considerações sobre a origem das Formações Ferríferas da Formação Carajás, Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geologia**, 31(1):21-28. 2001.

Conclui-se, portanto, que o fator básico inicial responsável pela formação das cavernas e do minério é o processo de dissolução da sílica, que acarreta em redução de volume da rocha de 30 a 50%, dependendo da espessura inicial da banda silicosa pela percolação de águas por descenso, ou seja, por processos de alteração supergênica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), à Universidade Federal do Pará (UFPA), pela infraestrutura fornecida, à VALE S.A pelo suporte financeiro à pesquisa e concessão de bolsa de estudo, aos Geólogos da VALE que nos auxiliaram em campo Carlos Teles e Rafael Guimarães, ao Geólogo do galpão de amostragem Julielson Camelo, e aos coordenadores do projeto de pesquisa PROCAV Daniele Freitas Gonçalves e Antônio Emídio Santos Júnior por todo apoio e empenho dedicados ao projeto.

- LOBATO, L. M; FIGUEREDO E SILVA, R. C.; ROSIÈRE, C. A.; ZUCCHETTI, M.; BAARS, F. J.; PIMENTEL, M; RIOS, F. J.; SEOANE, J. C. S.; MONTEIRO A. M. Hydrothermal origin for the iron mineralization, Carajás Province, Pará State, Brazil. : Iron Ore 2005, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, **Publication Series** v. 8 (2005), Australia, p. 99-110. 2005.
- MACAMBIRA J.B. *O ambiente deposicional do Grupo Grão Pará-Carajás*. 212 p. Campinas, Universidade de Campinas, Instituto de Geociências, (**Tese de Doutorado**). 2003.
- MAURITY, C.W.; KOTSCHOUBEY, B. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 - Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarsificação, espeleotemas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Série Ciências da Terra, n 7, p. 331-362, 1994.
- MEIRELLES, M.R. Geoquímica e Petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás-Pa. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, **Tese de Mestrado**, 150 p. 1986.
- MORRIS, R C, A. Textural and mineralogical study of the relationship of iron ore to Banded iron-formation in the Hamersley iron province of Western Australia, **Economic Geology**, 75:184-209. 1980.
- MORRIS, R.C. Genesis of iron ore in Banded Iron Formation by supergene and supergene-metamorphic processes – A conceptual model. In: WOLF, K.H. (ed). Handbook of Stratabound and Stratiform Ore Deposits. Amsterdam, **Elsevier**. v.13, p. 73-235. 1985.
- PINHEIRO, R.V.L; MAURITY, C.W. Considerações Preliminares sobre a Espeleologia da Serra dos Carajás (PA). Grupo Espeleológico Paraense - GEP. **Relatório inédito**, p.38, 1985.
- PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W. As cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás (PA) – Brasil. In: Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe, 1., 1988, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Espeleologia, p. 179-182,1988.
- Relatório Interno do ProCav, Vale, S.A. 2012.
- REZENDE, N.P; BARBOSA, A. L. M. Relatório de pesquisa de minério de Ferro, distrito ferrífero da Serra dos Carajás – Estado do Pará. **Relatório Final**. 1972.
- RIBEIRO, D. T. Enriquecimento supergênico de formações ferríferas bandadas: estruturas de colapso e desordem. 123 p. 2003. **Tese de Doutorado-UFRJ**.
- SIMMONS, G. C. Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **The National Speleological Society Bulletin** 25:66-72, 1963. (Traduzido por Augusto Auler).
- SOBRINHO, F. C. Contribuição ao estudo da Gênese do minério de Ferro na mina N4E, Carajás. **Trabalho de Conclusão de Curso** -Universidade Federal do Pará. 95 p. 2012.
- TRENDALL, A. F; MORRIS, R. C. Iron formation: facts and problems. Amsterdam, **Elsevier**, (Developments in Precamb. Geol., 6). 1983.
- TOLBERT, G. E.; TREMAINE, J. W.; MELCHER, G. C.; GOMES, C. B. The recently discovered serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil. **Economic Geology**, 66: 985-994, 1971.
- VALENTIM, R. F; OLIVITO, J. P. R. Unidade espeleológica Carajás: delimitação dos enfoques regional e local, conforme metodologia da IN-02/2009 MMA. **Espeleotema**. v.22, n. 1, p.41-60, 2011. Disponível em: www.cavernas.org.br/espeleo-tema/espeleo-tema_v22_n1_041-060.pdf.



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp