

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Instituto de Geociências

Departamento de Geografia

Anarda Luísa Sousa Simões

**FEIÇÕES TUBULARES COMO MARCADORES DE PROCESSOS DE  
DEGRADAÇÃO DE COURAÇAS FERRUGINOSAS**

Belo Horizonte

2022

Anarda Luísa Sousa Simões

**FEIÇÕES TUBULARES COMO MARCADORES DE PROCESSOS DE  
DEGRADAÇÃO DE COURAÇAS FERRUGINOSAS**

**Versão final**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de concentração: Análise Ambiental  
Linha de pesquisa: Geografia Física

Orientador: Prof. Dr. Fábio Soares de Oliveira  
Coorientadora: Profa. Dra. Angélica Fortes Drummond Chicarino Varajão

Belo Horizonte

2022

S593f  
2022

Simões, Anarda Luísa Sousa.

Feições tubulares como marcadores de processos de degradação de  
cauraças ferruginosas [manuscrito] / Anarda Luísa Sousa Simões. – 2022.  
105 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Fábio Soares de Oliveira.

Coorientadora: Angélica Fortes Drummond Chicarino Varajão.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento  
de Geografia, 2022.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Linha de pesquisa: Geografia Física.

Bibliografia: f. 93-105.

1. Solos – Degradação – Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. 2. Latossolos –  
Teses. 3. Ferro – Teses. I. Oliveira, Fábio Soares de. II. Varajão, Angélica Fortes  
Drummond Chicarino. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento  
de Geografia. IV. Título.

CDU: 631.4(815.1)

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Tese intitulada *Feições tubulares como marcadores de processos de degradação de couraças ferruginosas*, de autoria da mestranda Anarda Luísa Sousa Simões, apresentada ao Programa de Pós Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia. Área de concentração: Análise Ambiental.


Aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Fábio Soares de  
Oliveira

Assinado de forma digital por  
Fábio Soares de Oliveira  
Dados: 2023.05.16 16:37:10  
-03'00'


---

Prof. Dr. Fábio Soares de Oliveira - UFMG

Documento assinado digitalmente  
 CRISTIANE VALERIA DE OLIVEIRA  
Data: 25/05/2023 10:21:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Cristiane Valério de Oliveira - UFMG

Documento assinado digitalmente  
 GRACE BUNGENSTAB ALVES  
Data: 16/05/2023 17:50:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra Grace Bungestab Alves - UFBA

Belo Horizonte, 18 de Novembro de 2022

*À Tia Vânia, que presenciou o início desse sonho.*

## AGRADECIMENTOS

Nada disso seria possível sem as instituições de Ensino responsáveis por minha formação acadêmica e humana, que me permitiram vislumbrar, ainda que inconscientemente, uma carreira acadêmica. De modo especial, o Colégio Técnico da UFMG, a Universidade Federal de Ouro Preto e a Universidade Federal de Minas Gerais. Meu eterno agradecimento!

Não posso deixar de agradecer também aos governos responsáveis por todas as políticas de fomento à educação, à política de cotas e de investimento massivo nas Universidades, ou seja, os governos de Dilma Rousseff e Luiz Inácio Lula da Silva. Obrigada por enxergarem o poder transformador da educação e por tornarem o ambiente universitário mais plural e democrático.

A Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais por viabilizar financeiramente o projeto “Solos associados a couraças ferruginosas e aluminosas em Minas Gerais: gênese, evolução e implicações ambientais”, contexto no qual este trabalho encontra-se inserido. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa por permitir que eu me dedicasse exclusivamente ao mestrado por quase toda sua duração.

Ao Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto pelo suporte com parte das análises, especialmente ao Laboratório de Microanálises, à Profa. Dra. Gláucia Queiroga e à Debora Vasconcelos. Ao Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa e ao Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais por todo apoio à pesquisa.

Ao Instituto de Geociências da UFMG por, mesmo em tempos desafiadores, não desamparar seus discentes e promover um ensino de qualidade. Obrigada por todas as oportunidades e aprendizado, em especial à Profa. Dra. Cristiane Valério, ao Professor Jonathas Bittencourt e ao Professor Frederico Wagner. Agradecimento especial ao Professor Doutor Adolf Heinrich Horn por ceder parte das amostras, objetos de estudo do trabalho.

Ao PedoGEO por toda a troca, aprendizado e suporte mútuo durante todo esse tempo pandêmico, e ao Sub08 por toda a convicção e experiências únicas! Em especial: Alcione, Lara (Larissa), Mariana, Fabrício, Paula, William e Samuel.

À Profa. Angélica por toda a generosidade, paciência, dedicação e ensinamentos.

E ao Fábio! O melhor orientador que eu poderia receber. Palavras não serão suficientes para agradecer toda a paciência, toda a generosidade, todo o cuidado, todos os ensinamentos pessoais, profissionais e acadêmicos. Foi uma honra! O acaso e o destino foram muito generosos comigo.

## Resumo

Coureaças são formações endurecidas de composição variada e cimentada por óxidos e hidróxidos que, sendo de ferro ou alumínio, são definidas como ferruginosas e aluminosas (Nahon, 1991). Encontram-se frequentemente associadas a fontes de minério de ferro e tanto sua gênese quanto sua degradação são processos que demandam estudos mais aprofundados. Em perfis de solo associados à degradação dessas estruturas encontram-se feições tubulares relacionadas à agentes biológicos, mais especificamente pedotúbulos e estruturas riziformes. O presente projeto se dedica ao estudo dessas feições e se sua origem se encontra vinculada aos mecanismos de degradação superficial da couraça, podendo ser utilizadas como marcadores para tal. Isso se dará através da caracterização, em escala macro e microscópica, das feições tubulares e da compreensão acerca de quais são e como se organizam os minerais que as constituem, resultando ainda na compreensão da gênese dessas feições tubulares, na identificação de marcadores que discriminam sua associação com raízes ou organismos escavadores e, por fim, na elaboração de um modelo de gênese dessas feições, associado à degradação das couraças ferruginosas. As amostras pertencem ao Laboratório de Geomorfologia Aplicada e Gestão Ambiental do Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa, GAGEA/CPMTC e são provenientes dos municípios de Belo Horizonte e Nova Lima, no Quadrilátero Ferrífero, e de Datas, na Serra do Espinhaço. Durante o desenvolvimento do trabalho, foi realizada a caracterização petrográfica, mineralógica, micromorfológica, microquímica e microestrutural. Ao fim dos estudos conclui-se que a assembleia mineralógica é composta primordialmente por óxidos de ferro, principalmente goethita, com hematita subordinada, além de minerais aluminosos, descritos principalmente por lâminas. Foram descritos também processos de degradação e recristalização mineral associados à presença de raízes e suas estruturas associadas. Tal processo resulta em feições ferruginosas, formadas em três fases principais: a primeira delas marcada pela fragmentação de níveis de couraças preexistentes e a formação dos fragmentos observados no arcabouço; a segunda fase marcada pela dissolução de fragmentos, remobilização e reprecipitação de ferro e alumínio com moldes vegetais; e a última delas caracterizada por dissoluções, reprecipitações, fragmentações e transformações pós-deposicionais das



feições tubulares. Para este trabalho aplicou-se microscopia óptica, difração de Raio-X, Fluorescência de Raio-X e Microscopia Eletrônica de Varredura, associada à EDS.

**Palavras-chave:** Couraça. Canga. Quadrilátero Ferrífero. Supergrupo Espinhaço. Pedobioturbação.

## Abstract

Duricrusts consist of hardened surfaces with varied compositions cemented by oxides and hydroxides. If the primary metal in the oxide structure is iron or aluminum, duricrust is known as ferruginous/iron or aluminum duricrust (Nahon, 1991). They often occur in environments associated with iron ore mining. The iron crust's genesis and transformation are complex processes and require further studies. There are tubular and geometrical features related to biological agents described along soil profiles associated with iron crust transformation, specifically pedotubules and rhiziforms structures. This research aims to study these features and their origin, if they could be related to the superficial transformation process that occurred over iron crusts, therefore, being markers of this process. Consequently, the goal is to perform a complete description of tubular features, their organization, and which minerals are present in their structure. In addition, we intent to understand the genesis' process and the records of their relation with termites and roots, resulting in the genetical model associated with iron crust transformation. The tubular features samples are part of a preview collection allocated on the Applied Geomorphology and Environmental Management's Lab on Professor Manoel Teixeira da Costa Research Center (GAGEA/CPMTC), collected in Belo Horizonte and Nova Lima, in Quadrilátero Ferrífero, and Datas, in Serra do Espinhaço. In the end of the present study, is possible to conclude that the mineral assembly is formed by iron oxide, mainly goethite, followed by hematite, and some other oxides, subordinately. Is also possible to describe features of degradation and recrystallization of minerals associated with the presence of roots and complementary structures. The result of this complex process appear as ferruginous structures formed by three different phases: the first one is marked by the fragmentation of pre-existing armor levels and the formation of fragments observed in the framework; the second phase marked by the dissolution of fragments, remobilization and reprecipitation of iron and aluminum with plant molds; and the last one characterized by dissolutions, reprecipitations, fragmentations and post-depositional transformations of the tubular features. The associated techniques are macroscopically description, optical microscope description, X-ray diffractometry, direct and indirect isomorphic substitution analysis and Scanning Electron Microscopy (SEM), associated with Energy Dispersive System (EDS), Backscattered electron (BSE) imaging.

**Keywords:** Duricrust. Iron crust. Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço Supergroup.  
Pedobioturbation.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Imagens de MEV de microorganismos permineralizados. (A) Natureza heterogênea da canga. (B) Biofilme permineralizado próximo às bandas de goethita. (C) Preservação da estrutura da microbiota dentro do biofilme (Levett <i>et al.</i> , 2016).  | 25 |
| <b>Figura 2:</b> Representação hipotética de registros deixados por raízes no solo, o que influencia na porosidade e percolação de água (Gaiser, 1952 <i>apud</i> Pawlik <i>et al.</i> , 2016).<br>.....  | 31 |
| <b>Figura 3:</b> Localização das áreas de estudo. ....  | 35 |
| <b>Figura 4:</b> Coluna estratigráfica Quadrilátero Ferrífero (Alkmin e Marshak, 1998). ...   | 38 |
| <b>Figura 5:</b> Coluna estratigráfica simplificada do Supergrupo Espinhaço (Chemale Jr. <i>et al.</i> , 2011). ....  | 41 |
| <b>Figura 6:</b> (A) Amostras representativas do ESP e (B) Amostras representativas do QF. ....   | 48 |
| <b>Figura 7:</b> Amostras do ESP, destacando: (A) aspecto cônico-cilindro de uma amostra; (B) variação interna de cores, vazio central e aspecto rugoso da textura e (C) cor homogênea e ausência de foliações e bandeamentos visíveis a olho nu. ....  | 49 |
| <b>Figura 8:</b> Amostras do QF, destacando: (A) aspecto arredondado de uma amostra; (B) pequenas lineações concêntricas concordantes com a superfície da amostra e (C) variação interna de cor em uma amostra, sendo avermelhado na borda e amarelada no centro. ....  | 50 |
| <b>Figura 9:</b> Feições observadas ao microscópio óptico sob luz refletida em amostras pertencentes ao ESP, onde observa-se (A) fragmentos de couraças placoidais, (B) grãos de hematita substituídas por goethita, (C) porosidades de formas anômalas preenchidas por hematita, (D) paletas de hematita orientadas, (E) grãos de quartzo preservados, (F) grãos de hematita euédricos. .... | 51 |
| <b>Figura 10:</b> Fragmentos de couraça ferruginosa placoidal preservados em lâminas do ESP (A) dispersas em um cimento; (B) em algumas foram removidos os grãos de quartzo restando óxidos de ferro e porosidade; (C e D) outras preservam a xistosidade incipiente da rocha que as originou. ....   | 52 |
| <b>Figura 11:</b> Estruturas com aspecto alveolar, como septos separados por cavidades não conectadas, pequenas, subarredondadas, formados sob influência do sistema de raízes. Observadas sob luz transmitida (A) (C) (E) a nicóis paralelos (B) (D) (F) e nicóis cruzados, apresentando cores anômalas. ....  | 53 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 12:</b> Registros de estágios mais avançados de alteração da couraça, evidenciado pela formação de (A) nódulos e o (B) aumento da porosidade que tende a aumentar com a coalescência desses nódulos.....  | 54 |
| <b>Figura 13:</b> Diferentes feições descritas em lâminas provenientes do ESP: ( A) diversas fases de sobrecrescimento; (B) preenchimento de cavidades por cimento goethítico denso; (C ) cimentação parcial por goethita; (D) sobrecrescimento de goethita em grãos de hematita; (E) sobrecrescimento em cristais de hematita por hematita e goethita; (F) estruturas boxwork em que o formato do grão é preservado, mas sua composição alterada. ....   | 55 |
| <b>Figura 14:</b> Aspectos gerais das lâminas pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero apresentando arcabouço formado por grãos minerais de diferentes dimensões (A, C), além de fragmentos de couraça (B, D).....  | 57 |
| <b>Figura 15:</b> Feições observadas em lâminas provenientes do QF: (A) evidências dos processos de substituição completa de grãos mas mantendo a forma do mineral; (B) substituição parcial de um mineral; (C) fragmentação e início do processo de substituição, (D) sobrecrescimento de goethita em cristal de hematita e (E)(F) substituição quase completa de um mineral.....  | 58 |
| <b>Figura 16:</b> Evidências de formação de agregados e cimentação por goethita em lâminas do QF: (A) formação incipiente de agregados por coalescência do cimento formando porosidade entre eles; (B) evolução desses agragados com porosidade já preenchida; (D) diferentes estágios de agregação e composição do cimento evidenciada pela diferente coloração. ....  | 59 |
| <b>Figura 17:</b> Feições de sobrecrescimento observadas em lâminas do Quadrilátero Ferrífero: (A) Processos subsequentes de dissolução mineral(1) e cimentação de diferentes composições(2); (B) processos de completa substituição; (C) Formato de um cristal preservado mas seu interior tomado por diferentes fases de dissolução e sobrecrescimento; (D) sobrecrescimento de hematita por goethita; (E) diferentes fases de crescimento de uma mesma composição (F) diferentes tipos de preenchimento e revestimento em porosidades oriundas de atividade animal. .... | 61 |
| <b>Figura 18:</b> Difratoograma de amostra proveniente do QF evidenciando a presença de caulinita, goethita e hematita.....   | 63 |
| <b>Figura 19:</b> Difratoograma de amostra proveniente do ESP evidenciando a presença de caulinita, goethita e hematita.....  | 63 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 20:</b> Fragmentos de amostras pertencentes ao Supergrupo Espinhaço submetidas ao MEV evidenciando as (A) porosidades presentes na amostra, (B) algumas em formato hexagonal. Evidencia também a presença de hematita (C) lamelar e (D) botroidal.....  | 64 |
| <b>Figura 21:</b> (A) Fragmento de amostra característica do Quadrilátero Ferrífero em menor aumento submetida a imageamento por MEV revelando uma (B) porosidade mais frequente (C) hematitas em hábito lamelar e (D) botroidal, gibbsita em (E) hábito acicular e (F) estrutura anômala que remete a um tecido orgânico(F)..... | 65 |
| <b>Figura 22:</b> Lâminas de couraça sob MEV evidenciando (A) as paletas de hematita orientadas, (B) as porosidades poligonais , ( C) o processo de cimentação intragrão, (D) o preenchimento incipiente das porosidades, (E) as estruturas hexagonais orientadas e (F) processos de substituição e cimentação.....               | 66 |
| <b>Figura 23:</b> Análise microquímica da ESP 02, campo 01, em que ocorre a predominância de ferro em 5 dos 6 campos analisados. ....   | 67 |
| <b>Figura 24:</b> Mapa Microquímico ESP 01, campo 1, evidenciando a presença massiva de ferro, mas também o titânio em grãos minerais e o silício associado ao alumínio, dispersos por todo o campo. ....   | 68 |
| <b>Figura 25:</b> Análise microquímica ESP 02, campo 02, em que ocorre a predominância de ferro em 75% dos campos analisados, sendo que o Titânio aparece como predominante no restante. ....   | 70 |
| <b>Figura 26:</b> Mapa microquímico ESP 02, campo 02, apresentando a grande predominância de ferro, o titânio concentrado em grãos, o silício novamente associado ao alumínio, ainda evidente no cimento. ....  | 71 |
| <b>Figura 27:</b> Análise microquímica ESP 07, campo 01, evidenciando concentrações de alumínio consideráveis em 40% dos campos analisados, mesmo o ferro sendo o principal elemento. ....  | 73 |
| <b>Figura 28:</b> Mapa microquímico ESP 07, campo 01, com o titânio concentrado em grãos e o alumínio e a sílica menos proeminentes. ....   | 74 |
| <b>Figura 29:</b> Análise microquímica ESP 07, campo 02, com registros inéditos de cálcio na lâmina, além, do titânio ser o elemento principal em um dos campos analisados. ....  | 76 |
| <b>Figura 30:</b> Mapa microquímico ESP 07, campo 02 mostrando uma sílica com um destaque um pouco maior do que o alumínio e preenchendo algumas cavidades, além do titânio bem pontual em grãos específicos. ....  | 77 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 31:</b> Análise microquímica QF03. Apresentando ferro predominante em dois dos três campos, mas com quantidades consideráveis de alumínio.....   | 79 |
| <b>Figura 32:</b> Mapa microquímico QF03 apresentando manganês associado ao potássio e dispersos pelo cimento. O titânio aparece em menor quantidade em regiões pontuais. Já o alumínio aparece preenchendo cavidades. Nota-se a ausência de sílica. ....          | 80 |
| <b>Figura 33:</b> Análise microquímica QF04 com o alumínio predominante em dois dos campos, com ausência quase total de ferro.....   | 82 |
| <b>Figura 34:</b> Mapa microquímico QF04 evidenciando a presença de alumínio como feição de cimentação e preenchimento, associado ao oxigênio, enquanto o ferro encontra-se concentrado nos grãos e agregados. Já o manganês se encontra disperso pela lâmina..... | 83 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Composição química das amostras do ESP e QF obtida por FRX. ....                            | 62 |
| Tabela 2: Análise microquímica ESP02, ESP07, QF03 e QF04 resultante de MEV associado ao EDS (%). .... | 84 |



## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| <b>Quadro 1:</b> Estratigrafia Supergrupo Espinhaço (Almeida Abreu & Pflug ,1994).....          | 43 |
| <b>Quadro 2:</b> Estratigrafia da Formação Sopa–Brumadinho (Almeida Abreu & Pflug ,1994). ..... | 43 |
| <b>Quadro 3:</b> Resumo do Modelo de Gênese .....   | 91 |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>  | <b>22</b> |
| 2.1      | A formação de couraças e a bioturbação .....  | 22        |
| 2.2      | Feições riziformes como marcadores da degradação de couraças.....                             | 28        |
| <b>3</b> | <b>ÁREAS DE ESTUDO .....</b>  | <b>34</b> |
| 3.1      | Quadrilátero Ferrífero .....  | 36        |
| 3.2      | Serra do Espinhaço Meridional.....  | 39        |
| <b>4</b> | <b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>   | <b>45</b> |
| 4.1      | Amostragem.....   | 45        |
| 4.2      | Análises físicas, químicas e mineralógicas.....   | 45        |
| 4.3      | Análises micromorfológicas e petrográficas em seções delgadas por microscopia<br>óptica ..... | 46        |
| 4.4      | Análises microquímicas e micromorfológicas.....   | 47        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS.....</b>  | <b>48</b> |
| 5.1      | Descrição macroscópica .....  | 48        |
| 5.2      | Descrição microscópica .....  | 50        |
| 5.2.1    | Amostras ESP.....   | 50        |
| 5.2.2    | Grupo QF .....  | 56        |
| 5.3      | Composições química e mineralógica .....  | 61        |
| 5.4      | MEV e análises microquímicas .....  | 64        |
| <b>6</b> | <b>DISCUSSÃO .....</b>  | <b>85</b> |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>89</b> |
| <b>8</b> | <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>93</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

As couraças são formações que se encontram registradas na literatura desde meados do século XIX, ainda que sob diferentes denominações. Eschwege a registrou como Tapanhoacanga (*apud* Ruchys, 2015 e Renger, 2005), Androux (1909) como Carapaça ferruginosa (Tardy, 1997), o termo Canga foi utilizado por Barbosa & Rodrigues (1965), Laterita por Paton & Williams (1972), Ferricrete por Nahon (1986) e Crosta laterítica por Conacher (1991).

Assim como sua denominação, sua descrição também se encontra cercada por discrepâncias. Dorr (1964) a define como sendo uma superfície litificada, rica em ferro, formada por quantidades variadas de fragmentos detríticos, principalmente hematita ou formações ferríferas, cimentados por limonita. Já para Tardy (1992), estão inseridas num conceito mais amplo, as lateritas, que inclui diversos materiais soltos ou endurecidos, assim como formações e horizontes que fazem parte de solos ricos em ferro e/ou alumínio. Para Schellmann (1981, citado por Bourman & Olier, 2002 e Widdowson, 2007) laterita e couraças são sinônimos, já que as primeiras são descritas como produtos de intenso intemperismo subaéreo em que os teores de ferro e/ou alumínio e sílica diferem da rocha mãe.

Para este trabalho, o conceito utilizado é o de Nahon (1991), que define couraças como formações endurecidas de composição variada e cimentada por óxidos e hidróxidos que, sendo de ferro ou alumínio, as definem como ferruginosas ou aluminosas, sendo conhecidas no Brasil, como cangas ou bauxitas, respectivamente.

A couraça em si não é utilizada como fonte do minério de ferro, mas pode estar associada a outros materiais que o são. No Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, por exemplo, essa associação ocorre com o itabirito, já em Carajás, no Pará, com o jaspelito. O minério de ferro extraído de tais rochas é amplamente utilizado pela indústria, principalmente para a produção de aço. Em 2019, a produção mundial de minério de ferro destinada para esse fim foi de 2,5 bilhão de toneladas, sendo a Austrália o maior produtor, com 900 milhões de toneladas, ou 36% do total. Em seguida encontram-se Brasil, China e Índia. Assim como a produção mundial, a brasileira também vem crescendo, chegando a 480 milhões de toneladas em 2019 (USGS, 2017, 2018, 2019).

Aspectos como clima, paleogeografia, litologia e relevo são estudados para o entendimento da gênese de couraças ferruginosas. O clima mais favorável, por exemplo, é do tipo tropical a tropical úmido, com temperaturas anuais médias entre 20° e 28°C, precipitação anual entre 1200 mm e 1450 mm, umidade relativa do ar em torno de 70% e, no mínimo, uma estação seca (Bardossy, 1981; Tardy, 1993,1997). Apesar de não existir consenso sobre os valores de temperatura, precipitação, umidade e duração do período seco, evidências obtidas pelo estudo de palinologia, paleontologia e isótopos de oxigênio apontam para a formação dessas lateritas em ambientes tropicais. O fato de atualmente estarem sob diferentes regimes climáticos, remete a contextos paleoclimáticos, já que essa diversa distribuição espacial pode ser explicada associando-se a distribuição das zonas climáticas do planeta e a deriva continental desde a separação da Gondwana. Além disso, a existência das couraças, mesmo sob clima tropical, não garante que são produtos de alteração recente, podendo ser preservadas ao longo do tempo (Tardy *et al.* 1991).

As características litológicas das rochas parentais associadas ao desenvolvimento de couraças ferruginosas são diversas, mas, aparentemente, duas são de extrema importância: a composição química e mineralógica, principalmente o conteúdo de ferro, e estruturas que permitem a percolação de fluidos de alteração (Bardossy, 1981). Rochas ígneas máficas e sedimentos imaturos são propensos a formar couraças ferruginosas, porém os protólitos são materiais originalmente ricos em ferro, como formações ferríferas bandadas, itabiritos e jaspelitos. Algumas formas de relevo também se encontram frequentemente associadas a ocorrências de couraças: platôs elevados, paisagens de peneplano, regiões montanhosas de encostas e topos de morro cônicos, encostas de regiões montanhosas mais elevadas e pequenas depressões e vales (Bardossy, 1981; Mateus 2015).

Os principais processos de gênese de couraças foram sintetizados por Goudie (1973) e McFarlane (1976), ocorrendo por: i) acumulação relativa *in situ*, ou ii) acumulação absoluta em áreas de deposição. Segundo Widdowson (2007), o princípio de formação de couraças em i é a acumulação relativa de elementos menos solúveis, como Fe, Al e Ti, a partir da alteração da rocha parental. Isso ocorre devido à perda de elementos mais facilmente remobilizados pela lixiviação (Ca, Mg, K, Na, Si, entre outros), resultando numa concentração residual de ferro e alumínio. Em ii, a acumulação de ferro se dá a partir do seu transporte, em solução ou como quelatos,

ao longo da vertente, ou da própria paisagem, e a sua deposição física e/ou química, em ambientes específicos, tais como aqueles afetados pela oscilação do nível freático.

Tão diversa e complexa quanto a gênese das couraças, são os processos que levam a sua degradação. Em linhas gerais, como sua formação está associada a um conjunto de fatores, a alteração nas condições de qualquer um desses pode desencadear um estado de instabilidade que pode levar à degradação (Tardy, 1997). Considerando o clima, por exemplo, se as condições se tornam mais secas, o desmantelamento é causado por fragmentação em fração cascalho seguido de erosão, formando um horizonte subsuperficial marcado pela lixiviação do ferro e horizontes saprolíticos pela destruição de caulinita e neoformação de esmectita. Quando a sazonalidade climática é mantida, a parte superior da couraça se degrada devido a transformação de hematita em goethita e de caulinita em gibbsita, ao mesmo tempo em que ocorre a reconstituição por ferro e sílica lixiviados. Ocorrendo aumento de pluviosidade e umidade relativa do ar, há a predominância de processos químicos de dissolução, provocando uma perda de volume e o surgimento de uma complexa mineralogia (Beauvais & Tardy, 1991).

Em um ciclo de variação climática, a degradação de couraças em condições úmidas tem como produto um Latossolo Concrecionário, de profundidade controlada pela pedobioturbação, tanto da meso quanto da microfauna do solo. Esses organismos são responsáveis pela seleção de partículas da fração silte e argila que se concentram na superfície (Schaefer, 2001). Em climas transicionais, quando a vegetação se torna de menor porte, a erosão se acentua e o solo produzido na fase úmida pode ser perdido. Ao atingir o clima seco, a couraça cimentada é exposta, constituindo solos pedregosos muito rasos. Esses ciclos podem se repetir ao longo do tempo geológico.

Em superfície, a degradação da couraça é causada pela percolação de fluídos e o acúmulo de matéria orgânica, que podem gerar variações nas condições de pH e Eh, resultando em cavidades centimétricas a decimétricas na couraça, preenchidas por agregados esferolíticos, de composição ferro aluminosa, formando sistemas complexos e interligados de fissuras (Schaefer, 2004). Essas feições se tornam responsáveis pela dissolução de caulinita e partes de gibbsita e goethita, já que o silício, o ferro e o alumínio são remobilizados (Schaefer *et al.* 2004; 2008). Enquanto o silício é retirado do perfil, o alumínio e o ferro se reprecipitam *in situ*, sendo

responsáveis por uma sucessão de degradação e precipitação da couraça, mantendo a paisagem praticamente inalterada (Schaefer *et al.*, 2008; Monteiro *et al.*, 2014).

A migração de soluções aquosas também é responsável pela degradação em subsuperfície. O alumínio e ferro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) são praticamente insolúveis. Em processos intempéricos, o  $\text{Fe}^{2+}$ , sua forma mais móvel, é rapidamente oxidado à  $\text{Fe}^{3+}$ , que precipita juntamente com o alumínio, na forma de óxidos ou hidróxidos. Esses compostos preenchem fraturas e fissuras, formando um intenso sistema de finos veios de gibbsita, goethita ou hematita, acima do nível argiloso do solo. Sucessivos ciclos de dissoluções e reprecipitações contribuem para que a couraça assuma uma textura bastante complexa. Monteiro e colaboradores (2014) sugeriram que as plantas e o microbioma rizosférico promovem a dissolução de óxidos e hidróxidos de ferro próximos à superfície. Além disso, a intensa remobilização de material resultante da atividade da mesofauna e macrofauna, principalmente térmitas, também contribui para essa complexidade.

O reconhecimento de evidências diretas da atuação de microrganismos e plantas na degradação de couraças ferruginosas é limitado, embora venha sendo identificado e estudado por diversos autores. Monteiro e colaboradores (2014) encontraram evidências geocronológicas e geoquímicas desse envolvimento, assim como Levett *et al.* (2020), que também apresentaram evidências mineralógicas. Ruellan e Dosso (2003, *apud* Suhadolnik, 2017) apontam que as feições morfológicas, em geral, são resultantes da movimentação e transferência de partículas e elementos no perfil do solo, assim como da precipitação de minerais solubilizados e do movimento de animais e raízes. Toda essa atividade presente no perfil de solo é expressa pela formação de nódulos, bandas, pedotúbulos e rizofeições.

Rizofeições são feições pedológicas desenvolvidas a partir de vestígios de raízes, preenchidas por diferentes materiais, mas que preservam sua estrutura. Pedotúbulos, por sua vez, são estruturas resultantes de escavações realizadas por animais ou raízes, de forma tubular, com ou sem ramificações. A geometria dos canais está intimamente ligada ao agente que o escavou. Pedotúbulos ou rizóides podem ser preenchidas por recimentação de minerais, que acompanham as formas já existentes, sendo assim bons indicadores de paleossolos e paleoclimas (Castro, 2002).

Estruturas semelhantes às resultantes da atividade de raízes no solo foram encontradas associadas à couraças ferruginosas no Quadrilátero Ferrífero e na Serra

do Espinhaço, em Minas Gerais. As primeiras foram inicialmente estudadas por Suhadolnik (2017), as últimas ainda não possuem registro na literatura.

Apesar dos avanços nos estudos da gênese das couraças ferruginosas, muitas lacunas de conhecimento permanecem abertas em relação aos processos de degradação. As condições ambientais em que essa alteração ocorre, as variações nas propriedades dos solos resultantes, os processos envolvidos, sua relação com relevo, vegetação e meso/microfauna ainda não são bem conhecidos. De certa maneira, também permanecem negligenciadas as feições que retratam essa degradação, como as feições riziformes e pedotúbulos, que neste trabalho serão genericamente tratadas como feições tubulares. O fato dessas formações estarem frequentemente associadas a áreas de alto interesse econômico e a ecossistemas endêmicos, intensifica a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o tema. É nesse contexto que o projeto se encontra.

O trabalho tem como tema central as feições tubulares associadas à atividade de agentes biológicos que precisam ter sua gênese mais bem compreendida. Mais especificamente, como as feições tubulares encontradas em perfis de alteração de couraças ferruginosas têm sua origem vinculada aos mecanismos de degradação superficial das mesmas, podendo ser utilizadas como marcadores para tal.

Assim como em sua formação, a degradação das couraças são perpassadas por diferentes processos, resultando em alterações texturais, estruturais, mineralógicas e geoquímicas. A análise das feições resultantes desses processos possibilita um maior entendimento deles. Sendo assim, o objetivo do trabalho é caracterizar, em escala macro e microscópica, as feições tubulares resultantes da atividade de agentes biológicos, compreender quais são e como se organizam os minerais que as constituem. A partir disso, busca-se compreender a gênese das feições tubulares e verificar se existem marcadores que discriminam sua associação com raízes ou organismos escavadores e, por fim, entender a associação da gênese dessas feições com a degradação das couraças ferruginosas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A formação de couraças e a bioturbação

Especialmente em ambientes tropicais, é frequente a presença de lateritas e couraças, tanto ferruginosas quanto aluminosas, também conhecidas como cangas ou bauxitas, respectivamente, no caso do Brasil. A canga se forma durante o intemperismo de formações ferríferas bandadas, agindo como uma proteção para o perfil laterítico inferior podendo alcançar mais de 30 metros de espessura, mas exibindo em média 10 metros (Dorr, 1964; Monteiro *et al.*, 2014, 2018). Podem constituir um surpreendente ecossistema, já que abrigam uma infinidade de espécies, incluindo exemplares raros e endêmicos de plantas rupestres, associadas à esse tipo de habitat (Jacobi *et al.*, 2007; Gibson *et al.*, 2010; Jacobi and Carmo, 2011; Yates *et al.*, 2011; Messias *et al.*, 2013). Devido à essa ampla presença e diversidade, inúmeros autores dedicaram-se a estudar o registro da atividade biológica presente nessas formações e em solos derivados.

Beauvais & Colin (1993) caracterizam qualitativamente e quantitativamente os processos de intemperismo envolvidos na formação e transformação de sistemas de cangas ferruginosas, combinando observações geomorfológicas e petrológicas, num ambiente composto por planaltos elevados (high plateaus), encostas (slopes) e planaltos baixos. Neste ambiente, foram descritos perfis de alteração de canga completos e incompletos, que apresentavam até sete camadas, distintas entre si, por cor, estrutura ou textura; além de um saprolito. Em quase todos os perfis encontram-se evidências de atividade biológica, mesmo que em diferentes profundidades.

No planalto elevado, a camada nodular não endurecida tem seu topo ocupado por domínios argilosos, com poucos nódulos, perpassados por diversos canais biológicos de dimensões centimétricas, atribuídos a térmitas, raízes (Beauvais & Colin (1993).

O sistema de cangas disposto em encostas é subdividido em um subsistema não florestado na base da encosta, e um florestado na porção superior da encosta, desenvolvido sob alta atividade biológica. Encontram-se separados por uma ampla escarpa e apresentam perfis de alteração semelhantes. Ao longo desses perfis, encontram-se registros de biopedoturbação em mais de uma camada. Na “mottled clay layer” os processos biológicos afetam a matriz do solo, levando a um aumento da



porosidade e impulsionando o desenvolvimento de gibbsita. O saprolito é marcado por uma matriz gibbsítica de coloração ocre na superfície, exibindo contornos de biopedoturbação e que contém pontos milimétricos de goethita ou hematita, desenvolvidos sobre micas reliquiais (Beauvais & Colin, 1993).

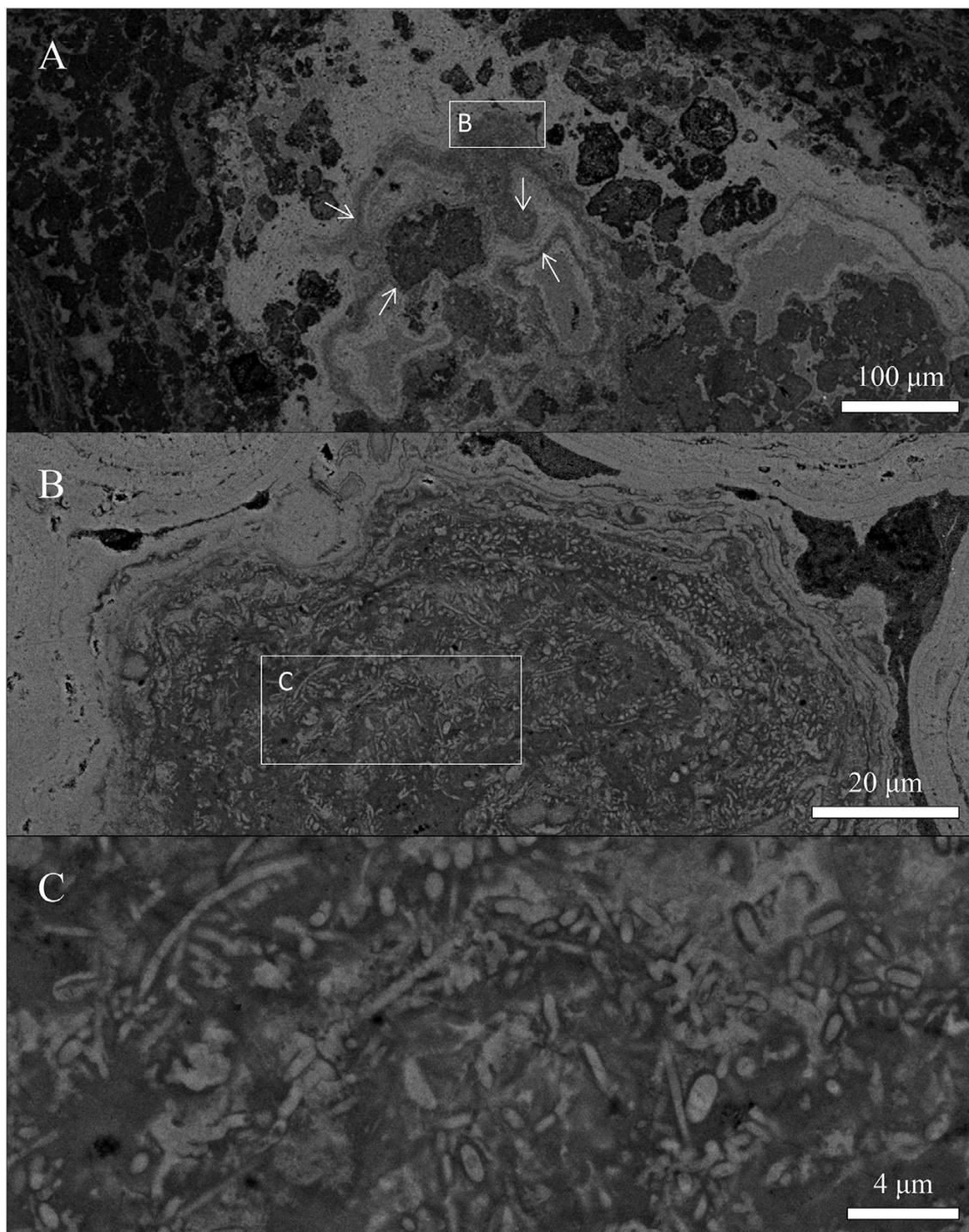
O planalto inferior é subdividido em planos e convexos, apresentando dois perfis de alteração distintos, não apresentando evidências primárias de pedobioturbação (Beauvais & Colin, 1993).

De modo não direto, a atividade biológica interfere na presença de minerais como hematita, goethita, caulinita e gibbsita nos perfis de alteração. O equilíbrio das reações entre hematita e goethita e caulinita e gibbsita é controlado por mudanças na temperatura, porosidade, atividade de água e sílica e “fugacities” de oxigênio e gás carbônico (Didier *et al.*, 1985; Tardy and Nahon, 1985; Trolard and Tardy, 1987; Tardy and Novikoff, 1988; Tardy *et al.*, 1988; Ambrosi, 1990). Ao afetar alguns desses parâmetros, evidentemente a porosidade, a atividade biológica altera, conseqüentemente, o equilíbrio dessas reações e a concentração desses minerais no solo. (Colin & Beauvais, 1993).

Em estudo realizado entre amostras superficiais provenientes de Carajás, analisadas em escala macroscópica, percebem-se alterações por processos relacionados à atividade biológica, como a percolação de água, escavações por animais e plantas e processos de circulação de ferro solúvel, resultando na formação de bandas de goethita (Levett *et al.*, 2016). Em escalas menores, utilizando-se MEV, identificou-se um grande número de microfósseis permineralizados, formados quando deposições minerais fossilizam os tecidos orgânicos internos dos organismos. São, em sua maioria, estruturas arredondadas, cocos e filamentos bacteriomorfos, coalescidas entre si e posicionadas ao redor de grãos ricos em goethita e caulinita, formando os chamados biofilmes (figura 1). Ao microscópio ótico, são descritos como microcolônias formadas por grãos arredondados e separados, cuja a matriz e a os microfósseis são compostos por óxidos de ferro e alumínio, com predomínio do primeiro (Levett *et al.*, 2016).

As amostras de MEV também detectaram células envelopadas encrustadas, indicando que elas foram encobertas por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, principalmente próximas a camadas de goethita. Esse método também identificou goethita microcristalina e moldes de bacteriomórficos em regiões pontilhadas por óxidos de ferro. As células envelopadas aparecem como sessões de microorganismos

em forma de bastonetes e a replicação e encrustação dos mesmos por óxidos de ferro, assim como o preenchimento dos poros localizados entre eles, contribuem para a gênese e manutenção da canga, e os óxidos de ferro biogênicos contribuem para a heterogeneidade desse tipo de formação de escalas micro a macroscópicas. A preservação da estrutura das células envelopadas indicam que a os óxidos de ferro devem ser nucleados na superfície das células microbianas e pela precipitação de goethita e óxidos de ferro saturados entre o citoplasma das células (Ferris *et al.*, 1988; Levett *et al.*, 2020b, 2020a). A incrustação de células envelopadas representam o primeiro estágio de fossilização, seguido pelo preenchimento das mesmas por óxidos de ferro.



**Figura 1:** Imagens de MEV de microorganismos permineralizados. (A) Natureza heterogênea da canga. (B) Biofilme permineralizado próximo às bandas de goethita. (C) Preservação da estrutura da microbiota dentro do biofilme (Levett *et al.*, 2016).

Como o biofilme de goethita presente nos fósseis não é vítreo, indica que os minerais foram extensivamente recristalizados, mas preserva escassos marcadores biológicos (Levett *et al.*, 2016).

Schaefer (2001), ao estudar planícies associadas a latossolos e lateritas no Brasil, foi capaz de identificar as evidências micropedológicas mais comuns da bioturbação. As estruturas mais evidentes passam por litorelitos de pellets ovais, micropartículas de carvão no interior de microagregados e esqueletos de microagregados formados de grãos de quartzo de diâmetro diferente dos grãos da matriz. Outro aspecto destacável é a forte similaridade entre microagregados do solo e os derivados da atividade de termitas no saprólito raso. A presença desses microagregados está intimamente relacionada à composição mineralógica dos latossolos, ricos em óxidos de alumínio e ferro que, segundo Schaefer and Dalrymple (1995) e Ferreira *et al.* (1999), são responsáveis por garantir estabilidade aos microagregados bióticos. Alguns registros menos frequentes, mas também catalogados por Schaefer (2001), são canais preenchidos por pellets de térmitas, sugerindo movimento descendente desses organismos ao longo do perfil de solo, e as stone lines, que demarcam o limite entre solum e saprolito. Em superfície, por sua vez, foram descritos mounds de diferentes tamanhos e formas, bastante comuns em latossolos e lateritas do Brasil. Em suma, mounds se encontram no topo de planícies antigas associadas à latossolos e lateritas no Brasil e em demais lugares. A atividade de térmitas resulta num transporte de partículas finas provenientes de grandes profundidades e depositadas no topsoil. Uma vez no topo do perfil, estão sujeitas então a processos erosivos, podendo sofrer erosão (Schaefer, 2001).

Stoops (1994) também se dedicou aos registros micromorfológicos da atividade da biota em solos lateríticos. Para isso, relatou um estudo de caso em solos no topo de um declive em um platô recoberto de laterita, na parte inferior do saprolito e da rocha fresca (De Coninck *et al.*, 1986). Na região, a rocha fresca é descrita como um greenstone, rico em epidoto, zoisita, actinolita, biotita, magnetita e quartzo (Coninck *et al.*, 1986). O platô fica localizado no Zaire, numa região de precipitação acumulada média de 1100 mm e temperatura média igual a 24. No topo da encosta, a fração argilosa do solo é composta exclusivamente por caulinita e goethita, microestrutura granular típica de materiais latossólicos e diversos preenchimentos granulares nos bioporos (Stoops, 1983). O material grosseiro é composto por quartzo com estrutura runinuartizítica, opacos e fragmentos de lateritas. A micromassa é homogênea, com grande quantidade de grãos de plintita hematítica e b-fabric de indiferenciada a fracamente estriada (Schmidt-Lorenz, 1978; Stoops *et al.*, 1994). O solo da porção central da encosta e do saprolito inferior tem a fração argilosa composta por caulinita,

camadas misturadas de clorita-vermiculita e goethita, enquanto a fração grossa é formada por epidoto, zoisita, quartzo e fragmentos de rocha; a micromassa é homogênea e marcadamente estriada salpicada. Já nas porções mais inferiores é menos homogênea e um fabric estriado menos aparente (Stoops, 1994). As pedofeições se encontram restritas a nódulos de ferro impregnados. Plintitas hematíticas também estão presentes, embora em menor quantidade do que no topo do platô. Os perfis formados diretamente pela alteração da rocha fresca têm fração argilosa dominada por uma camada mista de clorita-vermiculita e esmectita, com estrutura em blocos. O material grosso é principalmente epidoto, zoisita, e grãos escassos de actinolita e quartzo. A micromassa varia de acinzentada a avermelhada, salpicada límpida e mosaico salpicada a fracamente estriada, sem registro de plintita hematítica (Stoops, 1994).

Marcelino e Stoops também contribuíram para o estudo de perfis lateríticos, ao descrever um perfil completo, *in situ*, detalhando o fabric presente em amostras desse perfil. Outra contribuição importante do estudo supracitado foi a divisão da camada laterítica em subcamadas, com características diferentes (Duchaufour, 1960; Stoops and Marcelino, 2010).

Ao analisar lateritas ferruginosas, onde se encaixam as cangas, descreveram detalhadamente as características microestruturais encontradas em todas as camadas. Evidências de atividade biológicas foram descritas na camada não endurecida de laterita como estruturas resultantes de deslocamento e preenchimentos com excrementos, bastante comuns, indicando alta atividade biológica (Stoops *et al.*, 1990; Horváth *et al.*, 2000; Stoops and Marcelino, 2010). Já a porção endurecida da laterita, além de preenchimento de cavidades por excrementos, apresenta diferentes registros de atividades biológicas. O primeiro a ser descrito se apresenta como revestimentos de caulinita-goethita, relacionados à atividade de térmitas, devido a sua similaridade estrutural com partículas encontradas em galerias escavadas por esses organismos. Esse revestimento parece ser formado pelo empacotamento regular de pellets, bucais ou fecais, enriquecidos posteriormente por fluidos ricos em óxido de ferro (de Barros Machado, 1983; Machado, 1987; Stoops and Marcelino, 2010). Revestimentos similares são encontrados em afloramentos de laterita endurecida, na superfície ou na borda de fissuras, formando um fabric com o bandamento original, devido à precipitação de óxido de ferro controlada por atividade microbiana (Alexandre and Tshidibi, 1985).

A porção da laterita rica em grãos e suportada por nódulos, apresenta evidências de atividade biológica através de nódulos concêntricos, cujos núcleos podem ser de fragmentos de carvão, revestidos por caulinita goethita, que também reveste nódulos de fabric saprolítico, de solo, de plintita celular, nódulos complexos e nódulos arenosos. Como dito anteriormente, esse tipo de revestimento se encontra, muitas vezes, associado à atividade biológica (Stoops & Marcelino, 2010).

Oliveira *et al.* (2014) estudaram o efeito do acúmulo de atividades biológicas em anortositos de Barro Alto, Goiás e nas bauxitas associadas a eles. Observaram transformações microestruturais e mineralógicas provenientes da bioturbação de térmitas e degradação mecânica e geoquímica promovidas por raízes, responsáveis ainda pela geração de determinadas estruturas. A bioturbação foi responsável pela formação de um microagregado intergranular composto de cristais de gibbsita, além de uma estrutura granular composta por uma matriz argilosa formada por microagregados termíticos e fragmentos de gibbsita imersos numa matriz poliminerálica, incluindo boehmita, associada somente a esse tipo de atividade. Já a degradação provocada por raízes, gerou um pórfiro de fragmentos de bauxita cimentados por uma matriz pedogenética e uma estrutura finemônica, em que a neoformação de gibbsita foi emoldurada por formas mais antigas produzidas por raízes ou galerias resultantes da atividade de térmitas. A contínua evolução dessas estruturas resultou em pedotubulos e rizofeições de dimensões decimétricas (Oliveira *et al.* 2014).

## **2.2 Feições riziformes como marcadores da degradação de couraças.**

A relação entre a vegetação e a evolução de couraças é análoga à relação das mesmas com o desenvolvimento do solo. Se dá desde a proteção à erosão até um favorecimento ao creep, passando por desagregação de partículas e diversos outros processos. A maioria destes, no entanto, são classificados como intempéricos e de formação do solo, podendo ser classificados em bioquímicos ou biomecânicos. O intemperismo bioquímico se dá quando organismos vivos mediam processos de intemperismo de rochas e minerais (Burford *et al.*, 2003; Fei *et al.*, 2014), sendo considerado, por muitos estudiosos, como mais importante do que o biomecânico. Já os efeitos biomecânicos são definidos por Pawlik *et al.* (2016) como a habilidade de organismos vivos de alterar, fisicamente, o regolito e a camada rochosa. São

comumente associados à mistura das partículas de solo e à bioturbação, fraturamento de rocha e biotransporte, em diferentes escalas e associados ao agente escavador. Segundo Field & Little (2009), assim como a fauna, a flora é responsável pelo transporte de material de subsuperfície para superfície e desmembramento do saprólito, podendo impulsionar a separação do solo em horizontes, contribuindo para a bioturbação. No entanto, na maioria das vezes, os processos químicos e físicos ocorrem simultaneamente, sendo difícil estabelecer uma fronteira entre eles.

A cobertura vegetal e, principalmente, a micro e mesofauna ocupam simultaneamente o solo, sendo responsáveis por alterá-lo ao mesmo tempo e, muitas vezes em conjunto. Por exemplo, em rochas recentemente expostas, a alteração tem início pela instalação de cobertura vegetal, raízes de árvores, raízes capilares e hifas de microfungos. A frente de intemperismo se dá em regiões de fissuras e fraquezas, muitas vezes resultantes da atividade de microorganismos, como a penetração desses fungos na rocha ou da escavação resultante da alteração mineral por substâncias orgânicas, como ácidos e quelatos (Pawlik *et al.*, 2016).

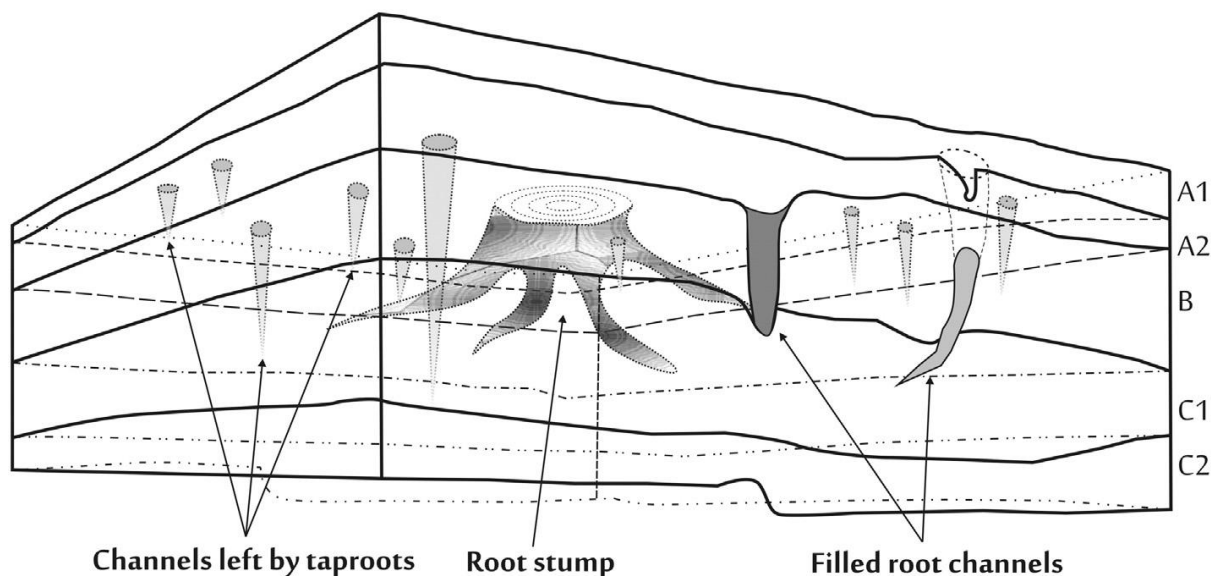
Pawlik *et al.* (2016) debruçou-se sobre papel da flora na formação do solo, apoiando-se em estudos prévios realizados por Gilbert (1880), Merrill (1906) e Shaler (1982). Mais precisamente, o estudo de 2015 aborda o efeito das raízes no intemperismo das rochas, sua importância em escala global, se os processos físicos e químicos do intemperismo induzidos por raízes são relevantes e se influenciam o sistema geomorfológico. Estudos pioneiros de geólogos e geomorfólogos mostram mais de uma função crítica das plantas, como a desintegração de rochas pelo crescimento de raízes, um aumento dos poros facilitando a percolação de água, mas ao mesmo tempo retardando processos de erosão (Gilbert, 1880; Merrill, 1906). Uma teoria mais detalhada do papel das plantas na formação do solo foi apresentada pelo geólogo Nathaniel Shaler em 1892, a partir da observação de interações como as raízes expulsam ou moem as partículas de solo durante o crescimento, além de penetrarem em espaços vazios causando desmantelamento da rocha, impulsionando o intemperismo químico e abrindo caminho para novas raízes.

Observou-se também, em estudos realizados por Davis (1899), e reiterados por Gabet *et al.* (2003) e Field and Little (2009) que árvores podem contribuir para o creep do solo, assumindo que o crescimento das raízes de árvores deslocam o solo para a superfície e, depois da morte dessas raízes, a massa de solo é deslocada relevo abaixo.

As raízes, principalmente de árvores, são de suma importância para que as espécies sobrevivam à diversos fatores de stress presentes no ambiente, como extensos períodos de seca, temperaturas extremas, atividades de animais, quedas de outras árvores, além das funções gerais, como fixação ao substrato, fonte de carboidratos não estruturais, transporte de soluções por toda a planta e fixação de nitrogênio atmosférico. Segundo Zwieniecki and Newton (1995) a morfologia externa das raízes é relacionada ao ambiente em que se encontram e, depois de estabilizadas, podem controlar a produção de solo, assim como os processos envolvidos, podendo ainda serem separadas em três principais categorias (Hodge *et al.*, 2009): as primárias, que podem ser o ponto de partida para um sistema de raízes, em que predomina o crescimento vertical; nodais, que se se diferenciam a partir de estruturas que não são raízes, como rizomas e caules; e laterais, que se originam da ramificação de um eixo parental (Pawlik *et al.*, 2016).

Diversos estudos foram responsáveis por investigar como o solo influencia o padrão de desenvolvimento das raízes das plantas e como o solo responde a esse crescimento, em diferentes escalas. Dentre eles destacam-se Pfeffer (1893), Geyger (1964), Blevins *et al.* (1970), Altemüller and Haag (1983), Whiteley and Dexter (1984), Bengough & Mullins (1990), Helal (1991), Passioura (1991), Black and Okwakol, (1997). A partir deles, pode-se sugerir que diversos padrões de sistemas de raízes de diferentes espécies de plantas sejam a principal explicação para a variabilidade espacial na organização do solo, criando também diferentes estruturas de solo (Babel *et al.*, 1992; Krebs *et al.*, 1993) . Raízes finas e ramificadas, por exemplo, estariam associadas a uma presença de um solo de fábrica muito fina (Krebs *et al.*, 1993). Uma representação de possíveis registros da presença de raízes no solo é apresentada na figura 2.





**Figura 2:** Representação hipotética de registros deixados por raízes no solo, o que influencia na porosidade e percolação de água (Gaiser, 1952 *apud* Pawlik *et al.*, 2016).

Diante disso, sabe-se então que todo o intemperismo e consequentes processos pedogenéticos resultantes da atividade da vegetação possui participação fundamental das raízes, seja ele bioquímico ou biomecânico.

A flora tem sua importância ressaltada em processos bioquímicos de alteração mineralógica e geoquímica do solo, ciclagem e redistribuição de nutrientes e formação de fitólitos (Field & Little, 2009). O intemperismo bioquímico resultante da atividade de raízes pode atuar direta ou indiretamente no solo e, sendo muitas vezes são resultados da associação de raízes e microorganismos (Jongmans *et al.*, 1997; Burford *et al.*, 2003). O registro mais comum de ocorre em minerais componentes do solo, como alterações microtopográficas nos cristais por corrosões nas superfícies, podendo evoluir para dissoluções quase completas desses minerais (Burford *et al.*, 2003).

Outro efeito direto é a liberação de substâncias orgânicas, principalmente por essa associação entre raízes e microorganismos (micorriza). Buurman e Jongmans (2002, 2005), 2005) descrevem a mobilização, transporte e precipitação de silicatos organometálicos nos processos de podzolização pela atividade de raízes. A associação entre microorganismos e raízes é responsável por acelerar o intemperismo químico, através da liberação de substâncias como quelatos e ácidos orgânicos, do aumento da disponibilidade de CO<sub>2</sub> e consequente diminuição do pH, do aumento da evapotranspiração que engatilha o ciclo da água e do aumento da estabilização de parte do solo. A junção desses fatores possibilita plena atividade da biota.

Além dos efeitos diretos e facilmente perceptíveis do intemperismo bioquímico, observa-se também consequências indiretas da atividade da vegetação, como a adição indireta de água, matéria orgânica e bioconstruções em locais antes ocupados por raízes, assim como padrões de entrada de umidade, nutrientes, microorganismos e calor, principalmente em solos pouco espessos, onde raízes adentram principalmente a camada rochosa (Schwinning, 2013). A atividade dos bioconstrutores no solo fica registrada como rizólitos, estruturas formadas ao redor ou em lugares ocupados por raízes, posteriormente substituídas por minerais reprecipitados (Goudie, 1996; Lipar and Webb, 2015). Esses rizólitos podem ser moldes de raízes, de geometria tubular que, se preenchidos recebem o nome de “casts”, túbulos cilíndricos cimentados ao redor de moldes de raízes, minerais acumulados ao redor de raízes formando rizoconcreções (Kindle, 1925), ou raízes petrificadas, quando são completamente substituídas por material mineral (Pawlik, *et al.*, 2016).

No entanto, o intemperismo bioquímico age principalmente nas descontinuidades pré-existentes ou produzidas nas rochas e, por isso, muitas vezes é condicionado ou potencializado pelo biomecânico, responsável por aumentar essas descontinuidades. A interação entre as rochas e as raízes são mais óbvias quando o crescimento das raízes ocorre em áreas de fraqueza das rochas, resultando na ampliação de fissuras e desmonte das rochas pelo crescimento das raízes, processo muitas vezes não muito óbvio (Yatsu, 1988; Pawlik, 2013). Estudos prévios sugerem que raízes impulsionam o intemperismo das rochas, mesmo que esse intemperismo ainda seja controlado por propriedades da rocha, principalmente a quantidade e tipo de fissuras pré-existentes, e acompanhado por alterações bioquímicas (Zwieniecki and Newton, 1995; Phillips *et al.*, 2008b; Field and Little, 2009; Phillips, 2016). Raízes de árvores atuam no intemperismo de corpos rochosos e formação do regolito, principalmente através de quatro mecanismos penetração dessas raízes em superfícies de fraqueza, a percolação de fluidos e compostos orgânicos devido à essa penetração, a pressão radial entre as fissuras, provocada pelo crescimento dessas raízes; e a adesão de raízes e micro raízes ao solo e à rocha provocando desmantelamento dos mesmos durante o desenraizamento e movimento dessas árvores quando agitadas pelo vento. A profundidade do solo resultante, assim como a espessura do regolito, estão relacionadas às espécies presentes, além de serem fatores importantes na definição das espécies de raízes profundas fixadas ali, assim como a fauna do solo (Phillips, 2016).

A supressão de árvores é responsável o processo biomecânico mais significativo provocado pela flora. Mais de um quarto das árvores sofrem desenraizamento ao final da vida, provocando efeitos repetidamente observados na formação e alteração do pedon. Embora ainda não suficientemente estudado, sabe-se que, se as raízes se encontram em contato com a rocha, o desenraizamento pode intensificar o intemperismo e aumentar a espessura do solos (Schaetzl *et al.*, 1988, 1989; Ulanova, 2000; Phillips *et al.*, 2008a, 2008b, 2015; Roering *et al.*, 2010; Šamonil *et al.*, 2010, 2013; Pawlik *et al.*, 2013, 2016). Apesar de, em alguns casos e em escala local a mistura de solo ou desenraizamento ser intenso ao ponto provocar inversão de horizontes e conseqüente reinício de desenvolvimento do solo, sabe-se que, o desenvolvimento a logo prazo de perfis de solo, em escala de paisagem, de locais em que ocorreu desenraizamento, é maior do que em locais onde não ocorreu (Schaetzl, 1986; Butler and Malanson, 1990; Šamonil *et al.*, 2014, 2015).

Pawlik *et al.* (2016) relata que é bastante perceptível também o aumento da porosidade e permeabilidade do solo, ao deslocar partículas horizontalmente e verticalmente, ao se desenvolverem na busca por água, nutrientes, resultando em mounds de raízes na superfície (Phillips and Marion, 2006; Hoffman and Anderson, 2014). Quando raízes apodrecem deixam canais por onde a água percorre livremente carreando também nutrientes, causando no solo efeitos semelhantes ao de animais escavadores. Afirma ainda que alguns outros efeitos que alguns dos efeitos da vegetação sobre o solo são a desagregação das partículas do mesmo por crescimento de tronco e raízes, e o preenchimento de cavidades associadas à decomposição ou queima de pequenas porções das plantas. Esse preenchimento ocorre com ainda mais frequência do que o movimento por remoção de raízes. Caso não haja desenraizamento, quando a raiz desintegra, resta uma depressão, que também pode ser preenchida por sedimentos do entorno, transportados ao longo do perfil de solo ou matéria orgânica (Lutz and Griswold, 1939; Lutz, 1958; Phillips and Marion, 2006; Wilkinson *et al.*, 2009; Hoffman and Anderson, 2014; Shouse and Phillips, 2016).

### **3 ÁREAS DE ESTUDO**

As couraças ferruginosas encontram-se distribuídas por todo o território brasileiro e a presença de feições tubulares já foram reportadas em alguns estudos. Em Minas Gerais, Suhadolnik (2017) relatou a existência de estruturas semelhantes associadas às couraças do Quadrilátero Ferrífero, e levantamentos de campo, não publicados, revelaram também sua presença nas couraças da Serra do Espinhaço Meridional. Assim, essas duas áreas foram selecionadas para estudo. A localização de ambas as áreas estudadas encontra-se descrita na Figura 3.

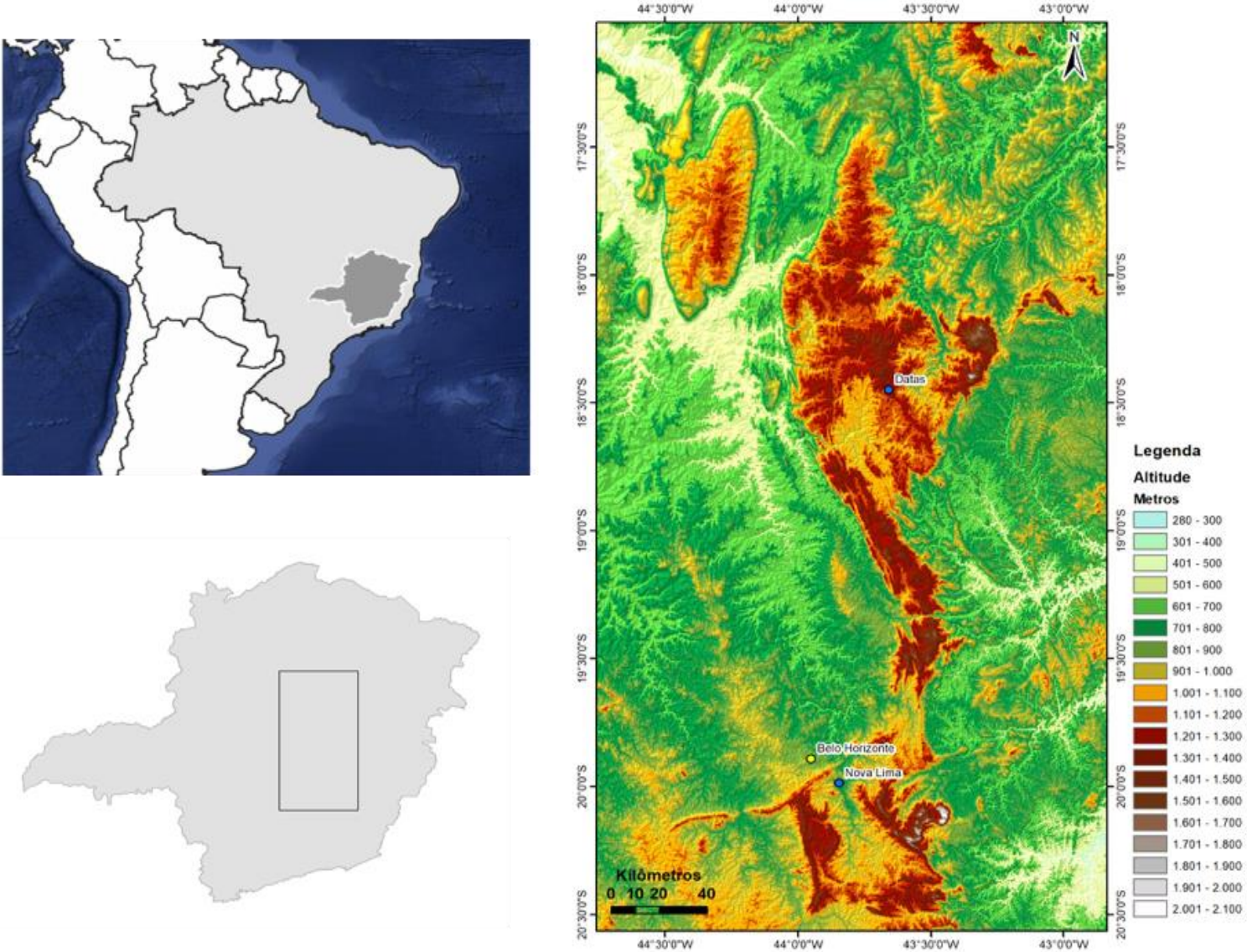


Figura 3: Localização das áreas de estudo.

### 3.1 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero é uma área de aproximadamente 7000 km<sup>2</sup>, situada na porção centro-sudeste do estado de Minas Gerais. A denominação provém do arranjo geométrico de sua morfoestrutura e foi primeiramente utilizado pelo geólogo Luiz Flores de Moraes Rego, para designar a área em que se concentram as jazidas de ferro na região central de Minas Gerais, como relata Machado (2009) em seu artigo sobre as mesmas. O termo foi cunhado na literatura por Dorr (1969), que o utilizou para designar a área “clássica da geologia do Pré Cambriano” que abriga diversos depósitos de minério de ferro. É delimitada por linhas aproximadamente retas, delimitadas pelos municípios de Itabira a NE, Mariana a SE, Congonhas a SW e Itaúna a NW (Dorr, 1969).

A região possui vasta riqueza mineral, que é conhecida e explorada desde o século XVII, alavancada pela descoberta do ouro aluvionar, se intensificando ao longo do tempo e alcançando níveis altamente tecnológicos de mineração no século XXI (Machado, 2009). Essa diversidade singular é resultante de sucessivos eventos geológicos e foi evidenciada por Alkmin e Marshak (1998). A estratigrafia proposta por esses autores organiza as unidades geológicas da região segundo a Figura 4.

Na base da estratigrafia, estão as rochas do Embasamento Cristalino: complexos metamórficos que datam do Arqueano, formados por gnaisses migmatíticos, granitos, granodioritos anfibólitos e rochas ultramáficas, polideformados e remobilizados (Carneiro, 1992).

Acima do embasamento, encontra-se o Supergrupo Rio das Velhas, uma sequência greenstone belt que abrange os Grupos Nova Lima, Quebra Osso e Maquiné. O Nova Lima é composto por filitos, xistos cloríticos e sericíticos, rochas máficas e ultramáficas, formações ferríferas bandadas, metacherts e metadolomitos (Raposo, 1995). O Grupo Maquiné é composto por quartzitos e filitos de composição variada, indicando fácies litorânea ou fluvial, evidenciando a variação do nível do mar durante a deposição (Dorr, 1969).

Acima do Supergrupo Rio das Velhas, encontra-se o Supergrupo Minas, subdivido em três grupos. O Caraça é o grupo basal, constituído por quartzitos intercalados com filitos e conglomerados e filitos sericíticos, carbonosos ou ferruginosos. O grupo intermediário é o Itabira composto principalmente por formações ferríferas bandadas (Formação Cauê), estando presente também

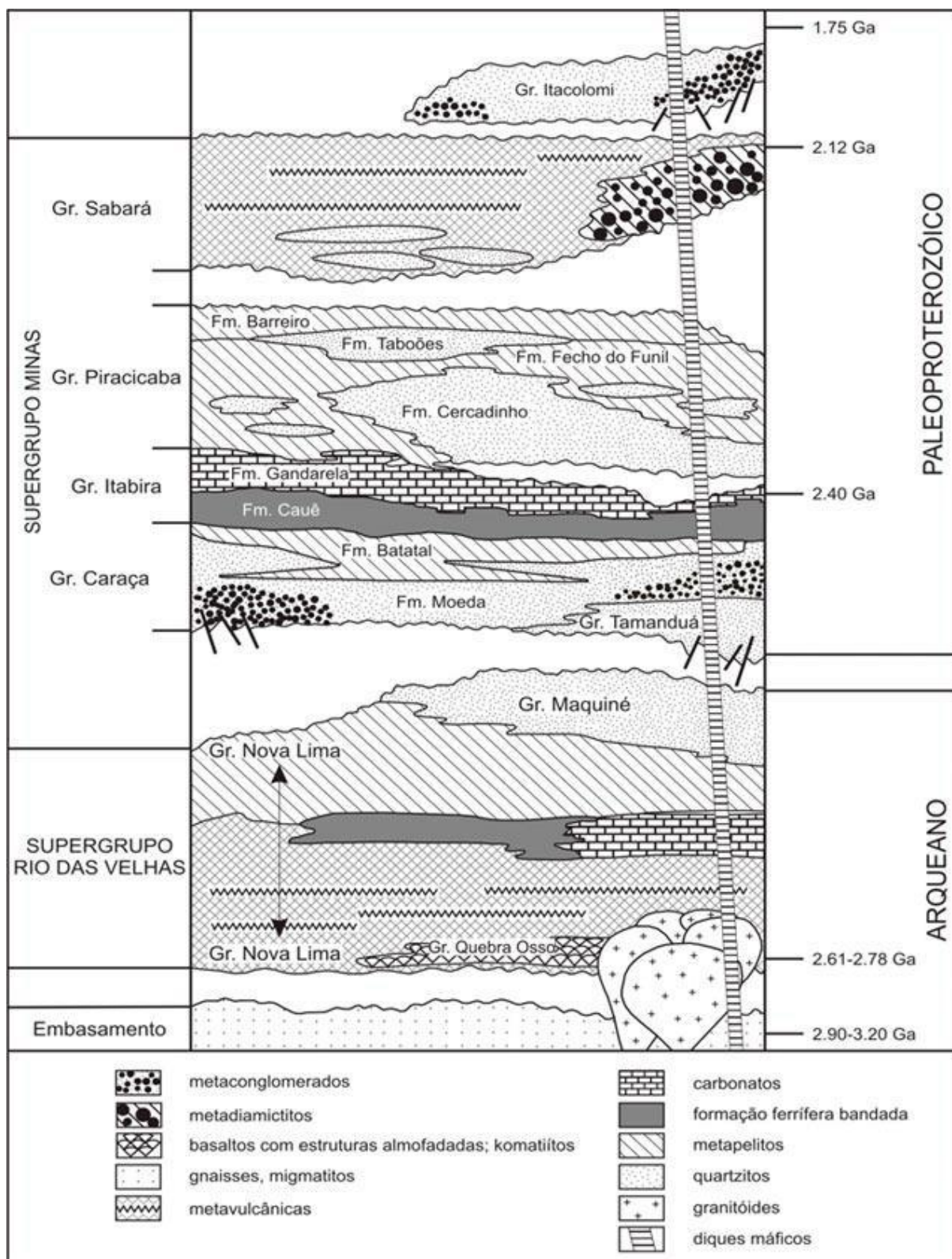
carbonatos, quartzitos e filitos. No topo do SG Minas, encontra-se o Grupo Sabará, a porção mais jovem e mais espessa, formado por cloritas xisto, conglomerados, grauvacas, filitos e raras ocorrências de formações ferríferas bandadas (Dorr, 1969).

Nas porções sudeste e sul do QF, a coluna estratigráfica ainda apresenta o Grupo Itacolomi, localizado acima do Supergrupo Minas. Encontra-se discordantemente depositado dos demais, e é constituído por quartzitos conglomeráticos com seixos de formações ferríferas, filito quartzito e quartzo de veio (Alkmim, 2014), sendo recoberto ainda por formações cenozoicas, com presença recorrente de linhitos, folhelhos, arenitos, argilitos e conglomerados (Silva, 2005).

As couraças se encontram presentes em diferentes níveis da estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero, associadas às litologias ricas em ferro ou antigos terraços fluviais cimentados por uma matriz ferruginosa (Machado, 2018). No entanto, para este trabalho, o foco se mantém nas couraças relacionadas ao Grupo Itabira, Formação Cauê, por ser a aflorante na região. Sendo assim, encontram-se associadas à itabiritos, itabiritos dolomíticos, dolomitos ferruginosos e filitos.

O clima da região é descrito por Davis *et al.* (2004) como predominantemente úmido, com precipitações médias anuais entre 1272 e 2035 mm. A amplitude térmica fica em torno de 21°C, com temperaturas médias entre 8° e 29°C. No entanto, são altamente influenciadas pela litologia, já que em regiões próximas às couraças a amplitude térmica pode atingir 46°C (Jacobi & Carmo, 2012).

A área possui geomorfologia complexa e a gênese e evolução dessas formas de relevo vem sendo estudadas com afinco desde o início do século XX, sem, no entanto, se chegar a um consenso sobre todos os aspectos envolvidos. (Machado, 2018). É consenso porém que soerguimentos isostáticos foram de extrema relevância para a evolução do relevo regional (Salgado, 2006), que pode ser dividido em três grandes compartimentos (Salgado & Carmo, 2015): as áreas de topo que se encontram recobertas por litologias mais resistentes, principalmente itabiritos, quartzitos e couraças, resistindo assim aos processos de denudação; as áreas intermediárias formadas por vertentes fortemente inclinadas, dominadas por xistos e filitos; e as áreas de base constituídas principalmente pelo Supergrupo Rio das Velhas, expostas principalmente em áreas de grandes drenagens, como Rio das Velhas e Rio Doce, por exemplo.



**Figura 4:** Coluna estratigráfica Quadrilátero Ferrífero (Alkmin e Marshak, 1998).

Por se encontrar em uma área de transição entre os domínios do Cerrado e dos Mares de Morro, o Quadrilátero ferrífero apresenta fisionomias típicas tanto dos domínios do Cerrado quanto da Mata Atlântica (Brasil, 2006). Segundo Jacobi e



Carmo (2012), a combinação das características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e climáticas da região propicia condições para a existência de uma rica biodiversidade, coexistindo em uma pequena área diferentes ecossistemas. Diferentes tipos de vegetação também se encontram associadas a litologias específicas, como campos rupestres acima dos carbonatos de Gandarela (Lamounier *et al*, 2010) e os campos rupestres ferruginosos, associados aos afloramentos ricos em ferro (Rizzini, 1979; Jacobi & Carmo, 2011).

Os Campos Rupestres Ferruginosos são formações herbáceo- arbustivas associadas a substratos ferruginosos, oriundos da alteração de itabiritos, jaspilitos e couraças (Rizzini, 1979; Jacobi & Carmo, 2011). São classificadas por Veloso (1991) como refúgios floristicamente diferentes da flora exterior, e com uma capacidade adaptativa extraordinária, por se adaptar a solos tão peculiares como os provenientes da alteração de couraças (Schaefer *et al*, 2008).

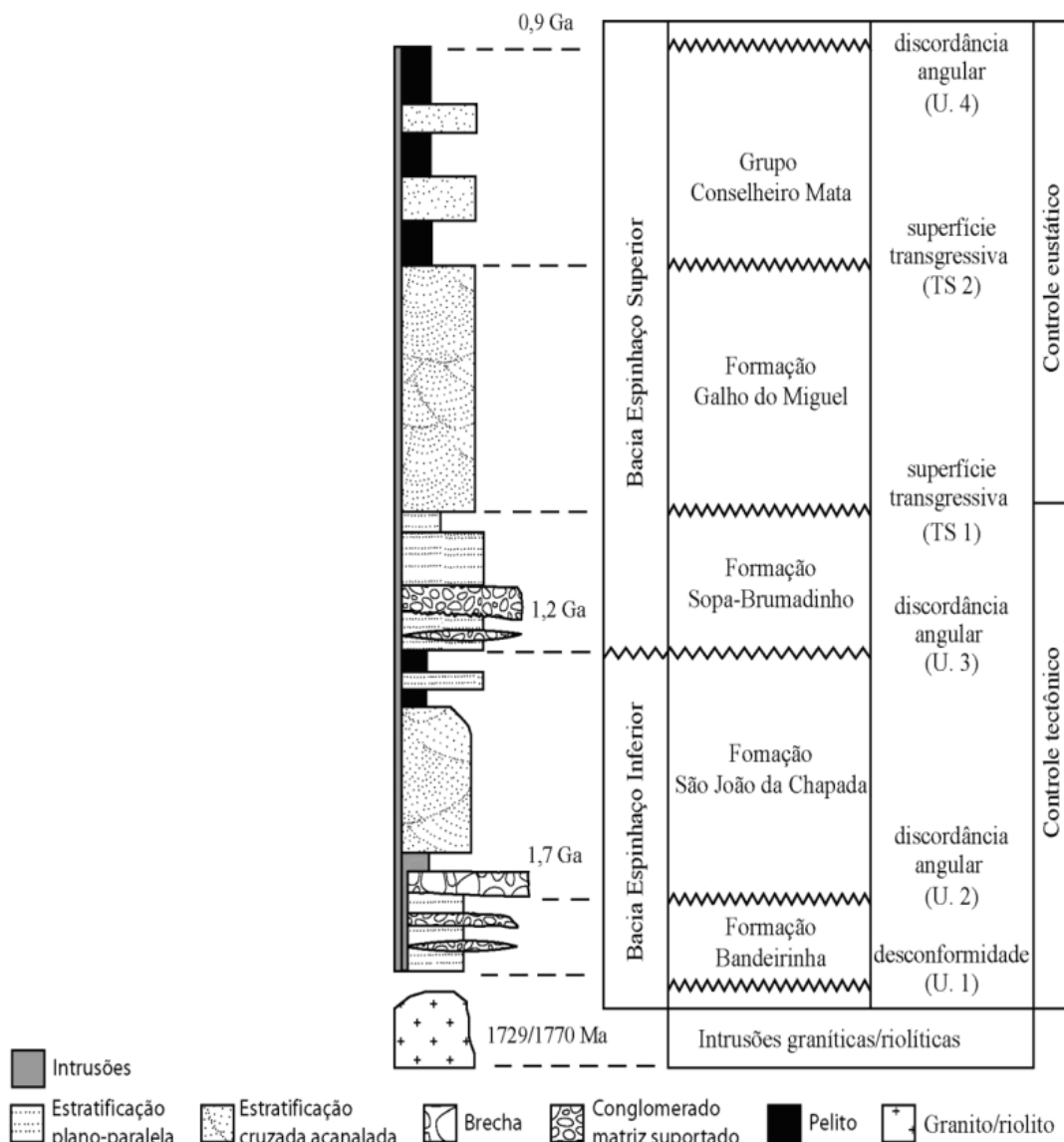
Os solos presentes na região e sua distribuição possuem estreita relação com a litologia e a evolução geológica da região, das quais também dependem o relevo (Varajão *et al*, 2009). Já a relação entre solo e paisagem no Quadrilátero Ferrífero foi melhor estudada por Carvalho Filho *et al*. (2010), que segmentou a região segundo as litologias e feições estruturais presentes, descrevendo as ocorrências de solo em cada uma delas. De modo geral, em áreas mais baixas, como depressões, imediações de serras e rampas coluvionares, encontram-se Latossolos Vermelhos, muitas vezes associados a Cambissolos, presentes nas vertentes desses vales e encostas não tão íngremes. Em relevos acidentados predominam os Neossolos, intimamente relacionados ao material parental. Há ainda relatos de Argissolos em trechos rebaixados e de grande dissecamento, Plintossolos relacionados a rochas da Formação Gandarela e Cauê e Gleissolos associados às pequenas áreas de várzea (Carvalho-Filho *et al*. 2010).

### **3.2 Serra do Espinhaço Meridional**

Geologicamente, o Supergrupo Espinhaço é o principal formador da Serra do Espinhaço Meridional. A Serra se estende por mais de 1200 km pelos estados de Minas Gerais e Bahia (Knauer, 2007). É seccionada em setentrional e meridional por uma zona deprimida de orientação NW- SE, passando pelo município de Couto de Magalhães, a norte de Diamantina. Os estudos geológicos da porção sul tiveram início

no início do século XVIII, impulsionados pela descoberta de depósitos diamantíferos, resultando numa discrepância muito grande entre as informações já obtidas sobre as duas porções (Knauer, 2007).

A coluna estratigráfica proposta por Chemale Jr. *et al.* (2011) segmenta o Supergrupo Espinhaço, em sua porção meridional, em Bacia Inferior e Superior, controladas, respectivamente, por tectônica e eustasia (figura 5). Na base da Bacia Inferior, encontra-se depositada a Formação Bandeirinha, constituída por quartzitos micáceos, com estratificações cruzadas de médio porte, metaconglomerados matriz-suportados e, mais raramente, rochas xistosas intercaladas na base (Knauer, 2007). Sobreposta a ela, mas angularmente discordante, encontra-se a Formação São João da Chapada constituída por quartzitos, metaconglomerados polimíticos, metabrechas, filitos hematíticos intercalados com rochas associadas, xistos verdes, rochas com mais de 70% de cloritóides e raros turmalinitos finos (Knauer, 2007).



**Figura 5:** Coluna estratigráfica simplificada do Supergrupo Espinhaço (Chemale Jr. *et al.*, 2011).

Na porção basal da Bacia Superior, encontra-se a Formação Sopa Brumadinho, bastante estudada devido a seu caráter diamantífero. É constituída por filitos, quartzitos, metaconglomerados (localmente diamantíferos), siltitos e metasiltitos, de composição variada, de micáceos a ferruginosos, chegando a aparecer corpos concordantes e discordantes de filitos hematíticos (Knauer, 2007). Há também o registro local de carbonatos e fosfatos (Mourão, 1995). Estratigraficamente acima, encontra-se a Formação Galho do Miguel (Chemale Jr. *et al.*, 2011) caracterizada quase exclusivamente por quartzitos puros e finos, com poucas ocorrências de quartzitos micáceos e metargilitos (Knauer, 2007). No topo da coluna proposta por Chemale Jr. *et al.* (2011), encontra-se o Grupo Conselheiro Mata

composto por quartzitos, filitos, metaconglomerados, metabrechas, metassiltitos, metargilitos, podendo aparecer rochas calcáreas no topo.

Os registros de couraças no Supergrupo Espinhaço encontram-se associados à presença dos filitos hematíticos nas formações São João da Chapada e Sopa Brumadinho. Ambos se encontram estratigraficamente contextualizados nos quadros 1 e 2, elaborados por Almeida Abreu & Pflug (1994). Knauer (2007) descreve os filitos hematíticos da formação mais basal como predominantemente compostos por sericita e hematita, intercalados com rochas associadas, como xistos verdes e rochas com mais de 70% de cloritóides e turmalinitos. Já os filitos hematíticos da Formação Sopa Brumadinho estão relacionados ao Membro Caldeirões, associados à quartzitos, muitas vezes ferruginosos, metaconglomerados e quartzito filitos.

Saadi (1995) relata a presença das couraças associadas a filitos relacionando-as a aspectos do relevo. Elas ocorrem no Planalto Diamantina, em altitudes entre 1200 e 1400 m, em meio a inselbergs quartzíticos e associados a turfeiras sobrepostas a areias, cascalhos fluviais e/ou coluviais, cobertas por solos arenosos. São relatadas também na Depressão Gouveia, entre 1250 e 1300 m de altitude, uma superfície dissecada que trunca rochas arqueanas e proterozóicas. Sobre essas superfícies encontram-se os filitos hematíticos e/ou rochas metabásicas, laterita ferruginosa nodular e turfeiras.

Como mencionado anteriormente, a área de interesse desse estudo se localiza no Espinhaço meridional, onde o clima é caracterizado como Tropical Montanhoso, segundo Koppen, com temperaturas anuais médias entre 16,8°C e 19,9°C e pluviosidade média de 8,3mm/mês na estação seca e 181,7 mm/mês na chuvosa (Nimer, 1977). Já segundo Neves *et al.* (2005), o clima da região é subtropical de altitude, Cwb na classificação de Koppen, com temperaturas médias entre 18° e 19°C e precipitação entre 1250mm e 1550mm, além de afirmar que é fortemente influenciado pelo fator orográfico, onde as zonas externas mostram um significativo aumento de temperatura. No entanto, ambos concordam que se trata de um clima com verões amenos e úmidos e invernos secos e mais frescos.

A Serra do Espinhaço é uma feição orogênica resultante de uma tectônica compressiva com cavalgamentos em rochas quartzíticas e de dissecção fluvial, resultando em cristas, escarpas e vales profundos adaptados às direções tectônicas e estruturais (Saadi, 1995). A Serra é parte de um grande escarpamento que separa o interior do continente da fachada atlântica, separando a bacia do Rio São Francisco

e as bacias hidrográficas costeiras, além de demarcar a significativa diferenciação entre as altitudes mais elevadas do interior do continente e as mais baixas, localizadas na borda (Valadão, 2009).

Assim como o Quadrilátero Ferrífero, o Espinhaço Meridional é recoberto por vegetações características de diferentes biomas. Em sua encosta oriental encontra-se a floresta estacional semi-decidual, característica da Mata Atlântica, enquanto na borda ocidental, predomina a vegetação típica de cerrado. Há registros ainda de Campos Rupestres de Altitude como refúgios ou faixas de transição (Gontijo, 2008).

**Quadro 1:** Estratigrafia Supergrupo Espinhaço (Almeida Abreu & Pflug, 1994).

| SUPERGRUPO ESPINHAÇO | GRUPO            | FORMAÇÃO                | LITOLOGIA | ESPESSURA (METROS)  |              |
|----------------------|------------------|-------------------------|-----------|---|--------------|
|                      | CONSELHEIRO MATA | 9 - RIO PARDO GRANDE    |           | PELITOS, ARENITOS, LOCALMENTE CARBONATOS  | 60 - 1000 ?  |
|                      |                  | 8 - CÔRREGO PEREIRA     |           | ARENITOS (PUROS, MICÁCEO OU FELDSPÁTICO), LOCALMENTE PELITOS  | ~250         |
|                      |                  | 7 - CÔRREGO DA BANDEIRA |           | PELITOS, ARENITOS   | 100 - 200    |
|                      |                  | 6 - CÔRREGO DOS BORGES  |           | ARENITOS (PUROS OU MICÁCEOS), LOCALMENTE BRECHA / CONGLOMERADOS QUARTZÍTICOS                                | ~100         |
|                      |                  | 5 - SANTA RITA          |           | PELITOS, SUBORDINADAMENTE ARENITOS  | 100 - 250    |
|                      | GUINDA           | 4 - GALHO DO MIGUEL     |           | ARENITOS, LOCALMENTE LEITOS PELÍTICOS DELGADOS  | 500 - 3000 ? |
|                      |                  | 3 - SOPA BRUMADINHO     |           | VERTABELA 2   | 0 - 250      |
|                      |                  | 2 - SÃO JOÃO DA CHAPADA |           | ARENITOS (MÉDIOS A GROSSEIROS, PUROS OU MICÁCEOS), FILITOS HEMATÍTICOS, CONGLOMERADO/BRECHA BASAL           | 0 - 300      |
|                      |                  | 1 - BANDEIRINHA         |           | ARENITOS PUROS OU MICÁCEOS (INCLUINDO RED BEDS), CONGLOMERADOS (SUBORDINADO), LOCALMENTE BRECHAS E PELITOS. | 0 - 200      |

**Quadro 2:** Estratigrafia da Formação Sopa–Brumadinho (Almeida Abreu & Pflug, 1994).

| FORMAÇÃO SOPA-BRUMADINHO | MEMBRO        | FÁCIES            | LITOLOGIA   | ESPESSURA |
|--------------------------|---------------|-------------------|---|-----------|
|                          | CAMPO SAMPAIO | LACUSTRE SUPERIOR | PRINCIPALMENTE PELITOS (LOCALMENTE COM NÍVEIS RICOS EM TURMALINA), ARENITOS (MICÁCEOS OU NÃO), DIAMICTITOS (EM LEITOS OU PREENCHENDO PALEOCANAIS). FILITOS HEMATÍTICOS E VULCÂNICAS BÁSICAS | 0 - 60    |
|                          | CALDEIRÕES    | ALUVIAL / LEQUES  | ARENITOS (PUROS, MICÁCEOS OU FERRUGINOSOS), ARENITOS CONGLOMERÁTICOS, CONGLOMERADOS POLI-OU-MONOMÍTICOS GERALMENTE SUPOSTOS PELOS SEIXOS, FILITOS HEMATÍTICOS E XISTOS VERDES.              | 50 - 150  |
|                          | DATAS         | LACUSTRE INFERIOR | PRINCIPALMENTE PELITOS, SUBORDINADAMENTE ARENITOS, LOCALMENTE XISTOS VERDES E/OU FILITOS HEMATÍTICOS  | 0 - 100 ? |

Os solos mais desenvolvidos associados ao Supergrupo Espinhaço Meridional encontram-se associados a rochas metabásicas ou metapelíticas, são distróficos, argilosos, com horizonte A espesso e rico em matéria orgânica. Já sobre afloramentos quartizíticos, os solos predominantes são rasos e arenosos (Valente, 2009; Rezende & Salgado, 2011).

## **4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

### **4.1 Amostragem**

Feições tubulares como as descritas como registros da atividade da flora na transformação de solos foram observadas em horizontes de couraças no Quadrilátero Ferrífero e na Serra do Espinhaço. Os conjuntos de amostras estudadas foram coletadas em horizontes de couraça fragmentada ou em rampas na base de vertentes formadas pela desintegração destas, e agrupadas de acordo com a região em que foram coletadas. Ambos pertencem a uma coleção que vem sendo montada ao longo dos anos e está depositada no Laboratório de Geomorfologia Aplicada e Gestão Ambiental do Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa, GAGEA/CPMTC.

A coleção Quadrilátero Ferrífero é composta por exemplares coletados nos municípios de Nova Lima e Belo Horizonte, nas coordenadas de 20°03'20'S e 43°59'48'W, e 19°59'17'S e 43°57'23' respectivamente, ambos em taludes expostos pela abertura de estradas.

Já a coleção Espinhaço compreende exemplares coletados pelo Professor Doutor Adolf Heinrich Horn, durante levantamentos geológicos passados. O ponto de coleta se encontra numa cava onde ocorria a exploração de diamante nas coordenadas 18°26'52'S e 43°38'45'W, no município de Datas, a 276 quilômetros de Belo Horizonte.

### **4.2 Análises físicas, químicas e mineralógicas**

As amostras foram agrupadas em dois grandes grupos representativos das duas regiões de coletas. As provenientes da região da Serra do Espinhaço foram denominadas como ESP, e as provenientes do Quadrilátero Ferrífero de QF.

A descrição macroscópica foi realizada utilizando-se uma lupa com aumento de 20x com o objetivo de identificar previamente a mineralogia, textura e estrutura presentes nas amostras. A partir disso, foram selecionadas determinadas amostras submetidas posteriormente a imageamento por Microscopia Eletrônica de Varredura.

A caracterização mineralógica do material se deu por Difractometria de Raios-X e a química por Espectometria de Fluorescência de Raios-X. A primeira delas

responsável por identificar as fases mineralógicas predominantes. Após a caracterização macro e micromorfológica, amostras selecionadas foram pulverizadas e depositadas no porta amostra, de modo a preenchê-lo totalmente, para então serem compactadas e levadas ao difratômetro X'Pert Panalytical, para a análise de fração pó total, com radiação de  $\text{CuK}\alpha$ , no intervalo de  $2^\circ$  a  $70^\circ 2\theta$ . Os difratogramas foram interpretados através do Software X'Pert HighScore Plus, possibilitando uma análise semi-quantitativa das fases minerais presentes, segundo Brindley & Brown (1980). Todo o processo de difratometria foram realizados no Laboratório do Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa, Universidade Federal de Minas Gerais. A Fluorescência de Raio- X apresenta os teores de óxidos majoritários de Fe, Al, Si entre outros. Para tais análises, as amostras enviadas em sua forma bruta foram secas, submetidas a britagem de 75% a 3mm, homogeneização, quarteamento em Jones para, por fim, ser submetida a pulverização de 250 a 300 g de amostra em moinho de aço, 95% a 150 mesh. Tanto a preparação quanto a análise por Fluorescência foram realizadas no laboratório SGS GEOSOL Laboratórios Ltda.

#### **4.3 Análises micromorfológicas e petrográficas em seções delgadas por microscopia óptica**

Amostras representativas de cada coleção foram selecionadas para a confecção de lâminas delgadas e polidas para a petrografia microscópica e para a caracterização micromorfológica, por microscopia ótica. Nesse processo, fragmentos indeformados das amostras foram transformados em lâminas delgadas, com dimensões de 1,8 x 30 x 40 mm. Amostras mais friáveis precisaram ser impregnadas com resina para a confecção das lâminas, conforme recomendado por Filizola e Gomes (2009). A laminação foi realizada no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. Foram confeccionadas 07 lâminas de amostras do Grupo Espinhaço e 4 do Grupo Quadrilátero Ferrífero.

A análise petrográfica em escala microscópica foi realizada com o objetivo de identificar aspectos como a constituição mineralógica, a classificação modal, texturas e estruturas presentes, possíveis produtos de alteração, além de informações individualizadas sobre os grãos que compõem as amostras, como forma, tamanho e contato entre eles. A micromorfologia descreve transformações mineralógicas e



estruturais as quais o material foi submetido para então identificar os possíveis processos atuantes sobre ele. Ambas foram realizadas segundo os parâmetros estabelecidos por Stoops (2003), e em microscópio ópticos trinoculares da marca Zeiss, modelo Axiophot, com câmera digital integrada para registros fotográficos, nos Laboratório de Microscopia Óptica do Instituto de Geociências da UFMG e do Departamento de Geologia da UFOP. Análises petrográficas e micromorfológicas complementares ainda foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais e de Revestimento.

#### **4.4 Análises microquímicas e micromorfológicas**

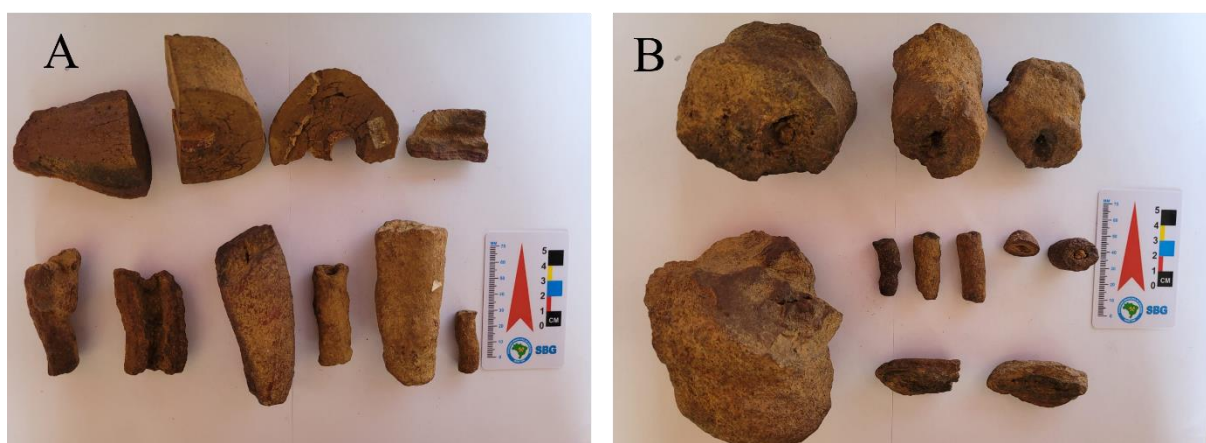
As seções previamente descritas em microscópio petrográfico foram selecionadas e, das 11 lâminas analisadas, 4 foram selecionadas para serem submetidas a imageamento e análises microquímicas através de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), sendo duas lâminas representativas de cada grupo. Também foram submetidas ao MEV fragmentos das estruturas tubulares para identificação das estruturas presentes. O Microscópio Eletrônico de Varredura fornece informações detalhas da amostra através do imageamento por emissão de elétrons retroespalhados (BSE – Backscattering Electrons), detalhando estruturas em escala microscópica. Para as análises associadas ao MEV, fragmentos de amostras e lâminas foram recobertas por um filme metálico de grafite e os procedimentos foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica do CPMTC do Instituto de Geociências e do Centro de Microscopia, ambos pertencentes à Universidade Federal de Minas Gerais. O equipamento utilizado foi Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM-6510, com detector de catodoluminescência.

Já para análises microquímicas, as amostras foram submetidas a análise por Microscopia Eletrônica de Varredura, associada a sensores EDS (Energy Dispersive System). Ao ser acoplado ao sistema de EDS, o MEV possibilita a determinação da composição qualitativa e semi-qualitativa das amostras, apresentadas em perfis ou mapas químicos. Para determinada análise, as lâminas precisaram ser cobertas por um filme metálico de grafite. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Microanálises da Universidade Federal de Ouro Preto.

## 5 RESULTADOS

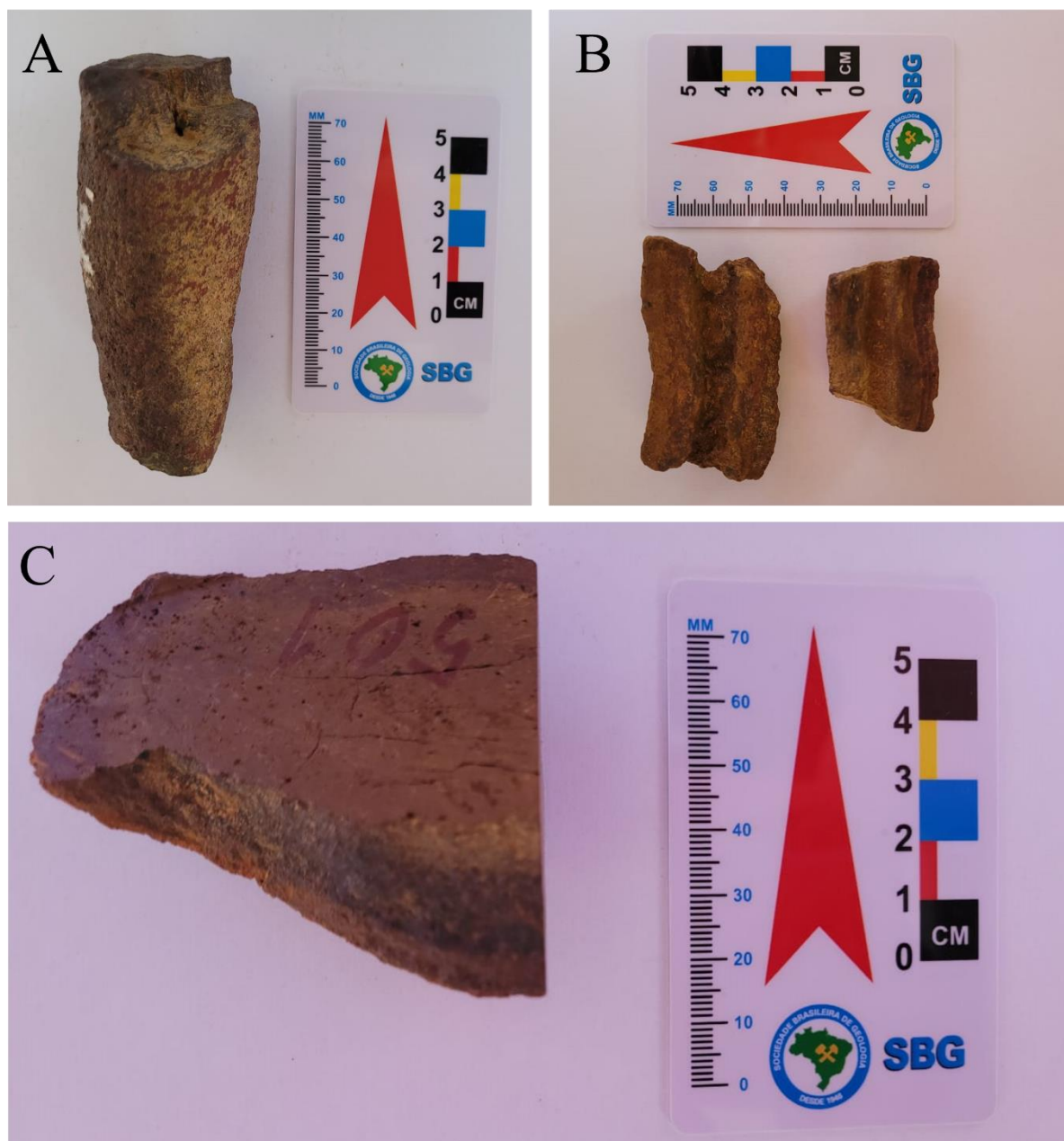
### 5.1 Descrição macroscópica

Foram descritas amostras brutas, representativas das duas regiões analisadas, representando os dois grupos, ESP e QF (Figura 6a e 6b, respectivamente). Em ambos, encontramos amostras de 2 a 15 cm de comprimento, em sua maioria, cilíndricas e esféricas, conservando, muitas vezes, as formas tubulares que as caracterizam. Apresentam colorações em tons avermelhados, indicando uma composição predominantemente composta por minerais ferruginosos. No entanto, mesmo com o auxílio de uma lupa de 20x de aumento, não é possível identificar grãos minerais, o que mostra que os minerais ocorrem em tamanhos muito pequenos.



**Figura 6:** (A) Amostras representativas do ESP e (B) Amostras representativas do QF.

As amostras que compõem o Grupo Espinhaço (ESP) são, em sua maioria, arredondadas em corte transversal e em formato cônico-cilíndrico em corte longitudinal, ou seja, cilíndricas com uma extremidade de maior raio que a outra (Figura 7a). Ao serem seccionadas de forma transversal ou longitudinal apresentam variação de cores. Algumas amostras são avermelhadas em toda a seção (Figura 7c), enquanto outras apresentam tons mais avermelhados nas bordas e amarelados no centro (Figura 7b). Na maior parte das amostras não é possível identificar estruturas ou texturas, como por exemplo, bandamentos e foliações. A única feição morfológica presente nessas amostras são espaços vazios no centro, cujas paredes internas são bastante lisas.



**Figura 7:** Amostras do ESP, destacando: (A) aspecto cônico-cilindro de uma amostra; (B) variação interna de cores, vazio central e aspecto rugoso da textura e (C) cor homogênea e ausência de foliações e bandeamentos visíveis a olho nu.

As amostras do Quadrilátero Ferrífero (QF) apresentam formas arredondadas (transversal) e cilíndricas (longitudinal) (Figura 8a). Sua coloração é composta por tons avermelhados e amarelados, apresentando ainda camadas mais escuras, em tons preto-acinzentados. Tal como nas amostras do ESP, os tons avermelhados predominam nas bordas e os amarelados na porção central (Figura 8c) Apresentam também cavidades, indicando uma possível dissolução, além da porção central com vazios circulares. Em algumas amostras, foi possível observar esses vazios centrais

preenchidos por material de cor amarela e tons mais claros e friável. Alguns exemplares do QF apresentam camadas com uma certa orientação e foliação que segue concordante com a superfície da feição e sua porção central (Figura 8b), ou seja, lineações do tipo concêntricas.



**Figura 8:** Amostras do QF, destacando: (A) aspecto arredondado de uma amostra; (B) pequenas lineações concêntricas concordantes com a superfície da amostra e (C) variação interna de cor em uma amostra, sendo avermelhado na borda e amarelada no centro.

## 5.2 Descrição microscópica

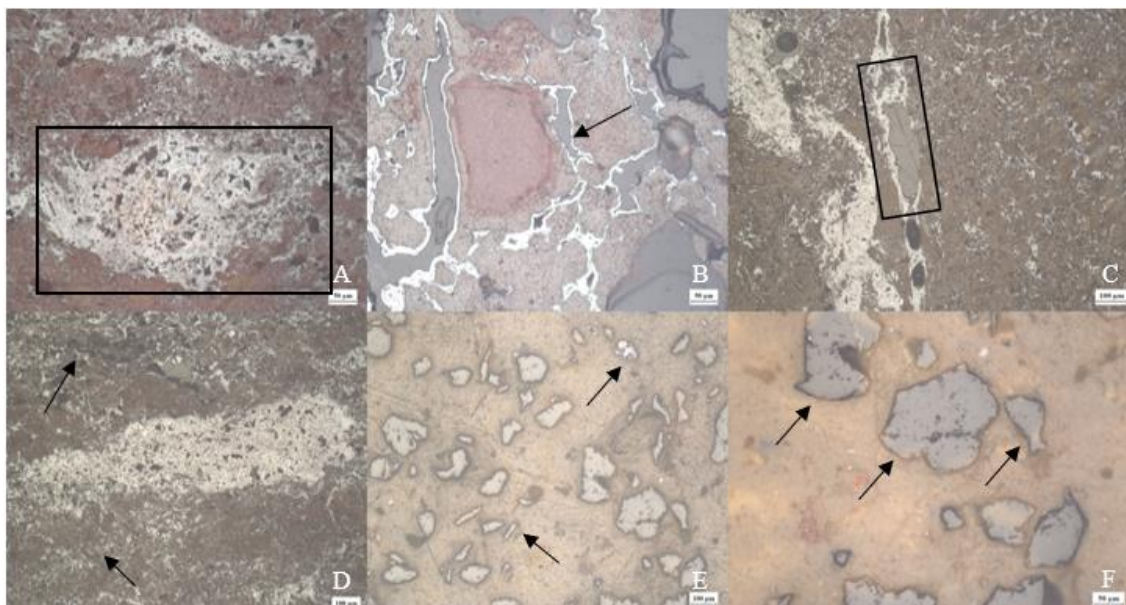
As onze lâminas foram analisadas em microscópio óptico sob luz transmitida e refletida. A análise sob luz transmitida tem o objetivo de identificar minerais transparentes, como silicatos por exemplo. Já a luz refletida permite identificar e descrever minerais opacos, como óxidos de ferro e alumínio. Uma descrição completa abrange detalhamento a respeito de arcabouço, matriz, cimento e feições atípicas.

### 5.2.1 Amostras ESP

A fábrica interna das feições tubulares do ESP tem seu fundo matricial caracterizado pela presença de um arcabouço, definido pelos constituintes grossos, pelo cimento, como constituinte fino principal, e por feições de revestimento e preenchimento.

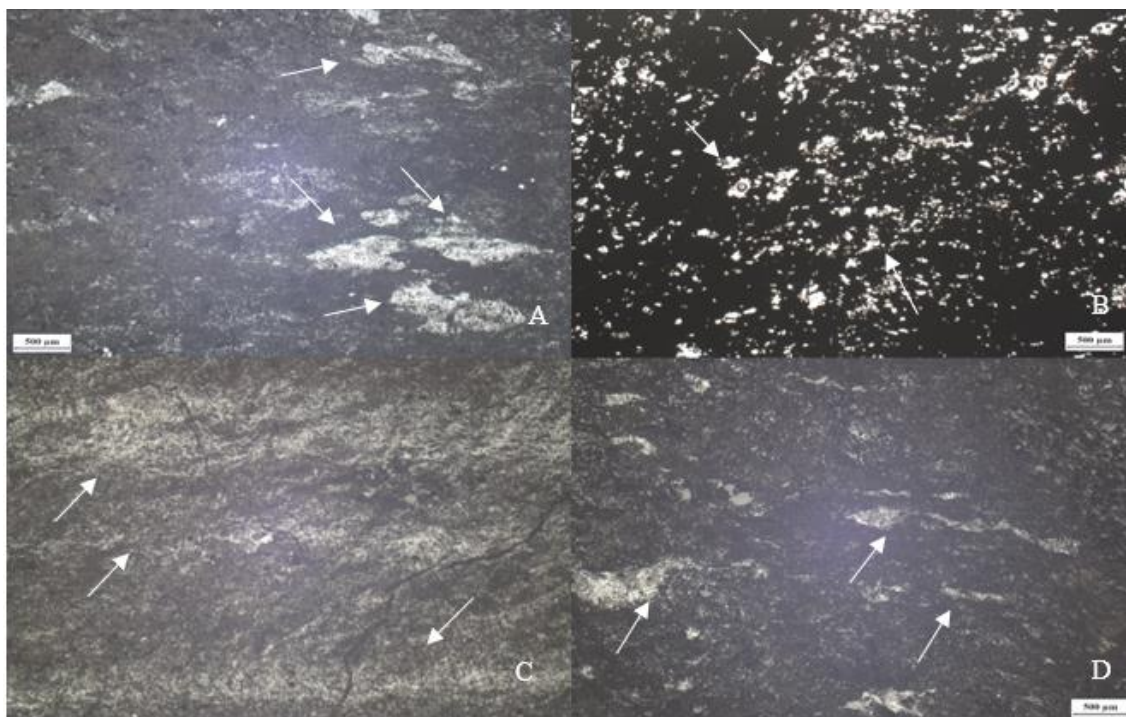
O arcabouço é formado por fragmentos de couraça placoidal, e grãos minerais soltos de magnetita, hematita, goethita e gibbsita e quartzo em menor quantidade. A magnetita aparece em cristais euédricos e anédricos, ambos apresentando transformação parcial para hematita (Figura 9F). A hematita, por sua vez, aparece muitas vezes como paletas, frequentemente orientadas (Figura 9D), resultando em uma foliação incipiente (Figura 9A). A goethita aparece como microcristais, apesar de

sua presença mais marcante ser no cimento (Figura 9E). Os grãos de quartzo apresentam aspectos ruiformes, com bordas careadas e fraturas inter e transminerais.



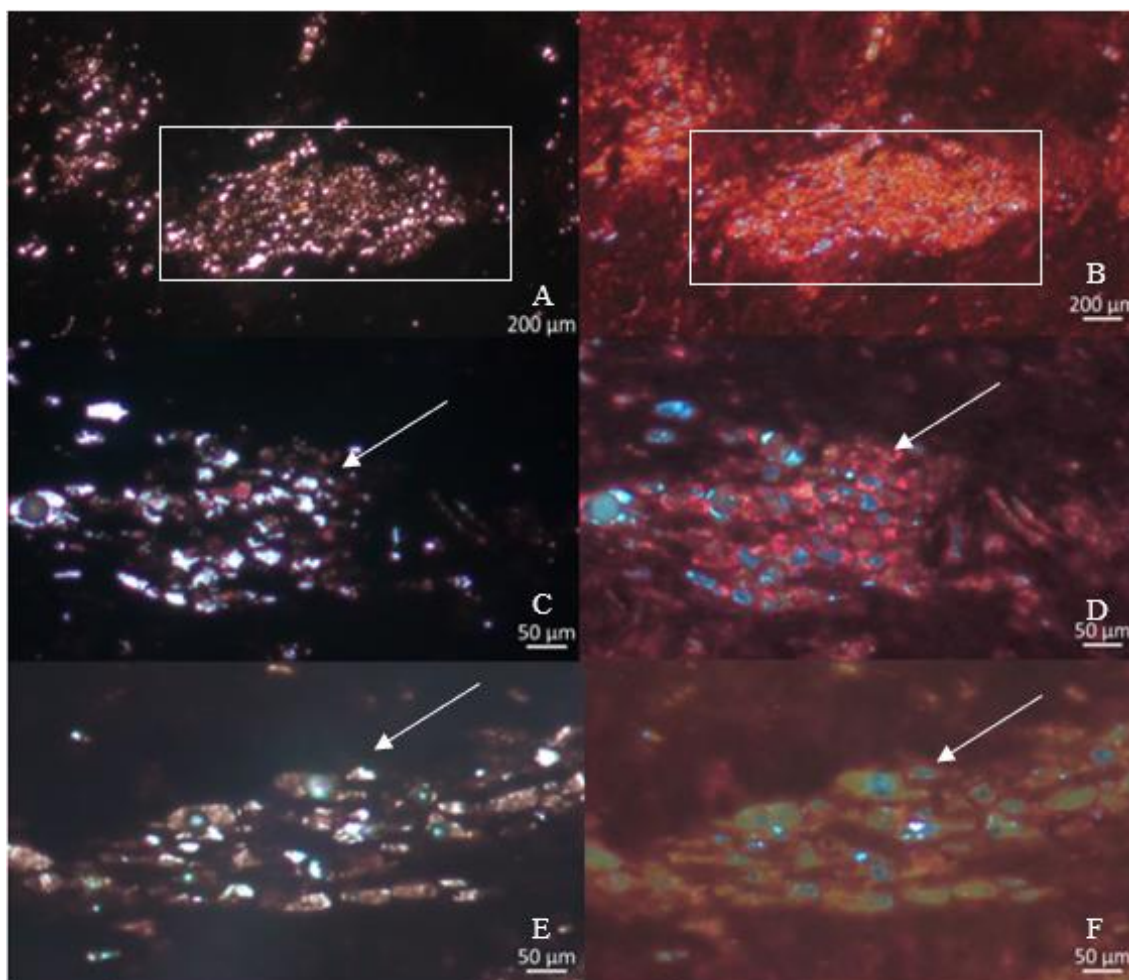
**Figura 9:** Feições observadas ao microscópio óptico sob luz refletida em amostras pertencentes ao ESP, onde observa-se (A) fragmentos de couraças placoidais, (B) grãos de hematita substituídas por goethita, (C) porosidades de formas anômalas preenchidas por hematita, (D) paletas de hematita orientadas, (E) grãos de quartzo preservados, (F) grãos de hematita euédricos.

Os microfragmentos de couraça placoidal (Figura 10), recentemente estudada por Milagres *et al.* (2021), preservam internamente a xistosidade dos filitos, que originalmente era marcada por uma alternância de bandas claras, compostas principalmente por micas, e escuras, compostas por minerais opacos, predominantemente hematita. Nas couraças placoidais, as micas foram alteradas para caulinita, e a reprecipitação do ferro ocorre pseudomorfizando a xistosidade (estrutura isalterítica). Outra evidência da pseudomorfose são os poros alongados, tanto planares quando em cavidades irregulares, que ocorrem orientados também de acordo com a xistosidade original da rocha. Esses microfragmentos apresentam bordas digitadas, irregulares, sinalizando sua dissolução no ambiente em que se encontram. No seu interior, são observadas porções amareladas que sugerem dispersão de ferro, resultante da alteração de óxidos de ferro e circulação de fluidos de intemperismo.



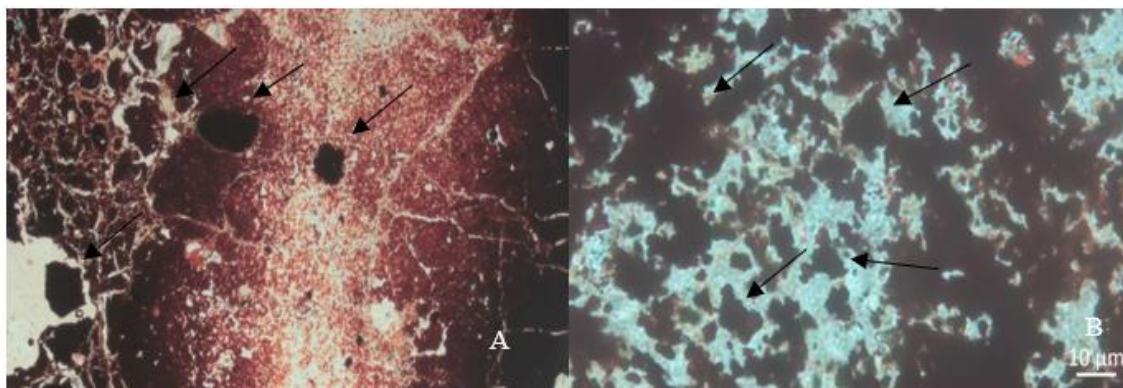
**Figura 10:** Fragmentos de couraça ferruginosa placoidal preservados em lâminas do ESP (A) dispersas em um cimento; (B) em algumas foram removidos os grãos de quartzo restando óxidos de ferro e porosidade; (C e D) outras preservam a xistosidade incipiente da rocha que as originou.

O cimento ocorre entre microfragmentos e grãos minerais e é caracterizado por uma cor vermelho-amarelada (Figura 9A e Figura 9C), possui composição goethítica, muitas vezes na forma de limonita. Encontra-se revestindo tais fragmentos e grãos, mas também preenchendo cavidades e porosidades, ou fraturas nos grãos de quartzo, e ainda como sobrecrescimento em grãos de hematita (Figura 9B). Nos domínios de maior concentração do cimento, é possível perceber seu aspecto alveolar, como septos separados por cavidades não conectadas, pequenas, subarredondadas, que microscopicamente parece indicar a influência do sistema de raízes. Sob luz transmitida e nicóis cruzados, apresenta cores anômalas (Figura 11). Tais estruturas se apresentam como agregados circulares, alongados ou poligonais (Figuras 11A e 11B).



**Figura 11:** Estruturas com aspecto alveolar, como septos separados por cavidades não conectadas, pequenas, subarredondadas, formados sob influência do sistema de raízes. Observadas sob luz transmitida (A) (C) (E) a nicóis paralelos(B) (D) (F) e nicóis cruzados, apresentando cores anômalas.

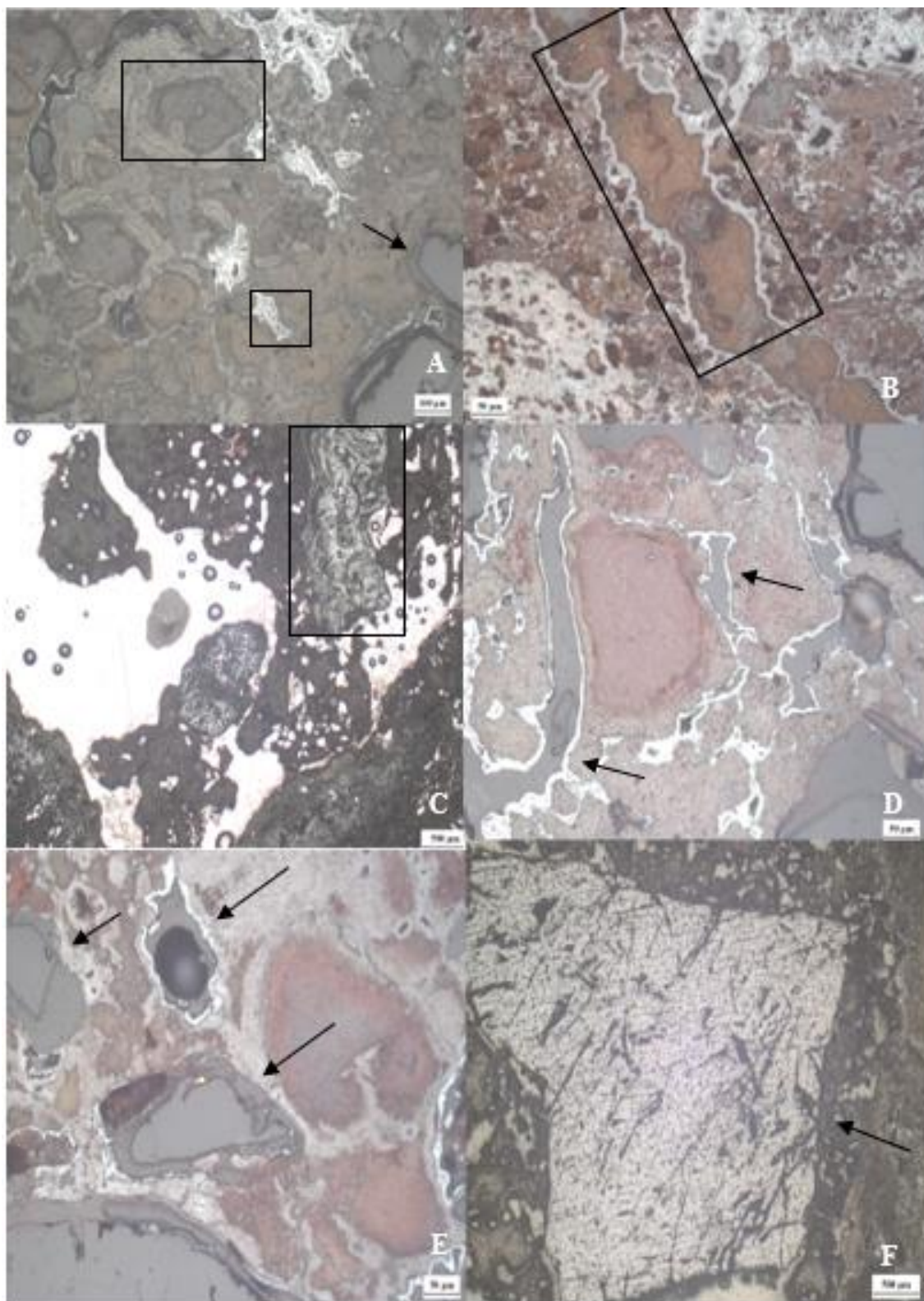
O cimento ainda se apresenta como agregados (Figura 12), devido a processos de fragmentação posterior a sua formação, resultando numa maior porosidade planar e sugerindo estágios mais avançados de alteração das feições tubulares.



**Figura 12:** Registros de estágios mais avançados de alteração da couraça, evidenciado pela formação de (A) nódulos e o (B) aumento da porosidade que tende a aumentar com a coalescência desses nódulos.

As feições de revestimento e preenchimento são semelhantes ao cimento em termos composicionais, mas diferem pela coloração mais amarelada a alaranjada e comportamento em luz refletida (Figura 13B). Os revestimentos ocorrem nas cavidades, inclusive aquelas no interior do cimento (alvéolos) e por isso sugerem processos de remobilização e reprecipitação de ferro, já que, segundo STOOPS (2003), trata-se de feições tipicamente iluviais (e sinalizam a remobilização do ferro, ainda que dentro do próprio perfil). Também ocorrem revestimentos associados aos fragmentos de placas ferruginosas e grãos minerais, que são envolvidos por um córtex de goethita (Figuras 13A, 13D e 13E), comuns em materiais ferruginosos submetidos a condições redox suficientes para a transformação dos óxidos em oxihidróxidos de ferro (NAHON, 1991).



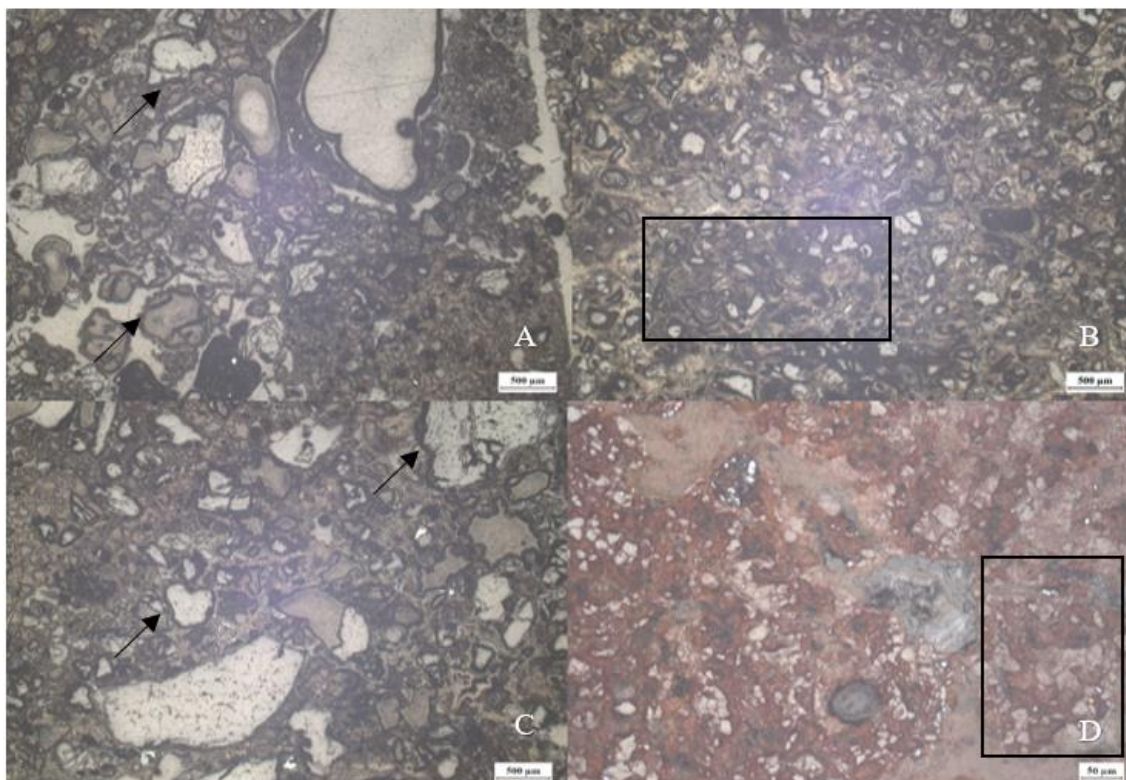


**Figura 13:** Diferentes feições descritas em lâminas provenientes do ESP: ( A ) diversas fases de sobrecrecimento; ( B ) preenchimento de cavidades por cimento goethítico denso; ( C ) cimentação parcial por goethita; ( D ) sobrecrecimento de goethita em grãos de hematita; ( E ) sobrecrecimento em cristais de hematita por hematita e goethita; ( F ) estruturas boxwork em que o formato do grão é preservado, mas sua composição alterada.

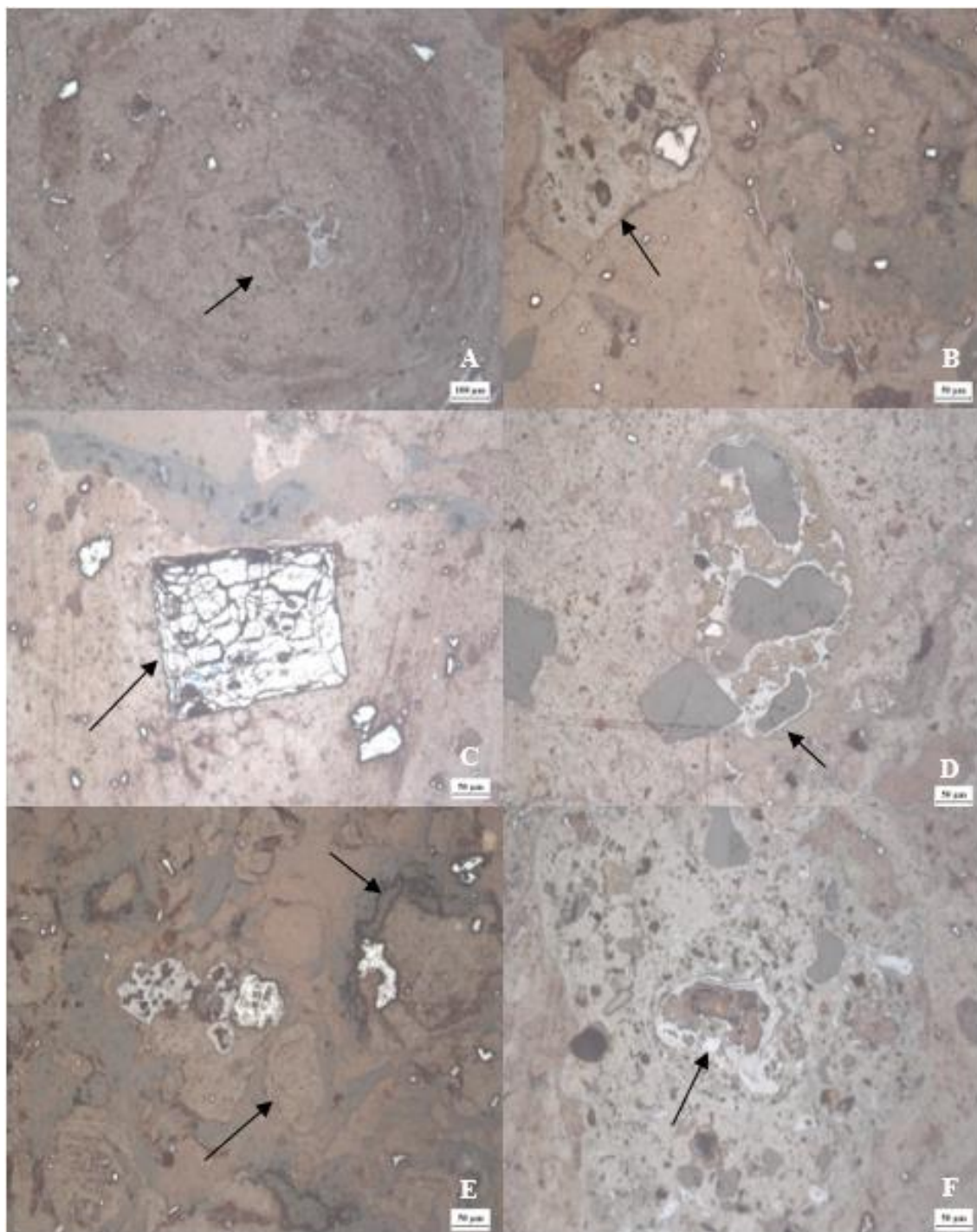
Os preenchimentos são do tipo intracavitários e envolvem a reprecipitação de hidróxidos de ferro no interior dos poros com grãos de quartzo caoticamente organizados, igualmente apresentando microlaminações sin-depositacionais (Figura 13C). Observa-se também box-work em que a estrutura do cristal é preservada, mas preenchida por outro material, nesse caso, goethítico (Figura 13F).

### 5.2.2 Grupo QF

As amostras pertencentes ao grupo QF revelam-se um pouco diferentes das amostras do ESP. Apesar da composição do arcabouço e cimento ser semelhante, com predomínio de minerais de ferro, eles assumem fábricas distintas. O arcabouço é composto por grãos minerais euédricos e alguns resquícios de diminutos fragmentos de couraça (Figura 14). Esses fragmentos apresentam fábrica interna maciça, onde não é possível perceber a pseudomorfose de alguma litoestrutura herdada. Possuem bordas irregulares e corroídas. De modo predominante, observa-se a presença de hematita, por vezes em agregados (figura 14 D), e apresentando diferentes estágios de alteração (Figura 15A e 15D). A magnetita é pontual (Figura 15B), estando quase sempre alterada para hematita, ou preenchida por um cimento goethítico, preservando muitas vezes somente a forma (Figuras 15B e 15E).



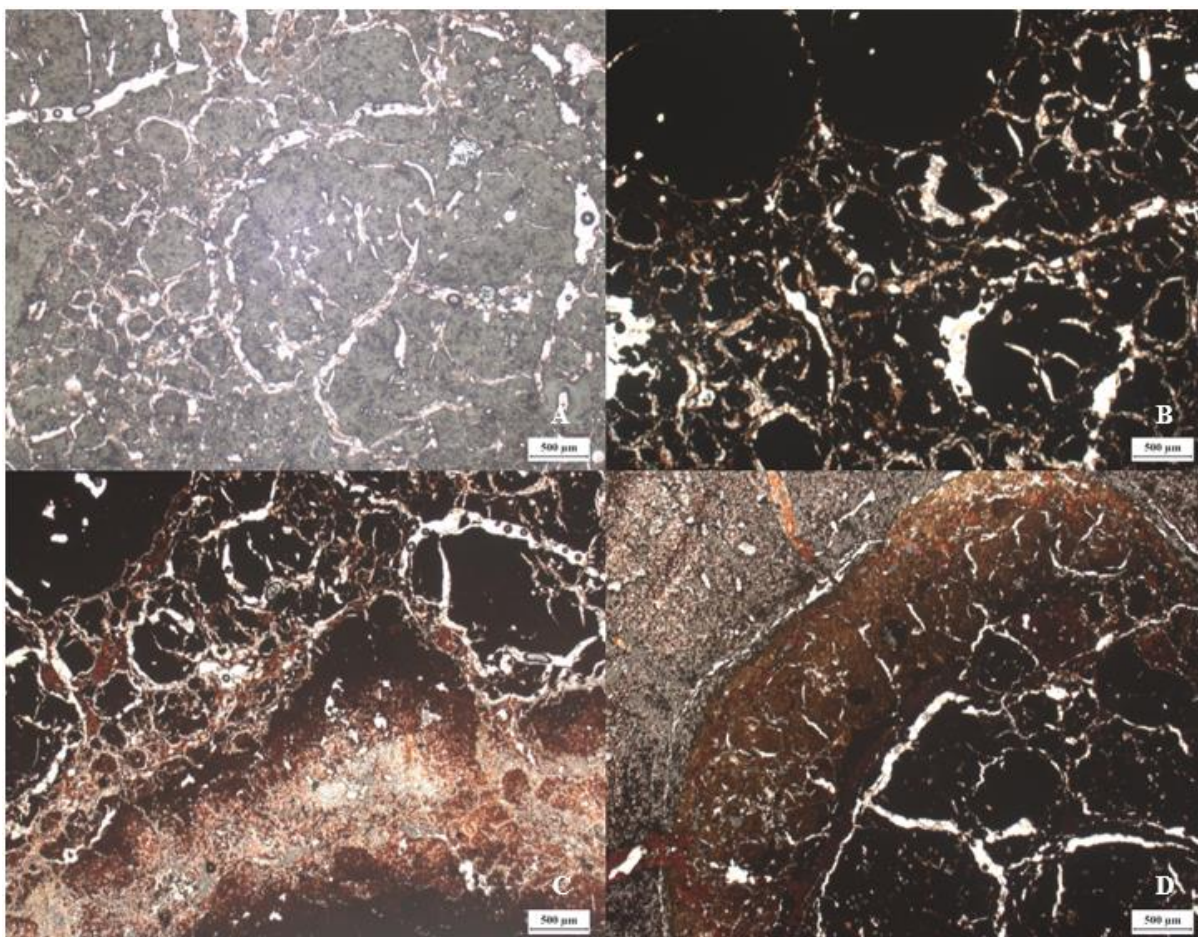
**Figura 14:** Aspectos gerais das lâminas pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero apresentando arcabouço formado por grãos minerais de diferentes dimensões (A, C), além de fragmentos de couraça (B, D).



**Figura 15:** Feições observadas em lâminas provenientes do QF: (A) evidências dos processos de substituição completa de grãos mas mantendo a forma do mineral; (B) substituição parcial de um mineral; (C) fragmentação e início do processo de substituição, (D) sobrecrecimento de goethita em cristal de hematita e (E)(F) substituição quase completa de um mineral.

O cimento das amostras do QF é composto por um material vermelho-amarelado, goethítico, com diferentes organizações, compondo uma espécie de zonamento. Nas porções intermediárias das lâminas, ocorrem as zonas com poros alveolares (Figuras 16C e 16D), semelhante a uma colmeia, como descrito para as

amostras do ESP. Nessas zonas, os cristais de hidróxidos de ferro encontram-se arranjados em distintas direções, que parecem marcar sutilmente alguma estrutura orgânica prévia. Nas porções centrais e borda das lâminas, predomina uma estrutura mais coesa, em que o cimento ocorre na forma de uma fábrica típica, com poucos poros internamente e envolvendo o arcaçouço. Essa fábrica, entretanto, é aquela descrita para o interior de um conjunto de fragmentos arredondados a subarredondados, separados entre si por poros planares curvos (Figuras 16A e 16B). Esses agregados mostram que o cimento passou por processos de fragmentação posterior a sua precipitação. As paredes dos poros apresentam alto grau de acomodação.

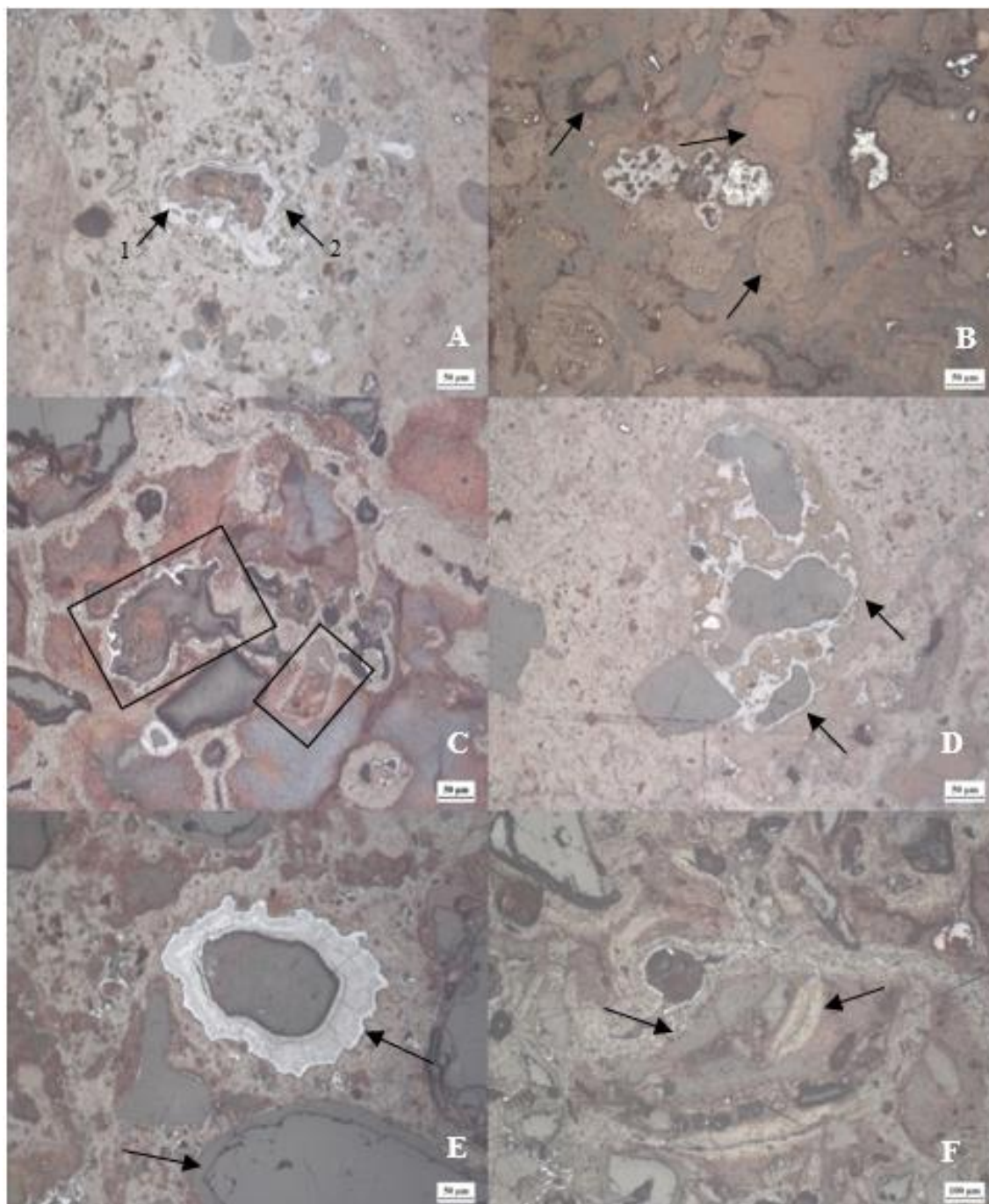


**Figura 16:** Evidências de formação de agregados e cimentação por goethita em lâminas do QF: (A) formação incipiente de agregados por coalescência do cimento formando porosidade entre eles; (B) evolução desses agregados com porosidade já preenchida; (C) diferentes estágios de agregação e composição do cimento evidenciada pela diferente coloração.

Sobre as feições de revestimento e preenchimento, destacam-se os preenchimentos cristalíticos entre os fragmentos do cimento. Trata-se de preenchimentos de composição gibsítica, que formam cristalárias com direção de

crescimento dos cristais da superfície dos fragmentos em direção ao centro dos poros. Essas feições ocorrem principalmente nas zonas de bordas das feições tubulares, indicando origem externa das soluções enriquecidas em alumínio e posterior precipitação da gibbsita nos poros.

Outra feição de destaque, são os revestimentos na forma de sobrecrescimentos em grãos de hematita por hematita ou goethita (Figuras 17 C e 17 E), e de magnetita por hematita ou goethita (Figuras 17A, 17C, 17D e 17E). Diferentes fases de evolução dessas estruturas podem ser percebidas em lâminas pertencentes ao grupo de amostras do QF. Fica evidenciada uma sucessão de eventos percebidos por grãos minerais alterados a novos minerais (Figura 17A), bordas irregulares resultantes de corrosão (Figuras 17B, 17C, 17D), diversas fases de sobrecrescimento de mesma composição (Figuras 17C e 17E) ou composições diferentes, tudo isso complementado por um processo de cimentação ferruginoso e preenchimento de poros por cimentos goethiíticos (Figura 17B).



**Figura 17:** Feições de sobrecrecimento observadas em lâminas do Quadrilátero Ferrífero: (A) Processos subsequentes de dissolução mineral(1) e cimentação de diferentes composições(2); (B) processos de completa substituição; (C) Formato de um cristal preservado mas seu interior tomado por diferentes fases de dissolução e sobrecrecimento; (D) sobrecrecimento de hematita por goethita; (E) diferentes fases de crescimento de uma mesma composição (F) diferentes tipos de preenchimento e revestimento em porosidades oriundas de atividade animal.

### 5.3 Composições química e mineralógica

O método utilizado para a definição da composição química foi a Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX). Para tal processo foram

selecionadas quatro amostras representativas, duas do grupo ESP e duas do grupo QF. Os resultados são apresentados na tabela 1.

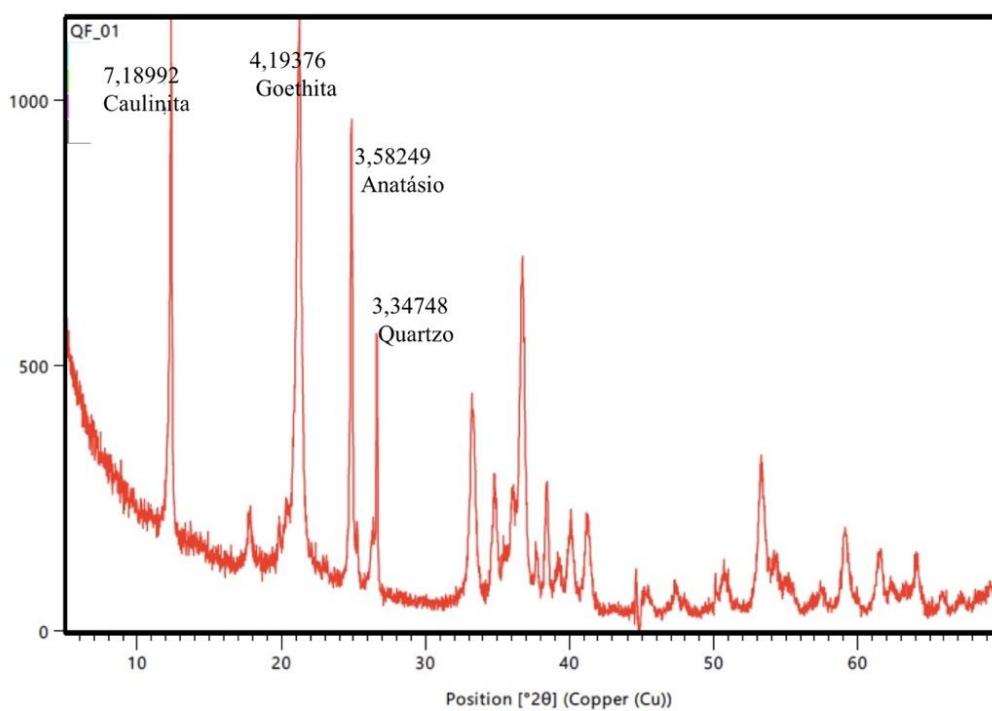
**Tabela 1:** Composição química das amostras do ESP e QF obtida por FRX.

| Amostra | Elementos Químicos |                                |                                |       |      |                  |                               |                   |                  |      |       | Total |
|---------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|------|-------|-------|
|         | SiO <sub>2</sub>   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MnO  | LOI   |       |
| QF01    | 18,1               | 14,7                           | 54,2                           | <0,01 | <0,1 | 1,34             | 0,74                          | <0,1              | <0,01            | 0,02 | 12,74 | 101,8 |
| QF02    | 13,1               | 12,6                           | 59,8                           | 0,02  | <0,1 | 1,2              | 1,04                          | <0,1              | <0,01            | 0,04 | 12,94 | 100,7 |
| ESP 01  | 13,2               | 13,2                           | 56,9                           | <0,01 | <0,1 | 1,29             | 0,86                          | <0,1              | <0,01            | 0,06 | 12,51 | 98,02 |
| ESP 02  | 13,5               | 11,3                           | 67,6                           | 0,02  | <0,1 | 1,08             | 0,4                           | <0,1              | <0,01            | 0,02 | 7,84  | 101,8 |

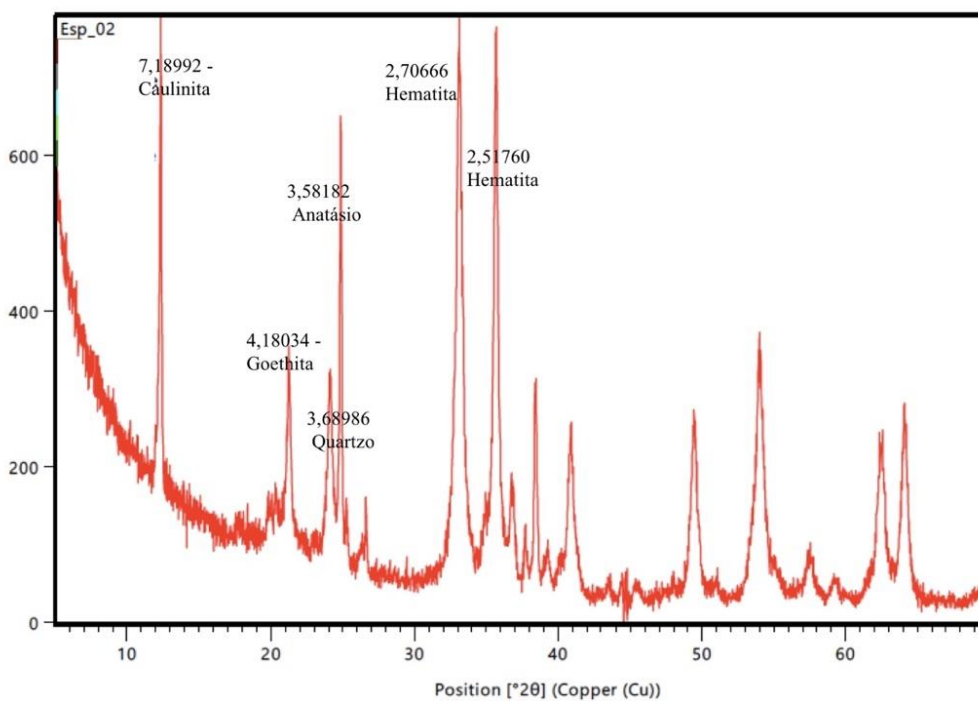
Todas as amostras apresentam teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como elemento predominante, confirmando a natureza ferruginosa dessas feições. Observa-se também que os teores de ferro são inversamente proporcionais aos de sílica e de alumínio, o que também é condizente com o comportamento geoquímico desses elementos. Para as amostras provenientes do QF, o conteúdo médio de ferro é 57,0%, enquanto o de silício é de 15,6% e o de alumínio é 13,6%. Já para as amostras do ESP, o conteúdo médio de ferro é ainda maior, apresentando 62,2% da composição, e menores valores de sílica e de alumínio, 13,4% e 12,2%, respectivamente. Em ambas as amostras, o teor de titânio é alto, sendo em média igual a 1,3% em amostras do QF e 1,2% no ESP. As bases, Na, Ca, K e Mg aparecem em valores inferiores ao limite de detecção, enquanto o P tende a se acumular junto com o ferro. Os altos valores de LOI mostram a presença da hidroxila nos minerais que contêm ferro, que, como se verá adiante, marcam a presença da goethita.

A mineralogia foi obtida por Difractometria de Raios – X. Uma amostra representativa de cada grupo foi submetida ao método (QF 01 e ESP 01). A amostra pertencente ao QF é composta predominantemente por goethita e caulinita, com traços de hematita, quartzo e anatásio, conforme o difratograma apresentado na Figura 17. A amostra pertencente ao ESP também possui goethita e caulinita como minerais predominantes, e da mesma maneira hematita, quartzo e anatásio como acessórios (Figura 18). Assim, ambas possuem qualitativamente a mesma composição, apenas com o destaque da melhor identificação da hematita nas amostras do ESP, onde os picos mostram-se com maior intensidade e mais bem definidos.





**Figura 18:** Difratoograma de amostra proveniente do QF evidenciando a presença de caulinita, goethita e hematita.

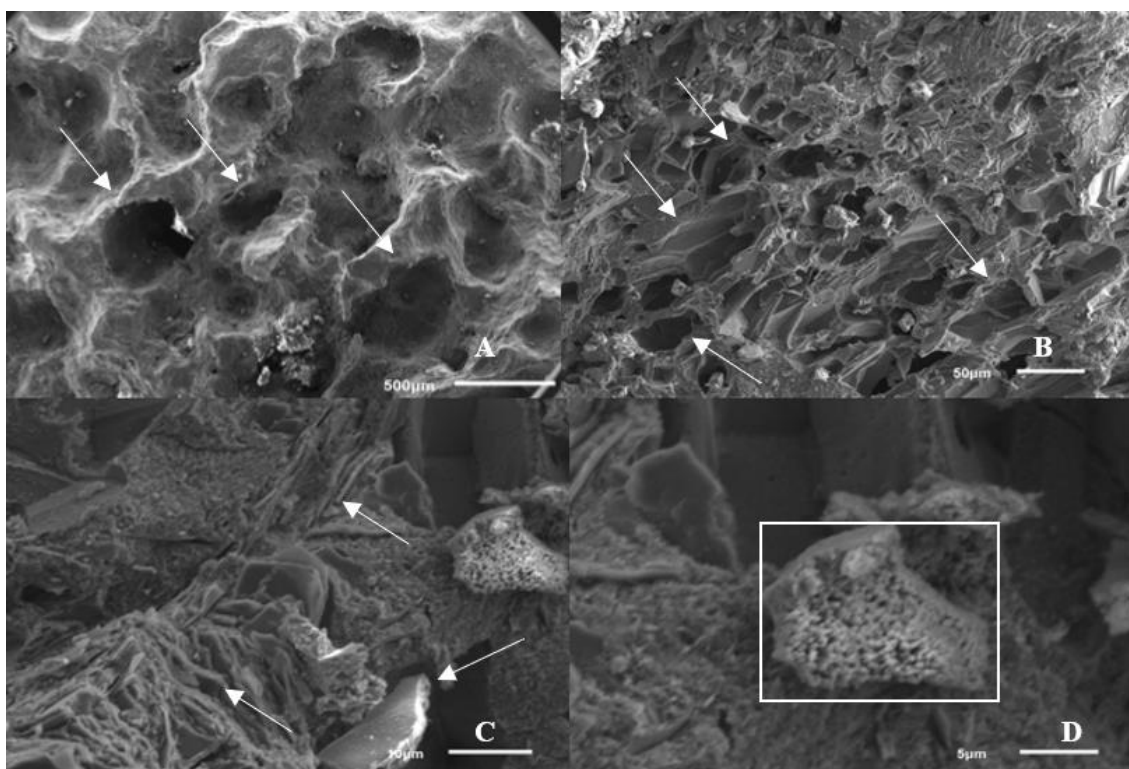


**Figura 19:** Difratoograma de amostra proveniente do ESP evidenciando a presença de caulinita, goethita e hematita.

#### 5.4 MEV e análises microquímicas

O imageamento por Microscopia Eletrônica de Varredura evidencia a presença de algumas estruturas já identificáveis por microscopia óptica. Esse imageamento é apresentado para amostra *in natura* (Figura 19 e 20), e para seções delgadas (Figura 21), ou seja, foram utilizados tanto fragmentos de feições tubulares do ESP e QF, quanto seções finais dispostas em lâminas de vidro polidas.

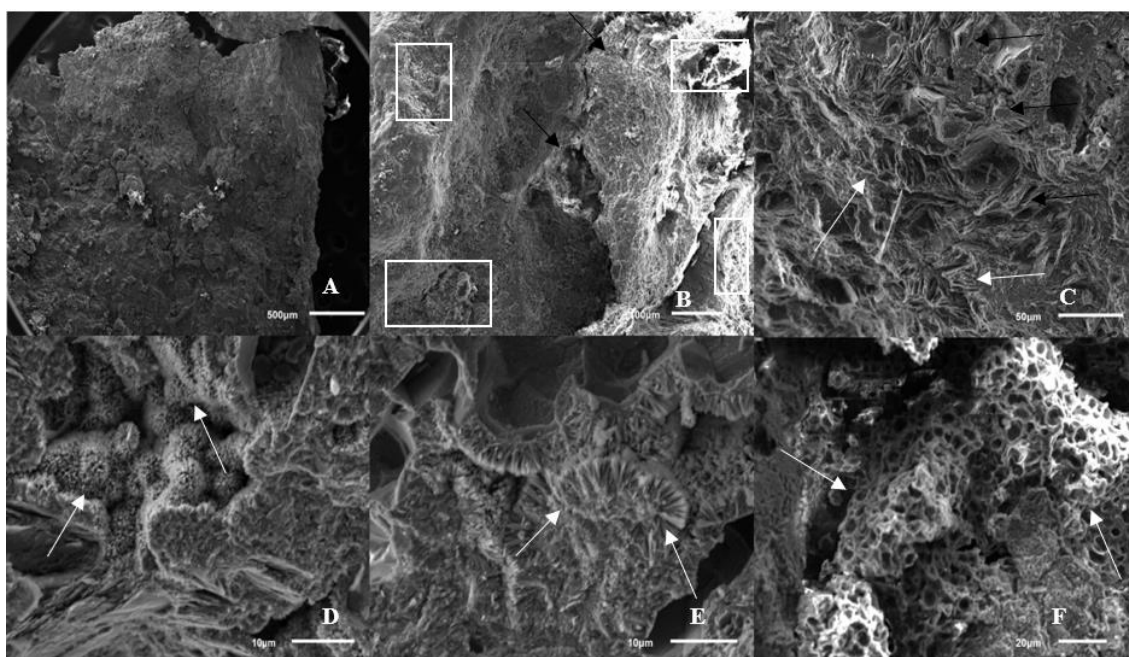
Sob Microscopia Eletrônica de Varredura dos fragmentos *in natura*, as amostras do ESP apresentam inúmeras cavidades e microporosidades (Figura 19), algumas em formatos hexagonais, outras anédricas. Fica evidente a presença de cristais de hematita em hábito lamelar nos pequenos fragmentos de couraça placoidal. A goethita aparece em hábito lamelar e botroidal, principalmente no cimento que envolve grãos minerais e fragmentos de couraça. As amostras representativas do ESP são mais homogêneas.



**Figura 20:** Fragmentos de amostras pertencentes ao Supergrupo Espinhaço submetidas ao MEV evidenciando as (A) porosidades presentes na amostra, (B) algumas em formato hexagonal. Evidencia também a presença de hematita (C) lamelar e (D) botroidal.

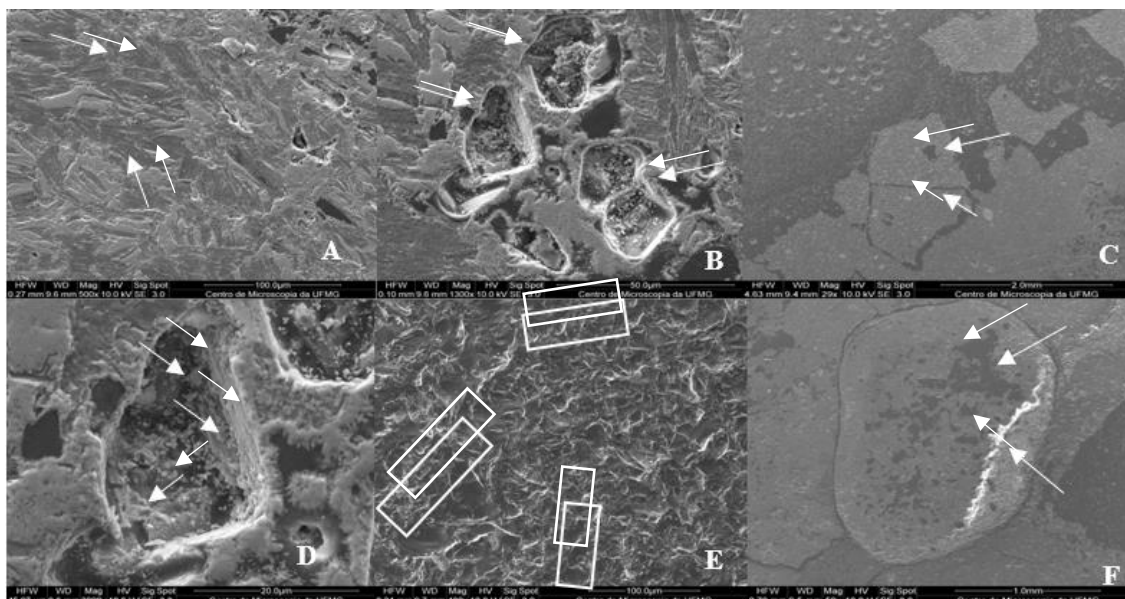
As imagens de elétrons retroespalhados das amostras do QF mostram que os fragmentos apresentam porosidade mais pronunciada (Figura 20). As mesmas

hematitas de hábito lamelar e goethitas botroidais estão presentes. Observa-se também a presença de gibbsita acicular (Figura 20E). Uma estrutura também observada no ESP, porém melhor visualizada e fotografada no QF foram os alvéolos, com goethita precipitada na forma de uma colmeia, sugerindo algo parecido a rede de células que caracterizam tecidos vegetais (Figura 20F).



**Figura 21:** (A) Fragmento de amostra característica do Quadrilátero Ferrífero em menor aumento submetida a imageamento por MEV revelando uma (B) porosidade mais frequente (C) hematitas em hábito lamelar e (D) botroidal, gibbsita em (E) hábito acicular e (F) estrutura anômala que remete a um tecido orgânico(F).

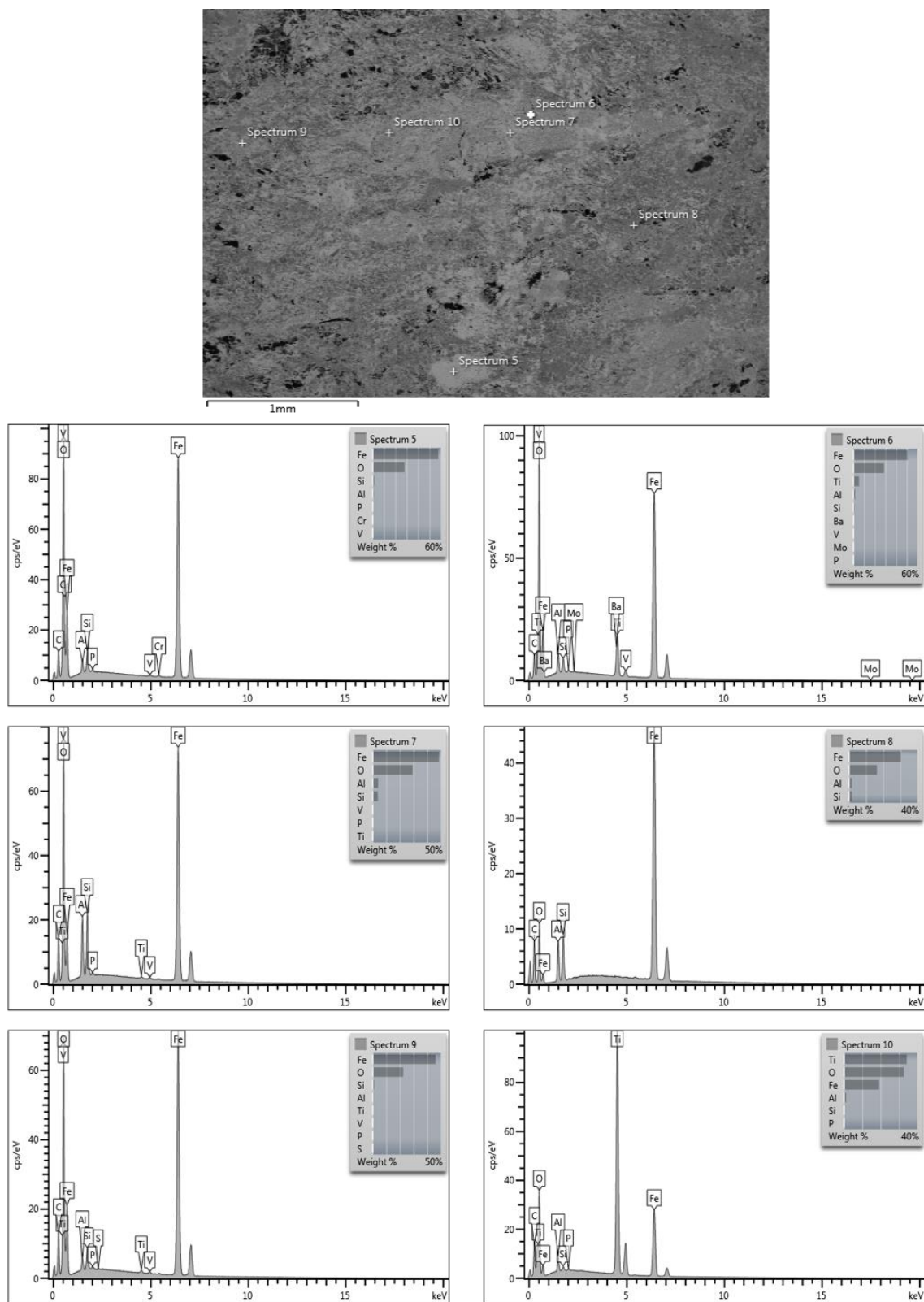
Nas imagens de elétrons retroespalhados produzidas nas seções delgadas, os mesmos minerais e estruturas foram visualizados. Destacam-se as estruturas hexagonais assim como os contatos entre diferentes fases minerais (Figura 21), com processos de alteração e sobrecrescimentos entre as fases minerais.



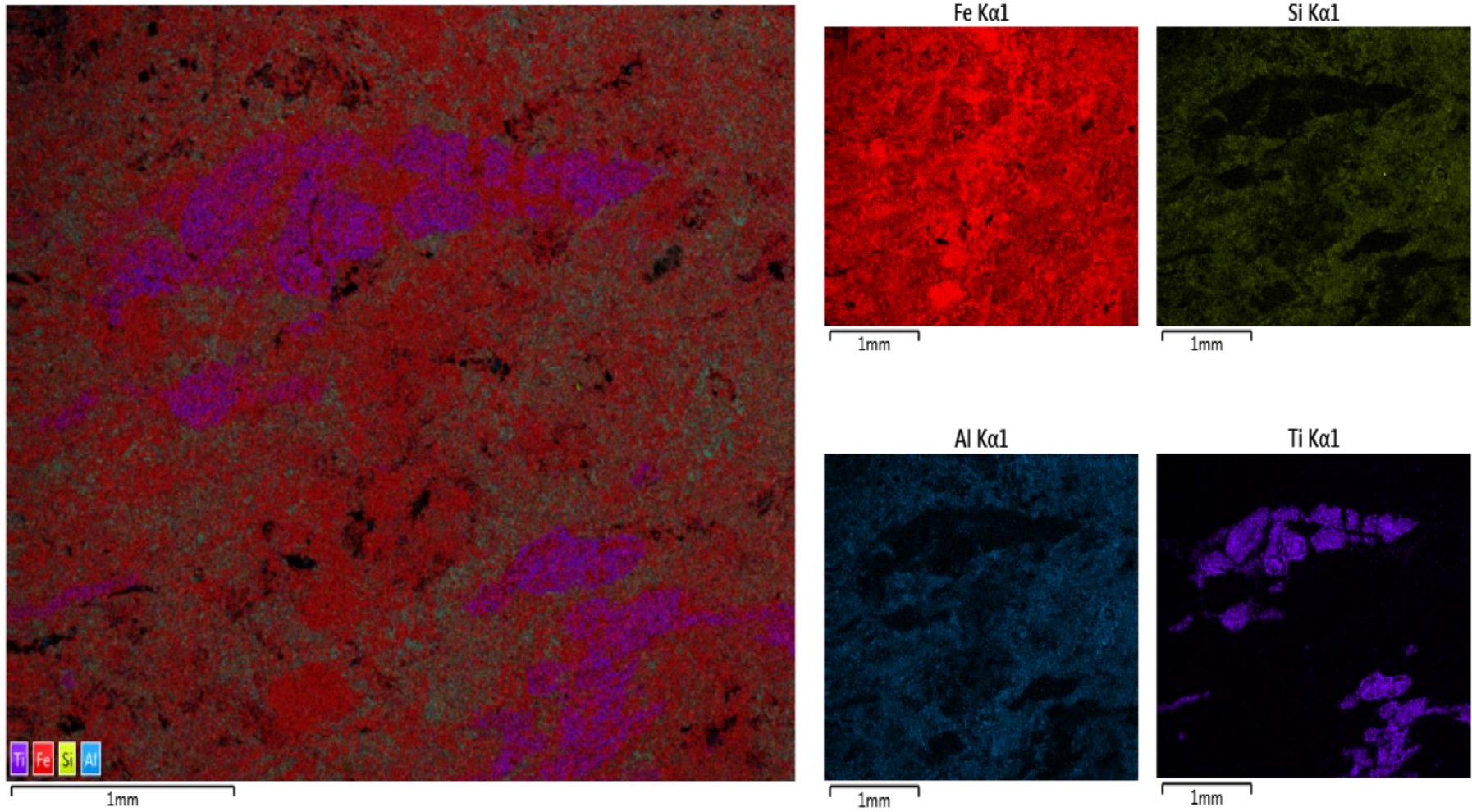
**Figura 22:** Lâminas de couraça sob MEV evidenciando (A) as paletas de hematita orientadas, (B) as porosidades poligonais, (C) o processo de cimentação intragrão, (D) o preenchimento incipiente das porosidades, (E) as estruturas hexagonais orientadas e (F) processos de substituição e cimentação.

Quanto a análise microquímica por EDS, foram produzidos mapas microquímicos das amostras ESP 02, ESP 07, QF03 e QF04. Todas foram analisadas em dois campos distintos.

A ESP 02 foi analisada por 2 campos, com 10 pontos. O primeiro campo, com regiões numeradas de 5 a 10, apresenta em 4 deles presença predominante de óxido de ferro e, em apenas um, a predominância de titânio. Ocorrem traços de Alumínio e Sílica também, como apresentado na figura 22. As informações evidenciadas pelas análises microquímicas são refletidas nos mapas microquímicos (Figura 23), que reiteram a presença majoritária de ferro, com concentrações pontuais de titânio e alumínio e sílica pulverizados. A microquímica identificada pela análise de MEV associada a EDS reitera as análises anteriormente apresentadas, DRX e FRX, além do observado por microscopia óptica, ou seja, uma predominância de minerais ferruginosos. No entanto, é importante salientar a presença de minerais de alumínio, principalmente em bordas de grãos, evidenciando processos de alteração sobre eles, como por exemplo, no campo 7 (Figura 22), e em concentrações pontuais no cimento, como mostram os mapas microquímicos (Figura 23).

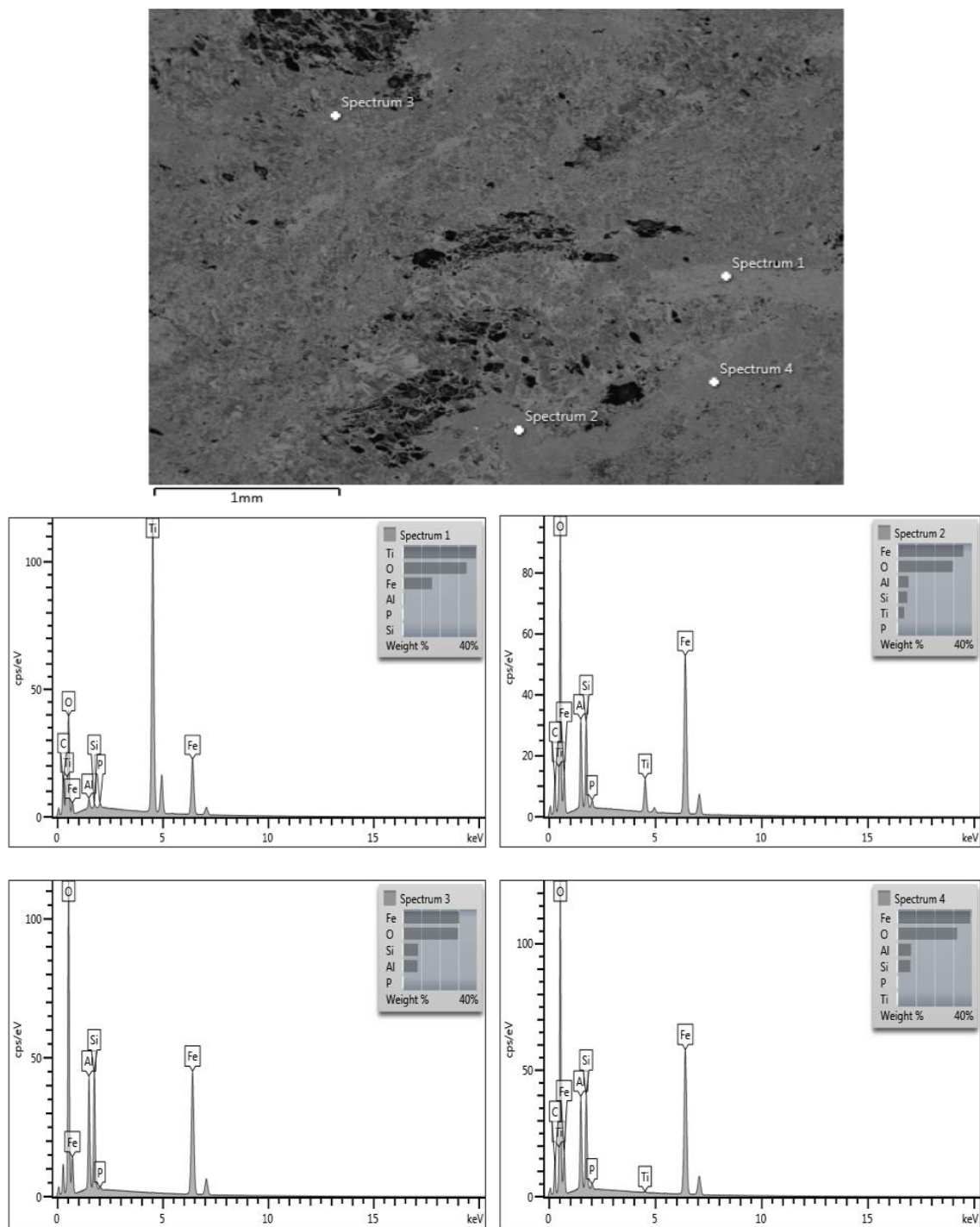


**Figura 23:** Análise microquímica da ESP 02, campo 01, em que ocorre a predominância de ferro em 5 dos 6 campos analisados.



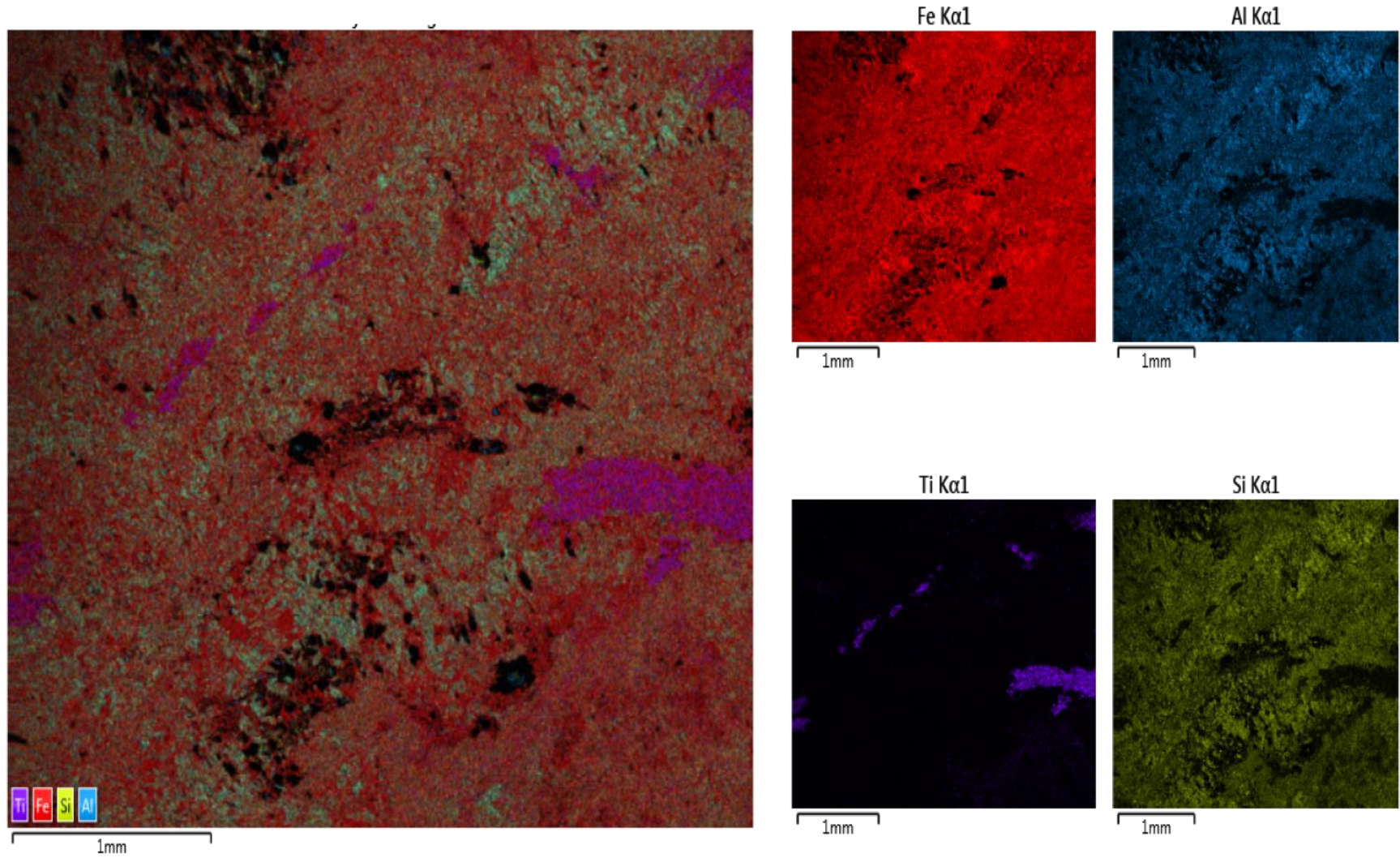
**Figura 24:** Mapa Microquímico ESP 01, campo 1, evidenciando a presença massiva de ferro, mas também o titânio em grãos minerais e o silício associado ao alumínio, dispersos por todo o campo.

No segundo campo, com regiões numeradas de 1 a 4, situação é semelhante ao primeiro descrito, já que em 3 dos campos ocorre o predomínio de ferro e em um deles, de titânio (Figura 24). No entanto, a concentração Al e Si se apresenta um pouco mais alta e, ao contrário do primeiro campo analisado, não somente nas bordas de grãos. Seguindo a tendência de todas as análises, os mapas refletem o que os gráficos evidenciaram, uma predominância de ferro, com concentrações pontuais de titânio e sílica e alumínio dispersos pela lâmina (Figura 25). A análise reitera novamente o que foi apresentado pelas análises descritas anteriormente, já que o titânio aparece, mesmo em pequenas concentrações, na análise de espectrometria de fluorescência de raio-x.



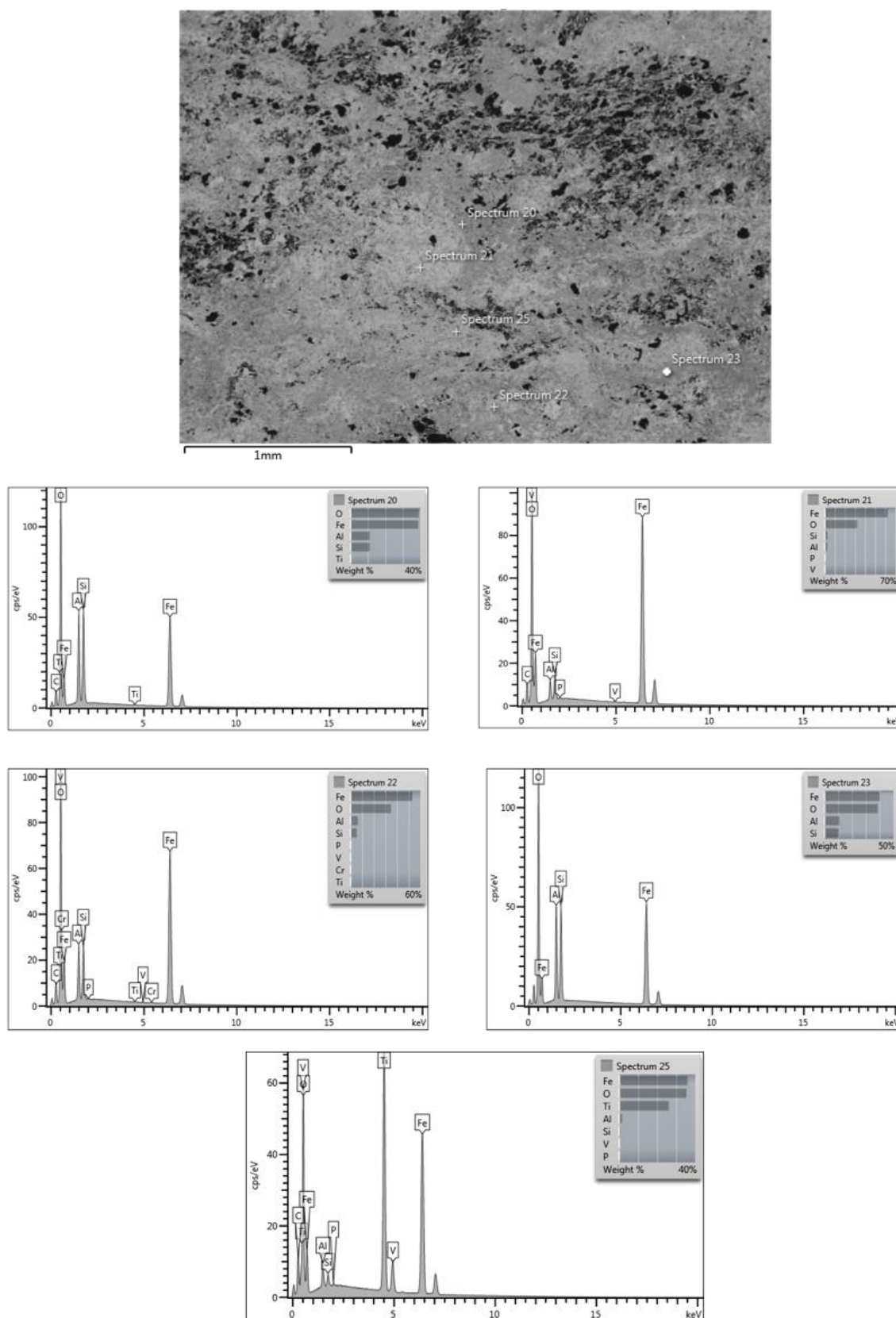
**Figura 25:** Análise microquímica ESP 02, campo 02, em que ocorre a predominância de ferro em 75% dos campos analisados, sendo que o Titânio aparece como predominante no restante.



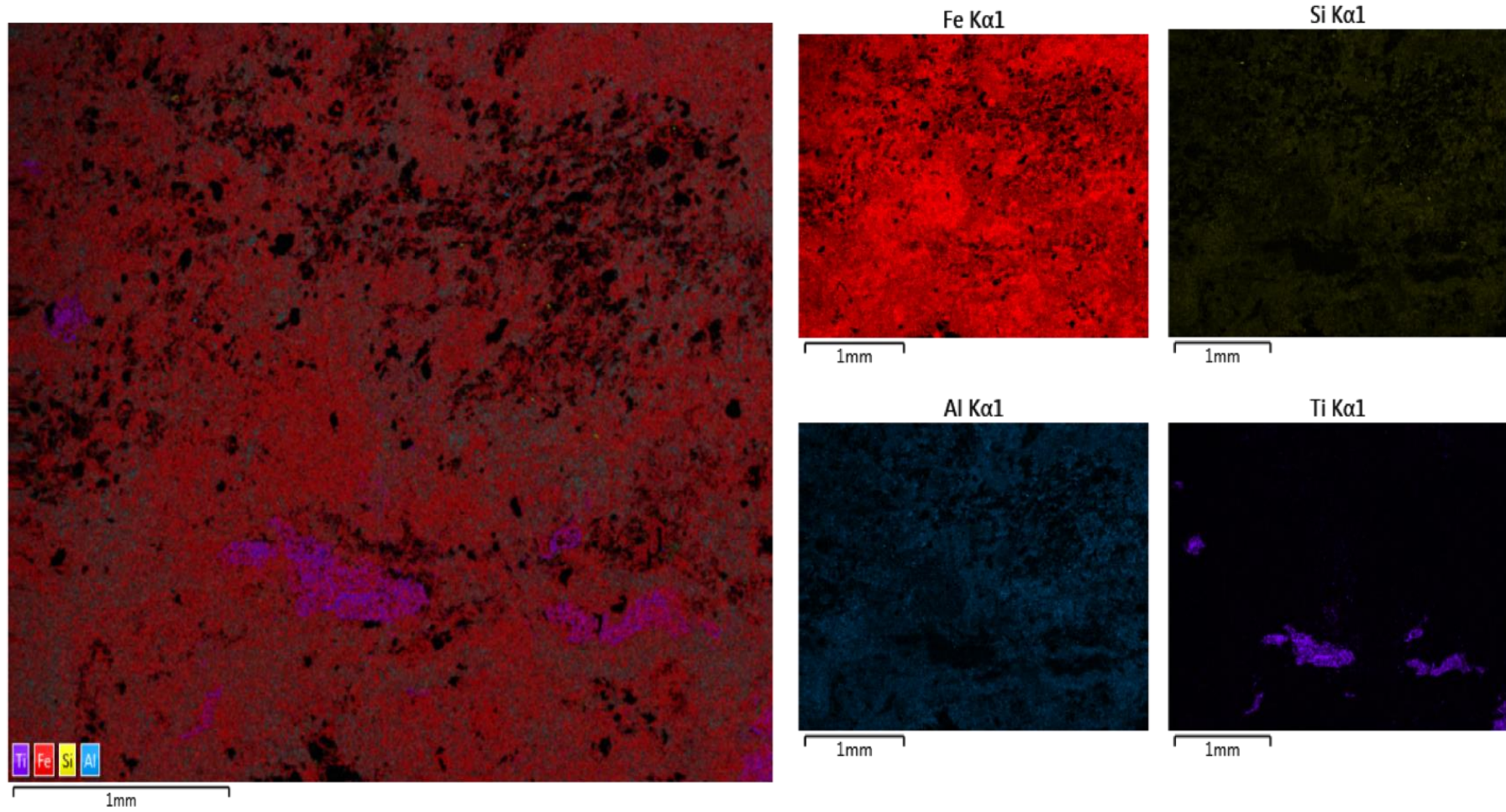


**Figura 26:** Mapa microquímico ESP 02, campo 02, apresentando a grande predominância de ferro, o titânio concentrado em grãos, o silício novamente associado ao alumínio, ainda evidente no cimento.

A ESP 07 foi analisada por 10 pontos, divididas em 2 campos. O primeiro conta com 5 pontos, com predominância de ferro em todos eles. Em um desses pontos, a concentração de titânio se aproxima da concentração de ferro, que são exatamente nos fragmentos de couraça placoidal. Em todos eles a quantidade de alumínio é subordinada ou apenas traço (Figura 26). No entanto, em campos em que a concentração de alumínio aparece um pouco mais elevada, não ocorre em bordas de grãos, mas na cimentação presente na amostra. Tudo isso é confirmado pelo mapa microquímico que evidencia a concentração massiva de ferro com concentrações pontuais de titânio (Figura 27), além de ocorrências apenas incipientes de sílica, diferente da ESP02, em que tal substância aparecia dispersa por todo o campo.

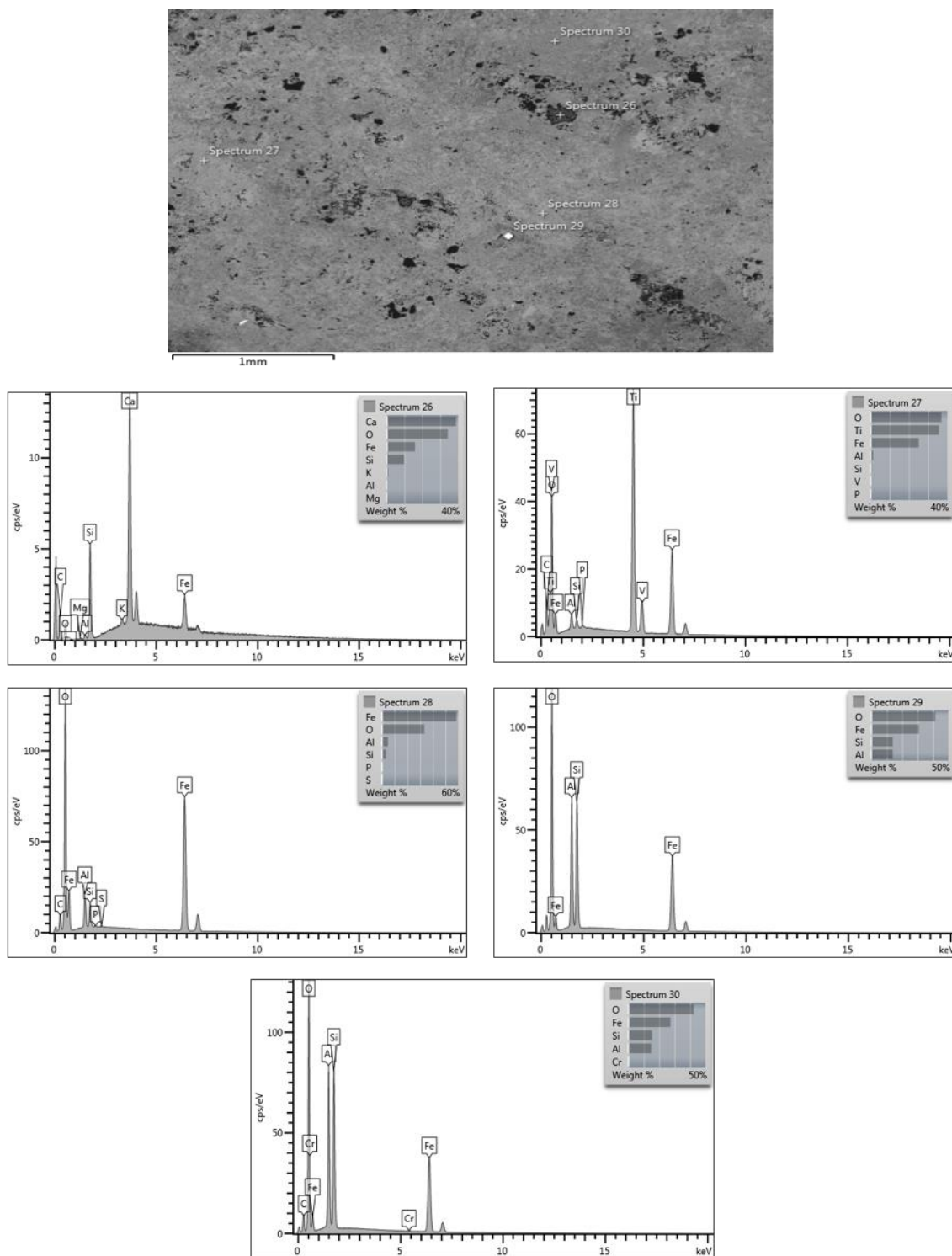


**Figura 27:** Análise microquímica ESP 07, campo 01, evidenciando concentrações de alumínio consideráveis em 40% dos campos analisados, mesmo o ferro sendo o principal elemento.

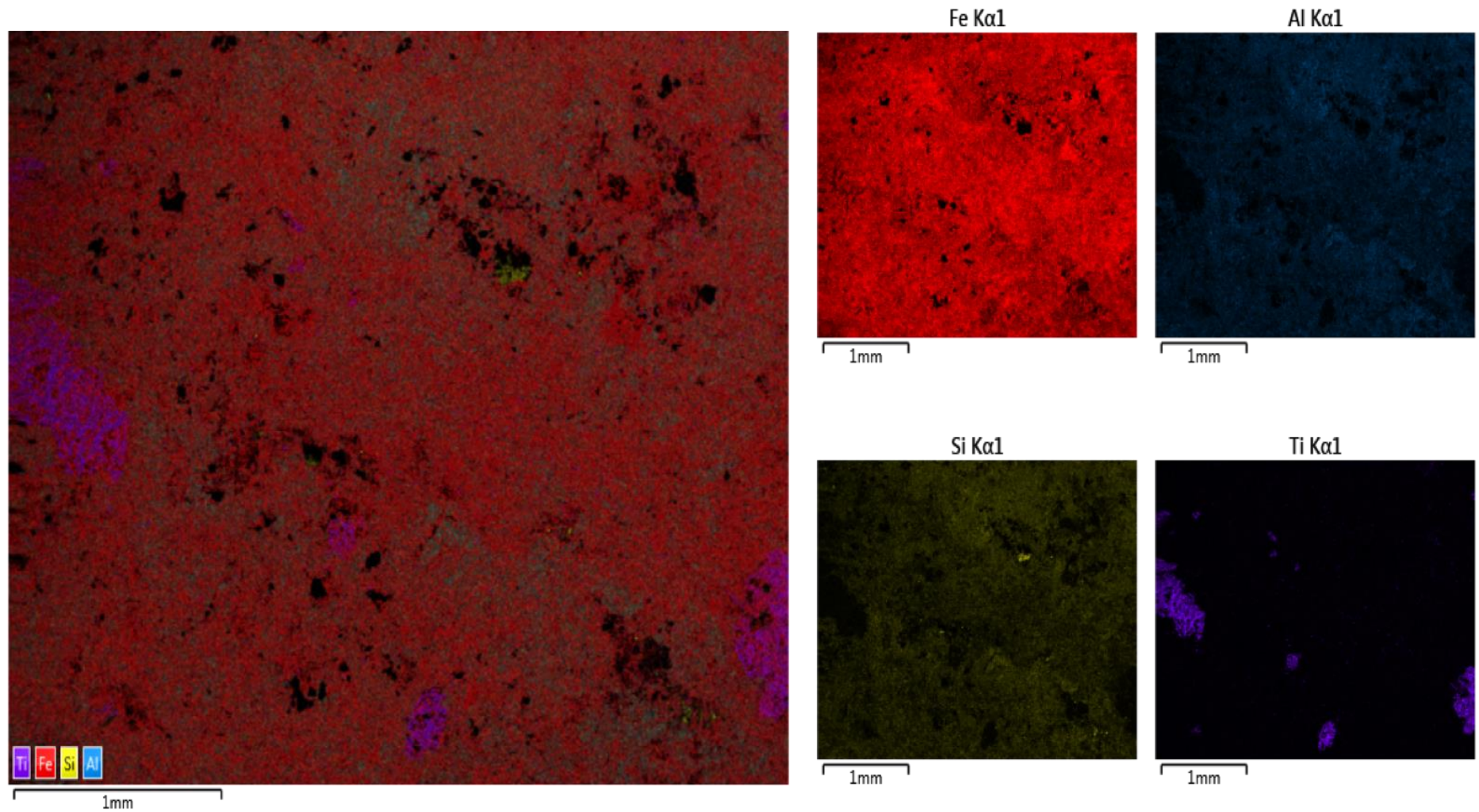


**Figura 28:** Mapa microquímico ESP 07, campo 01, com o titânio concentrado em grãos e o alumínio e a sílica menos proeminentes.

O segundo campo analisado na ESP 07 apresenta uma ocorrência anômala, um dos pontos, apresenta uma alta concentração de cálcio, o que não havia sido observado anteriormente, em nenhum dos mapas. Observa-se que há outra feição semelhante no mesmo campo, indicando a presença de outro mineral com cálcio na composição. Outro campo analisado indica se tratar de um mineral de titânio devido a alta concentração de tal elemento, mesmo que sua concentração seja apenas um pouco superior a de ferro. O alumínio apresenta concentrações consideráveis em dois pontos distintos. Nos demais pontos, há a predominância de ferro já esperada (Figura 28). Tais situações são evidenciadas pelo mapa microquímico da Figura 29, onde observa-se a predominância de ferro, regiões pontuais de alta concentração de titânio marcando os fragmentos de couraça sendo que o alumínio se apresenta menos disperso.



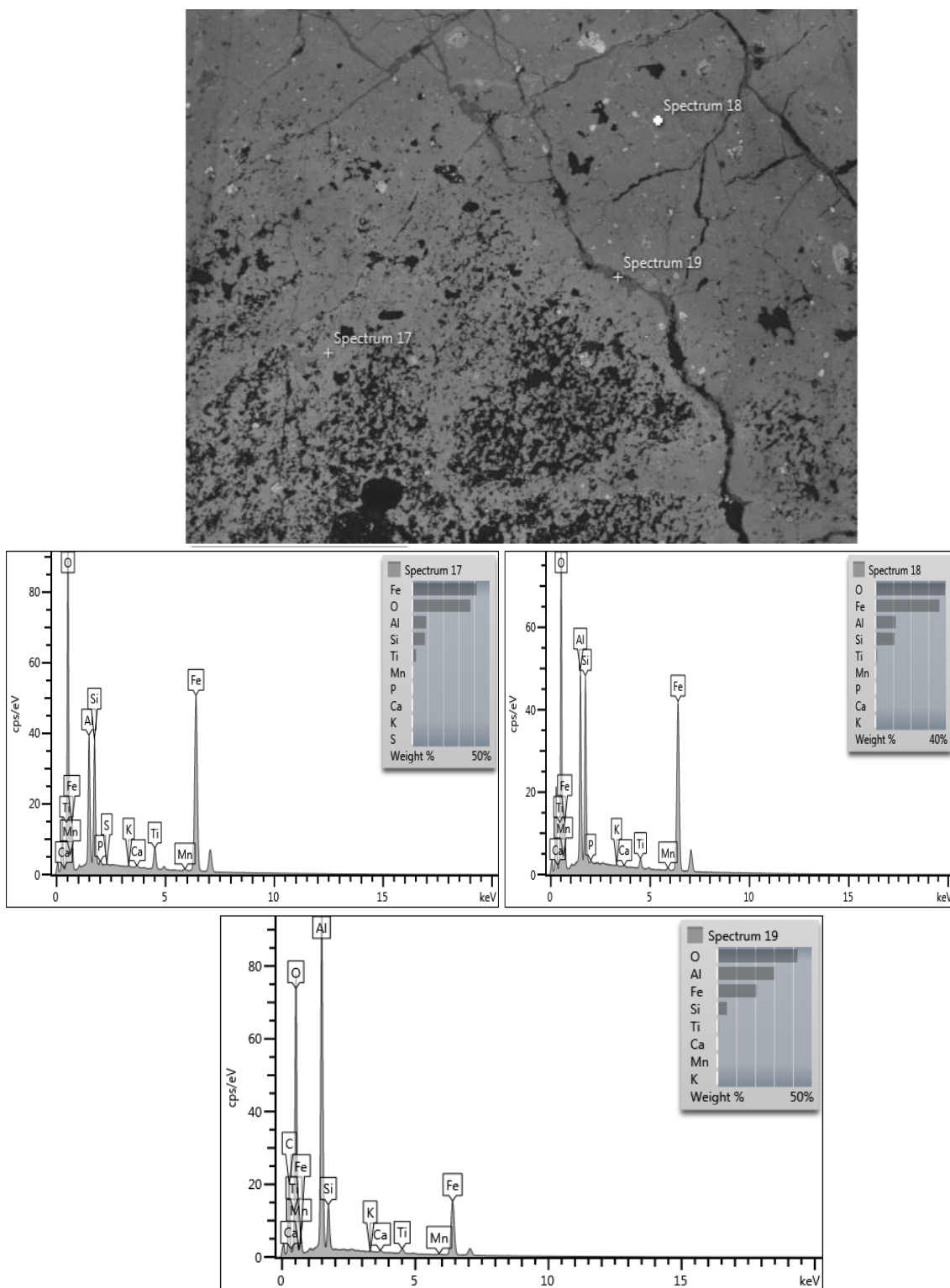
**Figura 29:** Análise microquímica ESP 07, campo 02, com registros inéditos de cálcio na lâmina, além, do titânio ser o elemento principal em um dos campos analisados.



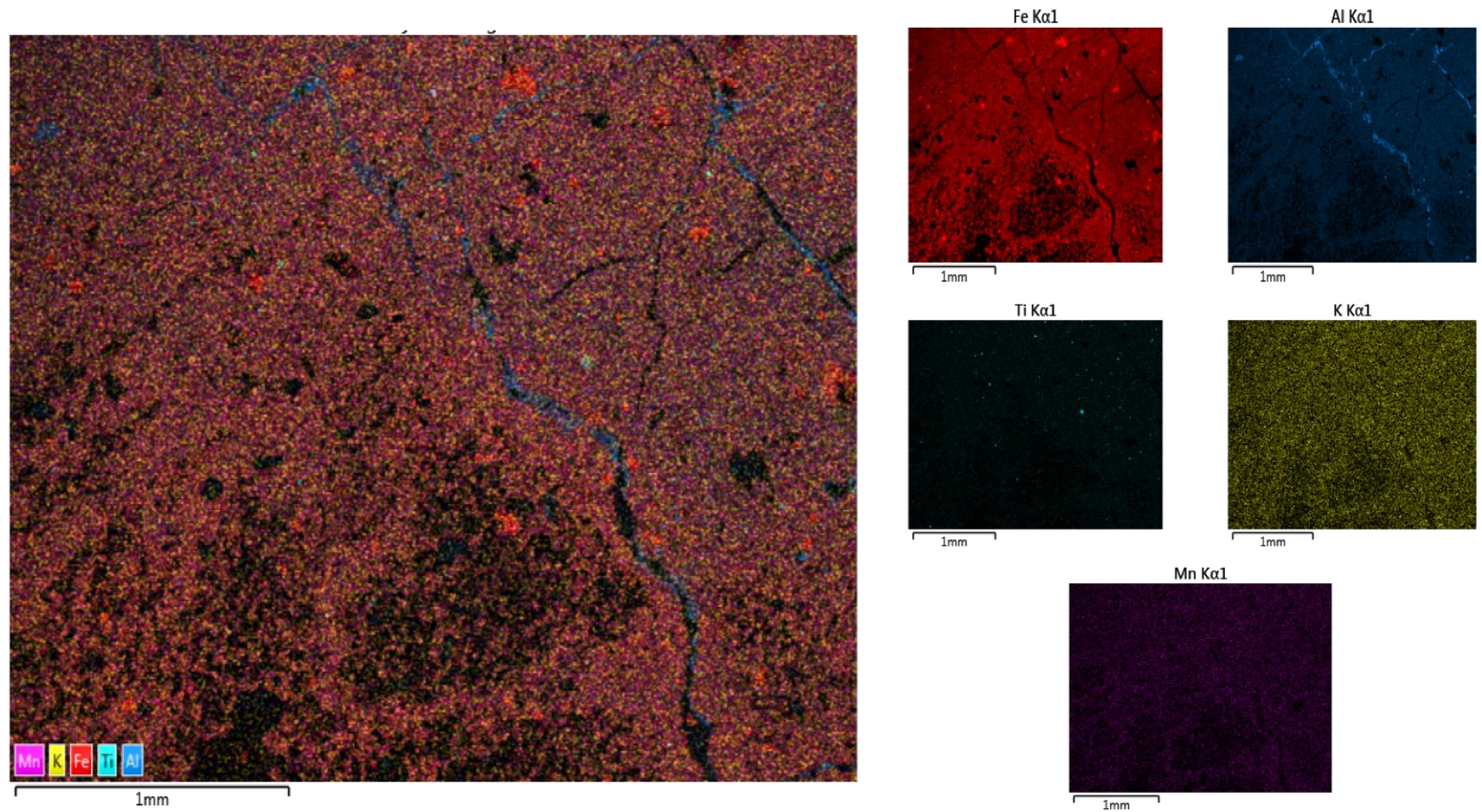
**Figura 30:** Mapa microquímico ESP 07, campo 02 mostrando uma sílica com um destaque um pouco maior do que o alumínio e preenchendo algumas cavidades, além do titânio bem pontual em grãos específicos.

Já as lâminas representativas do QF, a QF03 e a QF04, ao contrário do grupo Espinhaço, não indica titânio predominante em nenhuma das análises. A microquímica pontual obtida da lâmina QF03 é apresentada na figura 30, em que ocorre a predominância de ferro em dois dos campos analisados e de alumínio, em um. Novamente, o alumínio predomina em uma feição de cimentação ou sobrecrescimento. Uma particularidade observada em QF03 é que a concentração de alumínio é considerável em todas os campos, não sendo apenas traços. Além disso, detecta-se a presença de potássio e manganês, mesmo que em baixas concentrações, dispersos por toda a lâmina, o que é evidenciado pelos mapas microquímicos (Figura 31). Ainda segundo o mapa microquímico, o alumínio é encontrado preenchendo cavidades, enquanto o manganês e o potássio encontram-se dispersos por todo o cimento.



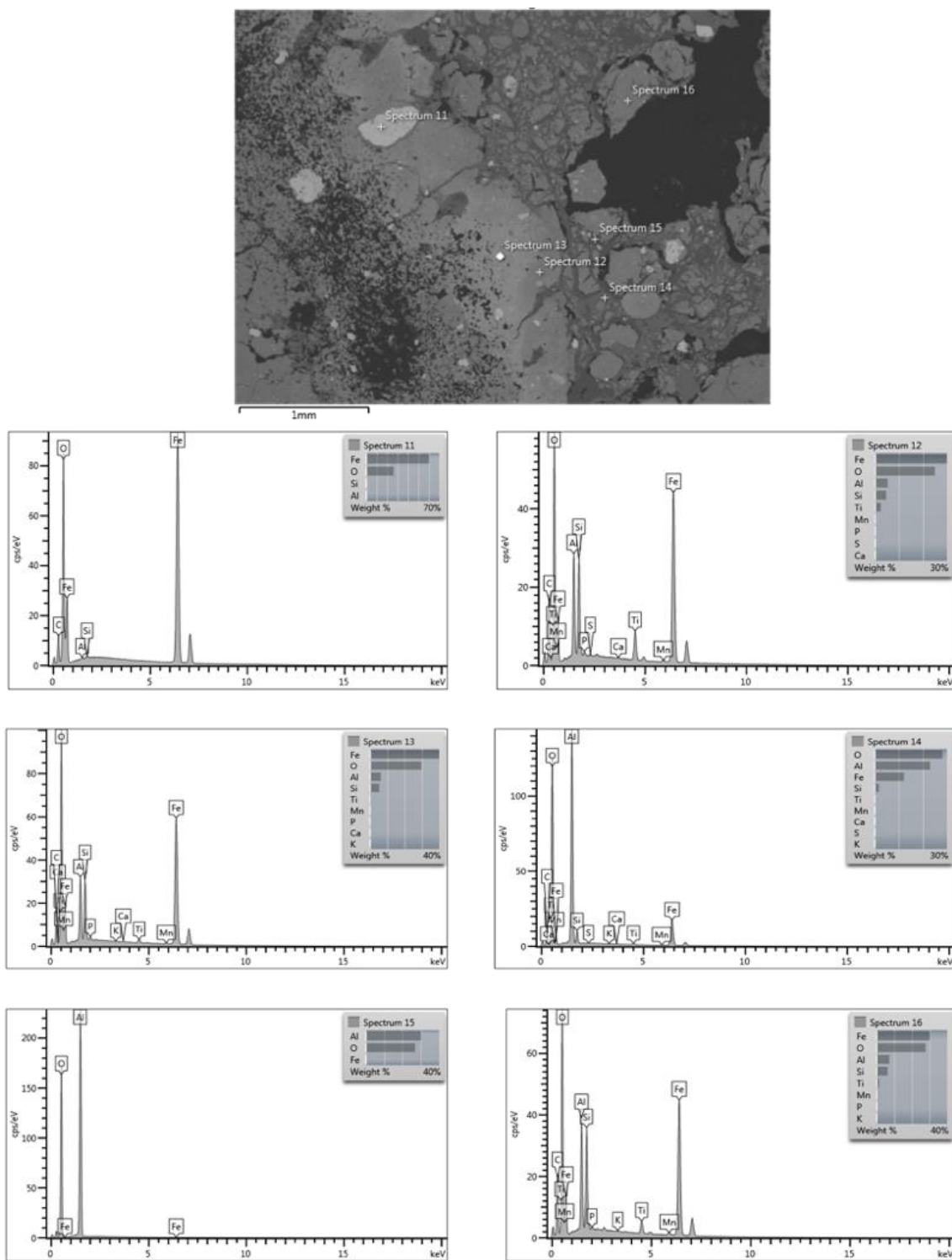


**Figura 31:** Análise microquímica QF03. Apresentando ferro predominante em dois dos três campos, mas com quantidades consideráveis de alumínio.

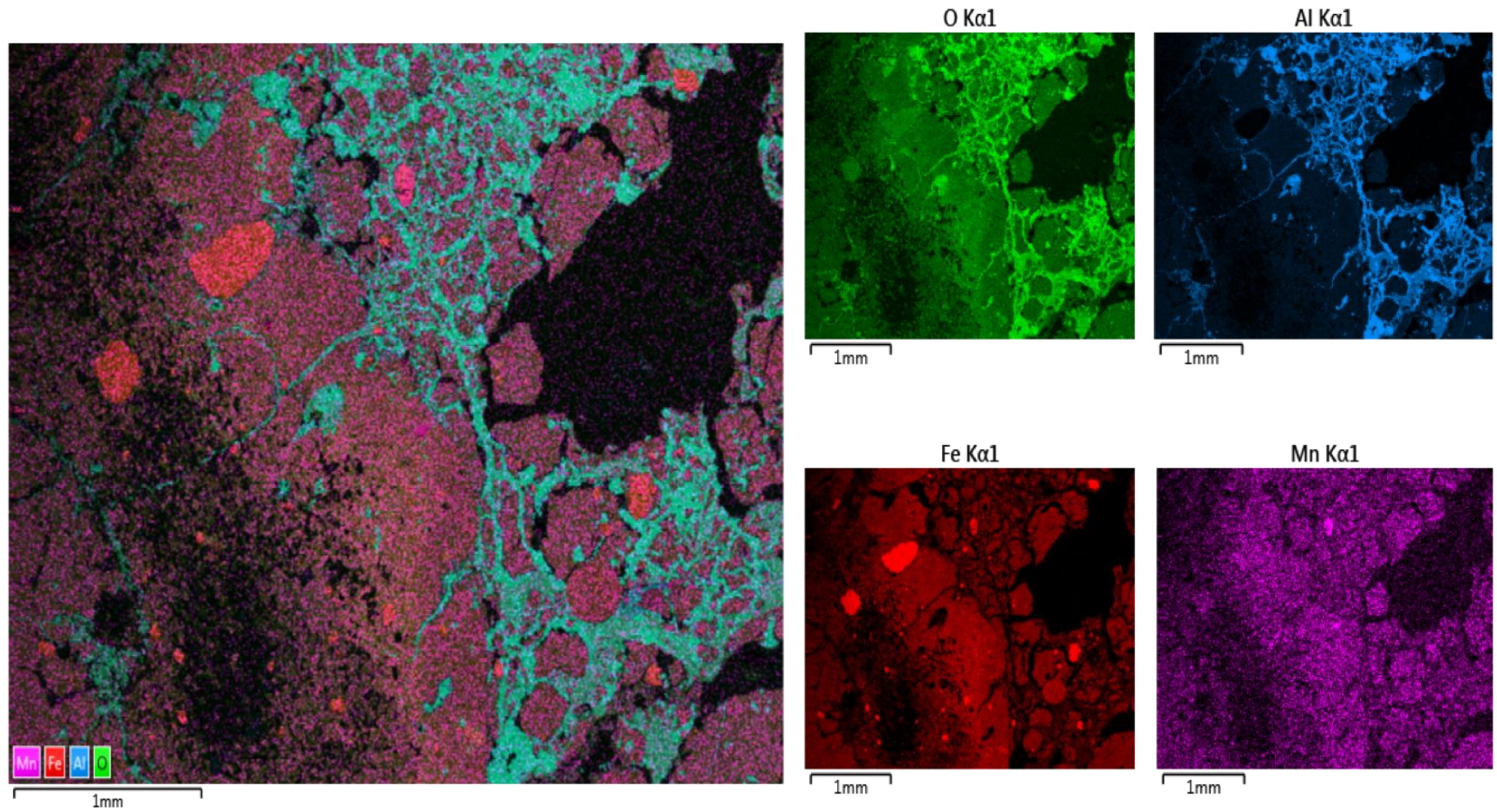


**Figura 32:** Mapa microquímico QF03 apresentando manganês associado ao potássio e dispersos pelo cimento. O titânio aparece em menor quantidade em regiões pontuais. Já o alumínio aparece preenchendo cavidades. Nota-se a ausência de sílica.

Já a microquímica da lâmina QF04 mostra que quatro, dos seis campos analisados, apresentam o ferro como elemento de maior concentração, enquanto dois são dominados por alumínio (Figura 32). O alumínio volta a aparecer em maiores concentrações em feições de preenchimento. O contraste entre ferro e alumínio é evidenciado pelos mapas microquímicos (Figura 33). Segundo os mapas, o alumínio predomina na poção da lâmina mais fragmentada, preenchendo os espaços entre os fragmentos, enquanto o ferro é predominante no arcabouço. Mesmo em ocasiões em que aparece como elemento subordinado, o alumínio apresenta valores relevantes. São detectados ainda traços de fósforo, cálcio e manganês. Apesar de não ter sido detectado em algumas das análises microquímicas, o manganês é observado disperso por toda a lâmina, o que fica evidente na figura 33. Uma síntese das concentrações das análises microquímicas das lâminas é apresentada na Tabela 2.



**Figura 33:** Análise microquímica QF04 com o alumínio predominante em dois dos campos, com ausência quase total de ferro.



**Figura 34:** Mapa microquímico QF04 evidenciando a presença de alumínio como feição de cimentação e preenchimento, associado ao oxigênio, enquanto o ferro encontra-se concentrado nos grãos e agregados. Já o manganês se encontra disperso pela lâmina.

**Tabela 2:** Análise microquímica ESP02, ESP07, QF03 e QF04 resultante de MEV associado ao EDS (%).

|       | ESP 02 |       |       |       |       |       |       |       |       |       | ESP 07 |       |       |       |       |       |       |       |       |       | QF 03 |       |       | QF04  |       |       |       |       |       |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 20     | 21    | 22    | 23    | 25    | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    | 17    | 18    | 19    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| O     |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Mg    |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 0,22  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Al    | 1,58   | 14,07 | 19,58 | 16,23 | 2,33  | 3,88  | 8,89  | 6,37  | 1,99  | 2,53  | 20,82  | 4,38  | 11,76 | 20,5  | 3,05  | 0,89  | 2,5   | 9,1   | 26,17 | 28,06 | 17,12 | 21,83 | 57,08 | 0,24  | 14,7  | 14,14 | 65,97 | 99,51 | 18,58 |
| Si    | 0,53   | 14,2  | 22,81 | 17,52 | 3,8   | 2,67  | 9,57  | 6,82  | 3,62  | 0,64  | 23,51  | 5,64  | 11,42 | 21,93 | 1,42  | 20,83 | 1,2   | 6,74  | 29,71 | 32,71 | 17,63 | 23,35 | 10,99 | 0,36  | 14,77 | 13,75 | 6,05  |       | 18,12 |
| P     | 0,72   | 1,47  | 0,63  | 1,17  | 0,68  | 0,36  | 0,39  |       | 0,49  | 0,31  |        | 0,3   | 0,33  |       | 0,31  |       | 0,5   | 0,29  |       |       | 0,65  | 0,39  |       |       | 0,66  | 0,87  |       |       | 0,47  |
| S     |        |       |       |       |       |       |       |       |       | 0,16  |        |       |       |       |       |       |       | 0,21  |       |       | 0,16  |       |       |       | 0,23  |       | 0,25  |       |       |
| K     |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 1,13  |       |       |       |       | 0,09  | 0,08  | 0,14  |       |       |       | 0,09  | 0,1   | 0,1   |
| Ca    |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |       |       |       | 54,18 |       |       |       |       | 0,2   | 0,15  | 0,34  |       | 0,13  | 0,17  | 0,16  |       |       |
| Ti    | 72,46  | 7,56  |       | 0,23  |       | 10,06 | 0,28  |       | 0,52  | 65,18 | 0,22   |       | 0,17  |       | 43,45 |       | 59,28 |       |       | 4,21  | 1,72  | 1,52  |       | 6,1   | 1,21  | 0,79  |       | 3,15  |       |
| V     |        |       |       |       | 0,24  | 0,39  | 0,32  |       | 0,4   |       |        | 0,21  | 0,23  |       | 0,45  |       | 0,64  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Cr    |        |       |       |       | 0,3   |       |       |       |       |       |        |       | 0,16  |       |       |       |       |       |       | 0,2   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Fe    | 24,71  | 62,7  | 56,98 | 64,85 | 92,65 | 81,78 | 80,54 | 86,82 | 92,82 | 31,35 | 55,44  | 89,47 | 75,93 | 57,57 | 51,32 | 22,75 | 35,89 | 83,66 | 44,12 | 39,03 | 59,48 | 51,96 | 29,64 | 99,41 | 62,85 | 69,27 | 26,41 | 0,49  | 58,79 |
| Mo    |        |       |       |       |       | 0,31  |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Ba    |        |       |       |       |       | 0,54  |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Mn    |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0,47  | 0,52  | 0,29  |       | 0,56  | 0,5   | 0,27  |       | 0,78  |
| Total | 100    | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100    | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   |

## 6 DISCUSSÃO

A partir da análise de resultados apresentados anteriormente, propõe-se então um modelo para a gênese das feições tubulares descritas.

A descrição das amostras macroscopicamente e em microscópio óptico, as imagens de elétrons retroespalhados obtidas no MEV, assim como os resultados das análises química e mineralógica, respectivamente por FRX e DRX, apontam alguns aspectos importantes dessas feições tubulares, assim como de seu papel como indicadoras dos processos de degradação das couraças ferruginosas.

As feições tubulares do ESP e do QF são constituídas por um arcabouço e cimento de composição semelhante. A dinâmica imposta a essas feições é muitas vezes evidenciada pelo comportamento desses dois constituintes, que são em verdade os materiais grossos e finos presentes, e pela maneira como eles respondem a contínuos processos de dissolução, reprecipitação, sobrecrecimentos e fragmentações. Com base em quem são esses constituintes e como estão organizados é que se apresenta um modelo de gênese para essas feições, organizado, para efeitos didáticos, em diferentes etapas.

Etapa 1 - Fragmentação de níveis de couraça preexistentes e a formação dos fragmentos observados no arcabouço.

Alguns diminutos fragmentos de couraça encontram-se preservados no interior de feições tubulares provenientes de raízes. No caso do ESP, esses fragmentos foram de couraça placoidal, e no QF de couraça maciça, ou seja, das couraças que caracterizam os ambientes de ocorrência das feições tubulares. Entende-se que a origem desses fragmentos deve envolver a compartimentação de uma couraça pré-existente, e isso pode ter se dado exatamente pelo crescimento de raízes. O crescimento radicular de espécies vegetais é responsável por fragmentar mecanicamente as couraças, e como demonstraram Beauvais e Colin (1993), trata-se do principal mecanismo de intemperismo físico de couraças ferruginosas e aluminosas na superfície, em regiões tropicais. Assim, a primeira etapa seria a degradação mecânica de couraças em níveis maciços pelo crescimento da vegetação, o que foi associado por muitos autores como sinais de mudanças das condições

climáticas, de climas mais secos para climas mais úmidos ( Beauvais & Tardy, 1991; Tardy, 1997).

Etapa 2 – Dissolução de fragmentos, remobilização e reprecipitação de ferro e alumínio com moldes vegetais

A partir da fragmentação da couraça, uma nova porosidade no sistema de alteração é formada. Essa porosidade ocorre tanto pelo espaço inter-fragmentos quando ao longo dos canais de raízes escavados. Como a vegetação tem um comportamento dinâmico, algumas árvores e arbustos vão sendo substituídos por outros no processo de recomposição natural da vegetação. Isso faz com que canais escavados por determinadas raízes possam ser, paulatinamente, liberados com o processo de morte dessa raiz, que muitas vezes significa a morte de toda a árvore. Como esse processo é lento, a decomposição da matéria orgânica muda consideravelmente as condições físico-químicas da zona de rizosfera. Além do aumento da acidez, a atividade microbiológica se intensifica, com diversas bactérias, fungos e vírus participando dessa decomposição. É neste contexto que se criam as condições necessárias para o processo de degradação geoquímica de couraças na superfície. Com o aumento da acidez, a estabilidade dos óxidos de ferro é reduzida, o que pode levar a sua dissolução. Caso o processo envolva a entrada de água nos canais de raízes e o estabelecimento de condições redutoras, essa dissolução pode ser ainda mais intensa. Fato é que com ela geram-se soluções ricas em ferro e alumínio, que passam a migrar no sistema a partir dos canais de raízes escavados. Tais soluções, ao migrar, vão incorporando oxigênio dissolvido, que junto com a atividade de bactérias, podem novamente criar condições de oxidação do ferro reduzido em solução. Nesse caso, o cimento precipitado vai envolver os constituintes grossos e finos que passaram a ocupar aquela cavidade. Esse cimento pode ter sua precipitação influenciada pelas raízes, uma vez que possuem como molde estruturas alveolares, que preservam parcialmente a estrutura celular desses vegetais. Processos semelhantes foram observados por Mustoe (2008, 2017, 2018, 2019) nos Estados Unidos e no Canadá, em que raízes sofreram um processo de mineralização semelhante, porém em condições que permitem que sejam consideradas fósseis. Nesses relatos, assim como estruturas percebidas nas amostras objetos de estudo deste trabalho, observa-se a estrutura do tecido celular preservado. Em outras partes,



podem se formar compondo uma fábrica continua, maciça, associada a coalescência de nódulos típicos (Stoops, 2021). De toda maneira, macroscopicamente, essa cimentação ocorre em toda ou em grande parte da cavidade escavada pela raiz, o que atribui o formato tubular da feição. Assim colocado, tais feições podem ser consideradas como rizólitos.

### Etapa 3 – Dissoluções, reprecipitações, fragmentações e as transformações pós-deposicionais das feições tubulares

O ambiente de formação das feições tubulares, inserido na zona de influência da vegetação, é dinâmico e sofre as influências de outros fatores, como mudanças da sazonalidade climática, bioturbação, saída e deposição de novos materiais, processos pedogenéticos, entre outros. Assim, pode ocorrer de processos pós-deposicionais, ou seja, posteriores a formação do cimento e arcabouço, contribuir para a transformação das feições tubulares. Uma delas é a entrada de água pela variação dos níveis de umidade do solo e o estabelecimento de condições oxi-redutoras, que podem criar ciclos de dissolução e reprecipitação dos minerais de ferro. Na medida que isso acontece, os minerais podem ser dissolvidos e reprecipitados, o que levará a circulação de soluções ricas em ferro e alumínio e a formação de preenchimentos e revestimentos, ou ao sobrecrescimento de minerais a partir de outros. Outra transformação observada é a fragmentação do cimento da própria feição tubular, que parece estar associada ao deslocamento dessas feições nos perfis, seja por bioturbação de animais escavadores de médio porte, ou pela própria remobilização da massa do solo em processos de erosão. Tais processos podem ocorrer consorciados, ou seja, a fragmentação pode levar ao aumento da entrada de água no sistema, que muda as condições oxi-redutoras e formam os revestimentos e preenchimentos. Esse é o caso, por exemplo, dos preenchimentos cristalíticos de gibbsita observados nas amostras do QF, que marcadamente representam a entrada de soluções ricas em alumínio e a reprecipitação de gibbsita nas fraturas previamente formadas. Esse processo pode ser considerado como um mecanismo de manutenção das feições tubulares no sistema, pois se a fragmentação não fosse seguida do preenchimento dos poros por novas fases minerais, o destino dessas feições poderia ser sua destruição.

As etapas de formação e transformação das feições tubulares parecem ser marcadas por uma assinatura mineralógica. Enquanto os materiais de origem delas, ou seja, a fonte de ferro, são couraças em que predomina a hematita, o cimento formado no interior das cavidades de raízes é principalmente goethítico. Isso indica um ambiente de reprecipitação do ferro com menor valor de pH, e maior conteúdo de matéria orgânica e umidade (Cornell e Schwertmann, 2003). De outra maneira, a transformação desse cimento ou ainda novas fases de reprecipitação de hidróxidos parecem marcar a passagem para uma goethita cada vez mais aluminosa. A quantidade de alumínio substituindo o ferro na estrutura da goethita já foi apontada por diversos autores como sinal do processo de dissolução e reprecipitação desse mineral no ambiente pedogênico, pois esse processo sempre levará a perda de parte do ferro e a concentração de alumínio, que é, entre ambos, o menos móvel (Schwertmann et al., 1979; Kämpf & Schwertmann, 1983). Isso pode levar a uma deferruginização completa, fazendo com que as reprecipitações sejam de hidróxidos de alumínio, ou seja, os preenchimentos gibbsíticos observados. Por esse motivo, a evolução das feições tubulares associadas a raízes parece seguir uma trajetória de transformação dos óxi-hidróxidos que envolve a seguinte sequência: hematita – goethita – goethita aluminosa – gibbsita. A presença da caulinita também é um marcador importante, contudo não foram realizados nesse estudo análises específicas para compreender se essa caulinita é herdada da couraça ferruginosa preexistente (Nahon, 1991), ou se pode ter sido neoformada pela ressilificação do sistema no ambiente da raiz (Mateus *et al.*, 2017).

## 7 CONCLUSÕES

Todas as análises realizadas e apresentadas tiveram o intuito de entender a formação de feições tubulares associadas a ambientes de couraça ferruginosa e, a partir disso, sua associação com o processo de degradação dessas couraças. A descrição macroscópica evidencia a dificuldade de se identificar a mineralogia presente, o que é característico dessas feições, mas a coloração vermelha e amarronzada das amostras evidencia a composição majoritariamente ferruginosa. A alta concentração de ferro também se torna perceptível por finas camadas escuras, quase pretas, recobrando ou acompanhando as formas cilíndricas resultantes da forma das raízes. Essa predominância de ferro nas amostras é comprovada pela FRX, que mostrou que os valores de ferro são superiores a 50% da composição e que, de acordo com o DRX, está presente tanto como hematita como goethita. Tal análise aponta ainda a existência de quartzo, anatásio e caulinita. As análises químicas e microquímicas reiteram tal assembleia mineral ao apresentar concentrações majoritárias de ferro, além de alumínio subordinado, e concentrações menores de titânio, potássio e manganês. O imageamento por MEV permitiu observar como essa assembleia se encontra disposta.

A análise por microscópio óptico das lâminas, tanto do Grupo Espinhaço quanto do Grupo Quadrilátero Ferrífero, permite observar alguns processos impostos sobre tais amostras. É notável a ação de diferentes e sucessivos processos de dissolução, em que diversos fluidos percolaram o ambiente e foram responsáveis por dissolver tanto os grãos quanto o cimento do material. A percolação de fluidos responsáveis por viabilizar processos de sobrecrescimento nos grãos e nas paredes de poros, além do preenchimento de cavidades, também se encontra bem marcada. A atividade de seres vivos fica evidenciada principalmente pelo marcado processo de fragmentação mecânica, por crescimento de raízes e a preservação da estrutura vegetal da célula pela precipitação do cimento presente nas amostras.

Ao fim de todas essas análises, é possível se delinear mais detalhadamente o papel das raízes no processo de transformação das couraças ferruginosas, assim como as etapas envolvidas. Seu desenvolvimento acaba por fragmentar, mecanicamente, as cangas, rompendo uma barreira física e infiltrando nesse sistema. Essa fragmentação torna possível a entrada de matéria orgânica, e altera a

porosidade da couraça. Esse novo sistema de poros cria microssítios de dissolução e uma nova frente de alteração da couraça.

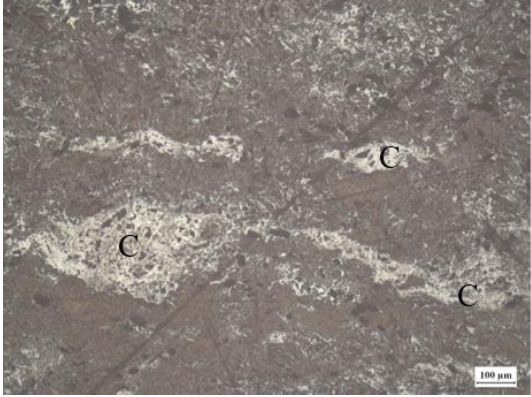
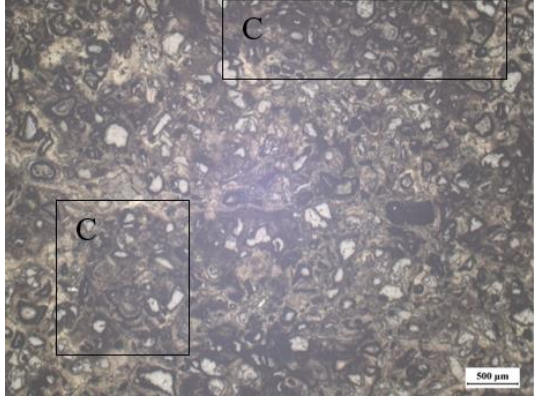
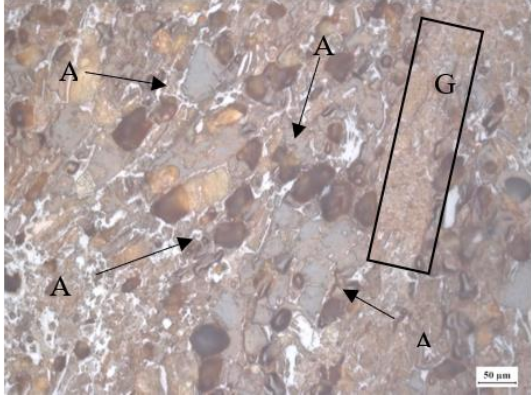
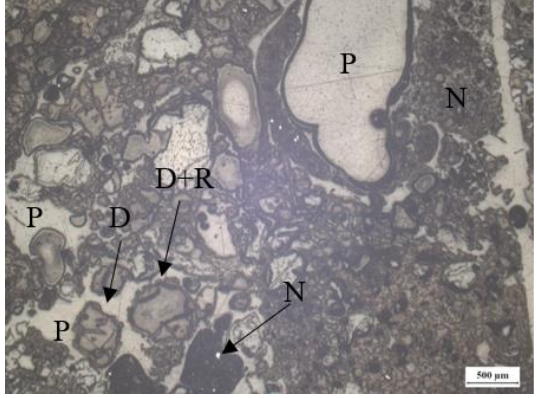
Com essa frente já estabelecida, os processos de migração de ferro se intensificam e tal elemento passa a se reprecipitar em cavidades produzidas pela infiltração de raízes e atividade de outros seres vivos. Esse frequente processo de dissolução e reprecipitação nas cavidades ao redor dessas raízes, juntamente a toda uma microbiota presente nesse sistema, é fundamental para o processo de transformação, manutenção da couraça. Tais estruturas ainda influenciam o modo como esse cimento ferruginoso se precipita, já que estruturas alveolares identificadas através do imageamento por MEV, tanto em fragmentos de amostras quanto nas lâminas, são resultado de uma precipitação guiada pela organização celular do tecido vegetal presente.

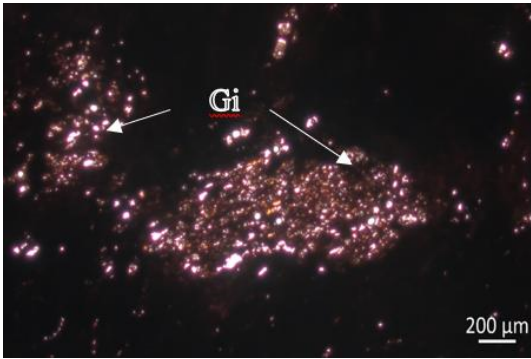
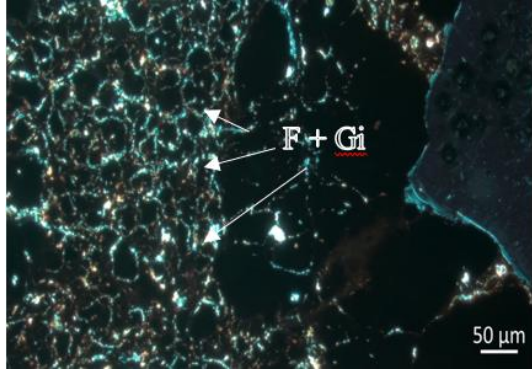
Os canais abertos pelo crescimento de raízes e outras atividades biológicas, permite o constante aporte de massa e fluidos, cada vez mais aluminosos. Além disso, tornam tais sistemas ainda mais susceptíveis a fatores externos, como mudanças climáticas sazonais, que tem o poder de alterar as condições físico químicas presentes. Isso faz com que, sob determinadas condições, comece a ocorrer processos de dissolução de estruturas ferruginosas e a precipitação de substâncias cada vez mais aluminosas, dando continuidade ao processo de alteração de couraças e estruturas riziformes associadas.

Sendo assim, pode-se dizer que as feições tubulares provenientes de raízes são evidências dos processos de transformação de couraças. São estruturas responsáveis por iniciar e viabilizar os processos de degradação e reprecipitação desse sistema, já que permitem a percolação de fluidos, o aporte de fragmentos de couraças mais preservadas, mantendo em seu interior registros de diferentes processos de transformação desse sistema. Tais evidências revelam então um papel biológico importante, principalmente das raízes, no processo de degradação, preservação e transformação das couraças, e suas estruturas tubulares derivadas como marcadores desse processo.

O modelo proposto durante este trabalho pode ser resumido abaixo:

Quadro 3: Resumo do Modelo de Gênese

| Etapa   | ESP   | QF   | Descrição   |
|---|---|--|---|
| <p>1 - Fragmentação de níveis de couraça preexistentes e a formação de fragmentos observados no arcabouço</p> |   |   | <p>Marcada por diminutos fragmentos de couraça (C) preservados no interior das feições tubulares, fragmentação mecânica e associada a mudança climática.</p> <p>Principal fonte de ferro: Couraças (hematita), cimentação por goethita e o ambiente de reprecipitação marcado por pH baixo, M.O e umidade altas.</p>                              |
| <p>2 - Dissolução de fragmentos e reprecipitação de ferro e alumínio com moldes vegetais</p>                  |  |  | <p>Marcada por uma nova porosidade estabelecida (P), a cimentação influenciada por raízes ocorrendo nos moldes alveolares (A), e coalescência de nódulos típicos- rizólitos (N).</p> <p>Cimento composto por goethita (G) cada vez mais aluminosa, processos de dissolução(D) e reprecipitação @ e perda do ferro e concentração de alumínio;</p> |

| Etapa   | ESP  | QF  | Descrição  |
|---|--|---|--|
| <p>3 - Dissoluções, reprecipitações, fragmentações e transformações pós-depositivas das feições tabulares</p> |  |  | <p>Ciclos de dissolução e reprecipitação dos minerais de ferro, revestimento, preenchimento e sobrecrescimentos, fragmentação do cimento (F); cimentos cristalíticos de gibbsita (Gi), manutenção das feições tubulares.</p> <p>Deferrufinização completa, precipitação de óxidos e hidróxidos de alumínio, reenchimentos gibbsíticos.</p> |

## 8 REFERÊNCIAS

- ALEVA, G.J.J. Laterites: concepts, geology, morphology and chemistry. Wageningen (Netherlands): **International Soil Reference and Information Centre (ISRIC)**, 1994.
- ALEXANDRE, J.; TSHIDIBI, N. Y. B. Les enduits ferrugineux associés aux cuirasses latéritiques successives du Hant- Shaba. Nature, structure et mode de formation. In: Alexandre, J., Symoens, J., editors. **Les Processus de Latéritisation**. Brussels, Belgium: Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer; p. 37-46, 1985.
- ALKMIM, A. R. **Investigação geoquímica e estratigráfica da Formação Ferrífera Cauê a porção centro oriental do Quadrilátero Ferrífero, MG**. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais), Departamento de Geologia – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.
- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998.
- ALMEIDA ABREU, P. A.; PFLUG, R. The geodynamic evolution of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. **Zentralblatt für Geologie und Paläontologie**. Teil 1, Allgemeine, Angewandte, Regionale und Historische Geologie, v. 1993, p. 21-44, 1994.
- ALTEMÜLLER, H. J.; HAAG, Th. Mikroskopische Untersuchungen an Maiswurzeln im ungestörten Bodenverband. **Kali-Briefe**, v. 16, p. 349-363, 1983.
- AMBROSI, J. P. **Modélisation thermodynamique de l'altération latéritique dans le système Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O**. Tese de Doutorado. Thèse de l'Université de Poitiers. 1990.
- BABEL, U.; EHRMANN, O.; KREBS, M. Relationships between earthworms and some plant species in a meadow. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 24, n. 12, p. 1477-1481, 1992.
- BARBOSA, G. V.; RODRIGUES, D. M. S. O Quadrilátero Ferrífero e seus problemas geomorfológicos. **Boletim Mineiro de Geografia**, v. 10, n. 11, p. 3-35, 1965.
- BARDOSSY, G. A comparison of the main lateritic bauxite regions o four globe. In: Chowdnury, M.K.R.; Rapharishma, B. P.; Valdyanadhan, R.; Banerjee, Pk.; Ranganathan, K. (Eds.). **Laterisation Processes; internacional seminar**. Rotterdam, Balkema. 15-51, 1981.
- BEAUVAIS, A.; COLIN, F. Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. *Chem Geol.*; 106:77-101, 1993.  
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90167-H](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90167-H)

BEAUVAIS, A.; TARDY, Y. Formation et dégradation des cuirasses ferrugineuses sous climat tropical humide, à la lisière de la forêt équatoriale. **Compte Rendus de l'académie des Sciences**. Serie, v. 2, p. 1539-1545, 1991.

BLACK, H. I. J.; OKWAKOL, M. J. N. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of termites. **Applied soil ecology**, v. 6, n. 1, p. 37-53, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(96\)00153-9](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(96)00153-9)

BLEVINS, R. L.; HOLOWAYCHUK, N.; WILDING, L. P. Micromorphology of soil fabric at tree root-soil interface. **Soil Science Society of America Journal**, v. 34, n. 3, p. 460-465, 1970. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400030031x>

BOURMAN, R. P.; OLLIER, C. D. A critique of the Schellmann definition and classification of 'laterite'. **Catena**, v. 47, n. 2, p. 117-131, 2002.

BRASIL. Lei nº 11.428/2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica. Brasília, DF: **Diário Oficial**, 22 dez.2006

BRINDLEY, G.W., BROWN, G. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. **Mineralogical Society of Great Britain and Ireland Monograph**, v.5, 1980.

BURFORD, E. P.; FOMINA, M.; GADD, G. M. Fungal involvement in bioweathering and biotransformation of rocks and minerals. **Mineral Mag.**; 67: 1127-55, 2003. <https://doi.org/10.1180/0026461036760154>

BUTLER, D. R.; MALANSON, G. P. Non-equilibrium geomorphic processes and patterns on avalanche paths in the northern Rocky Mountains, U.S.A. **Zeitschrift Für Geomorphol.**;34:257-70, 1990. <https://doi.org/10.1127/zfg/34/1990/257>

BUURMAN, P.; JONGMANS, A. G. Podzolisation and soil organic matter dynamics. **Geoderma**. 125:71-83, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.006>

BUURMAN, P.; JONGMANS, A. G. Podzolization—an additional paradigm. **Edafologia**; 9:107-14, 2002.

CAMÊLO, D. L. **Duricrusts ferruginosos da Serra do Espinhaço Meridional (MG) e suas relações com a evolução da paisagem**. ESALQ – USP, Piracicaba. Tese de Doutorado, 93p, 2017.

CARNEIRO, M. A. **O complexo metamórfico Bomfim Setrentional (Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais):Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do arqueano**. 1992. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

CARVALHO FILHO, A.; CURI, N.; SHINZATO, E. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 8, p. 903-916, 2010.



CASTRO, S. S. **Micomorfologia de Solos**, UFG-IESA UNICAMP -IG -DGEO, 2002.

CHEMALE JR, Farid *et al.* Nova abordagem tectono-estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em sua porção meridional (MG). **Geonomos**, 2011.

CONACHER, A. J. Lateritic duricrust and relief inversion in Australia. **CATENA** 17, 1, 97–109. *Catena*, v. 18, n. 6, p. 585-588, 1991.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. Weinheim: WILEY-VCH. 2003.  
<https://doi.org/10.1002/3527602097>

DAVIS, E.G.; PINTO, E.J.A.; PINTO, M.C.F. **Projeto APA Sul RMBH: estudos do meio físico, hidrologia**. Belo Horizonte: SEMAD/CPRM, 2004.

DAVIS, W. M. **The Geographical Cycle**. *Geogr J.*; 14:481, 1899.  
<https://doi.org/10.2307/1774538>

DE CONINCK, F.; STOOPS, G.; VAN RANST, E. Mineralogy and micromorphology of a soil toposequence near Matadi (Lower Zaire) on chloritic green rocks. In: **Geochemistry and mineral formation in the earth surface** (Proc. of the Int. Meeting "Geochemistry of the Earth Surface and Processes of Mineral Formation"). Ed.: R. Rodriguez-Clemente and Y. Tardy, Centre National de la Recherche Scientifique, Granada, Spain. p. 157-174, 1986.

DIDIER, P.; PERRET, D.; TARDY, Y.; NAHON, D. Equilibres entre kaolinites ferrifères, goethites alumineuses et hématites alumineuses dans les systèmes cuirassés. Rôle de l'activité de l'eau et de la taille des pores / Equilibria between Fe-kaolinites, Al-goethites and Al-hematites in ferricretes. Part of water activity and pore size. **Sciences Géologiques, bulletins et mémoires**, v. 38, n. 4, p. 383-397, 1985.  
<https://doi.org/10.3406/sgeol.1985.1715>

DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **US Government Printing Office**, 1969.

DORR, J.V.N. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. **Econ. Geology**. v.59, p.1203-1240, 1964.

DOSSO, M.; RUELLAN, A. **SOLDIDAC Educagri Éditions** - AUF, 2003.

DUCHAUFOUR, P. *Précis de Pédologie*. Paris: Masson & Cie; 1960.

EBSD Electron Backscatter Diffraction Analysis. **EBSD Oxford Instruments**, 2016 - 2020. Disponível em: <http://ebds.com>

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**, Rio de Janeiro, 3ed, 2017.

- ENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of soil science**, v. 41, n. 3, p. 341-358, 1990. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00070.x>
- FEI, S.; PHILLIPS, J.; SHOUSE, M. Biogeomorphic impacts of invasive species. **Annual review of ecology, evolution, and systematics**, v. 45, p. 69-87, 2014. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091928>
- FERREIRA, M. M.; FERNANTES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Rev Bras Ciência Do Solo**.;23:515-24, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300004>
- FERRIS, F. G.; FYFE, W. S.; BEVERIDGE, T. J. Metallic ion binding by *Bacillus subtilis*: implications for the fossilization of microorganisms. **Geology**, v. 16, n. 2, p. 149-152, 1988. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0149:MIBBBS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0149:MIBBBS>2.3.CO;2)
- FIELD, J.; LITTLE, D. Regolith and Biota. In: SCOTT, K. M.; PAIN, C. F. editors. **Regolith Science**. CSIRO PUBLISHING; 2009.
- FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F. **Coleta e impregnação de amostras de solo para análise micromorfológica**. Embrapa Meio Ambiente, 2004.
- GABET, E. J.; REICHMAN, O. J.; SEABLOOM, E. The effects of bioturbation on soil processes and hillslope evolution. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 31, p. 249-273, 2003. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141314>
- GEYGER, E. Mikromorphometrische Untersuchungen über den Einfluß bestimmter Pflanzengemeinschaften auf die Strukturbildung im Boden. In: Jongerius A, editor. **Soil Micromorphology**. Proc. 11 Int. Working Meeting on Soil Micromorphology. Amhem, The Netherlands. Sept. 1964. Amsterdam: Elsevier; p. 540, 1964.
- GIBSON, N.; YATES, C. J.; DILLON, R. Plant communities of the ironstone ranges of South Western Australia: hotspots for plant diversity and mineral deposits. **Biodiversity and Conservation**, v. 19, n. 14, p. 3951-3962, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9939-1>
- GONTIJO, B. M. Uma geografia para a Cadeia do Espinhaço. **Megadiversidade**. v. 4, n. 1-2, p. 7-15, 2008.
- GOUDIE, A. A Duricrust in tropical and Subtropical Landscapes. **Oxford: Claredon Press**, 174p., 1973.
- GOUDIE, A. S. Organic agency in calcrete development. **Journal of Arid Environments**, v. 32, n. 2, p. 103-110, 1996. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0010>

HODGE, A.; BERTA, G.; DOUSSAN, C.; MERCHAN, F.; CRESPI, M. Plant root growth, architecture and function. **Plant Soil**. 321:153-87, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9929-9>

HOFFMAN, B. S. S.; ANDERSON, R. S. Tree root mounds and their role in transporting soil on forested landscapes. **Earth Surf Process Landforms**. 39:711-22, 2014. <https://doi.org/10.1002/esp.3470>

HORVÁTH, Z.; VARGA, B.; MINDSZENTY, A. Micromorphological and chemical complexities of a lateritic profile from basalt (Jos Plateau, Central Nigeria). **Chemical Geology**, v. 170, n. 1-4, p. 81-93, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00242-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00242-9)

JACOBI, C. M.; CARMO, F. F. Life-forms, pollination and seed dispersal syndromes in plant communities on ironstone outcrops, SE Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, p. 395-412, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062011000200016>

JACOBI, C. M.; CARMO, F. F.; VINCENT, R. C.; STEHMANN, J. R. Plant communities on ironstone outcrops: A diverse and endangered Brazilian ecosystem. **Biodivers Conserv**. 16:2185-200, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9156-8>

JACOBI, C.M.; CARMO, F.F.; CAMPOS, I.C.; Soaring extinction threats to endemic plants in Brazilian metal-rich regions. **AMBIO**, 40: 540-543, 2011.

JACOBI, C.M.; CARMO, F.F. **Diversidade florística nas cangas do Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: Código Editora, 2012.

JONGMANS, A.G.; VAN BREEMEN, N.; LUNDSTRÖM, U.; VAN HEES, P. A. W.; FINLAY, R. D.; SRINIVASAN, M.; UNESTAM, T.; GIESLER, R.; MELKERUD, P. A.; OLSSON, M. Rock-eating fungi [4]. **Nature**. 389:682-3, 1997. <https://doi.org/10.1038/39493>

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U.; Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma**. 29:27-39, 1983. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(83\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0016-7061(83)90028-9)

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U.; The 5 M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. **Clay Clay Miner**. 30, 401–408, 1982.

KINDLE, E. M. A Note on Rhizcretions. **J Geol**. 33:744-6, 1925. <https://doi.org/10.1086/623245>

KNAUER, L.G. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. **Geonomos**, v 15 p.81-90, 2007.

KREBS, M.; KRETZSCHMAR, A.; CHADOEUF, J.; GOULARD, M. Investigations on distribution patterns in soil: basic and relative distributions of roots, channels and cracks. **Dev Soil Sci**. 22:437-49, 1993. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70432-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70432-X)

LAMOUNIER, W.L.; CARVALHO, V. L. M.; SALGADO, A. A. R.; MARENT, B. R. A influência da litologia na distribuição da cobertura vegetal e no uso do solo na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero/ MG. **Geografias**, v.6, n.1, p. 152-165, 2010.

LEVETT, A.; GAGEN, E. J.; VASCONCELOS, P. M.; ZHAO, Y; PAZ, A.; SOUTHAM, G. Biogeochemical cycling of iron: Implications for biocementation and slope stabilisation. **Sci Total Environ**. 707:136128, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136128>

LEVETT, A.; VASCONCELOS, P. M.; GAGEN, E. J.; RINTOUL, L.; SPIER, C.; GUAGLIARDO, P. SOUTHAM, G. Microbial weathering signatures in lateritic ferruginous duricrusts. **Earth Planet Sci Lett**. 538:116209, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116209>

LEVETT, A; GAGEN, E; SHUSTER, J; RINTOUL, L.; TOBIN, M.; VONGSVIVUT, J.; BAMBERY, K.; VASCONCELOS, P.; SOUTHAM, G. Evidence of biogeochemical processes in iron duricrust formation. **J South Am Earth Sci**.71:131-42, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.06.016>

LIPAR, M.; WEBB, J. A. The formation of the pinnacle karst in Pleistocene aeolian calcarenites (Tamala Limestone) in southwestern Australia. **Earth-Science Rev**. 140:182-202, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.007>

LUTZ, H. J. Geology and soil in relation to forest vegetation. Proceedings, First North American Forest Soils Conference. **East Lansing**. p. 75-85, 1958.

LUTZ, H. J.; GRISWOLD, F. S. The influence of tree roots on soil morphology. **Am J Sci**. 237:389-400, 1939. <https://doi.org/10.2475/ajs.237.6.389>

MACHADO, A. D. B. On the origin and age of the Steep Rock buckshot, Ontario, Canada. **Chem Geol**.60:337-49, 1987. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90141-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90141-1)

MACHADO, A. de B. The contribution of termites to the formation of laterites. In: Melphi, A.J, editor. **Lateritisation Processes**. São Paulo, Brazil.: Instituto Astronômico e Geofísico, University of São Paulo.; p. 261-7, 1983..

MACHADO, H. A., **Courças ferruginosas e solos associados em diferentes ambientes do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. Belo Horizonte, 2018. Tese Doutorado em Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

MACHADO, M.M.M. **Construindo a imagem geológica do Quadrilátero Ferrífero: conceitos e representações**. 2009. 256f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MATEUS A. C. C., Oliveira FS de, Varajão AFDC, Soares CCV. Genesis of soils from bauxite in Southeastern Brazil: Resilication as a soil-forming process. **Rev Bras Cienc Do Solo**. 41:160507, 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160508>

MATEUS, A. C. C. **Pedogeomorfologia e evolução da paisagem: gênese de depressões fechadas em vertentes associadas à couraça bauxítica na extremidade sul da Serra do Caparaó, sudeste do Brasil.** 2015. Tese de Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

MCFARLANE, M.J. **Laterite and Landscape.** London: **Academic Press.** 151p, 1976.

MCKEAGUE, J.A. **Manual on soil sampling methods of analysis,** Ottawa: **Canadian Society of soil Science,** 2ed, 1978.

MEHRA, J.P.; JACKSON, M.L. Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Miner,** v.7, p.317-327, 1960.

MELO, V. F. *et al.* Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 25, n. 1, p. 19-32, 2001.

MESSIAS, M. C. T. B.; LEITE, M. G. P.; MEIRA NETO, J. A. A.; KOZOVITS, A. R.; TAVARES, R. Soil-Vegetation Relationship in Quartzitic and Ferruginous Brazilian Rocky Outcrops. **Folia Geobot.**48:509-21, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12224-013-9154-5>

MONTEIRO, H. S. *et al.* (U–Th)/He geochronology of goethite and the origin and evolution of cangas. **Geochimica et Cosmochimica Acta,** v. 131, p. 267-289, 2014.

MOURÃO, M.A.A. **A unidade fosfática da Formação Sopa Brumadinho, Supergrupo Espinhaço Região de Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado, UNB, 138p. Brasília, 1995.

NAHON, D. B. Evolution of iron crusts in tropical landscapes. **Rates of chemical weathering of rocks and minerals,** p. 169-191, 1986.

NAHON, D. B. Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. New York: **Wiley-Interscience,** 313p.,1991.

NAHON, Y. T. D. Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite, and Fe (super 3+)-kaolinite in bauxites and ferricretes; an approach to the mechanism of concretion formation. **American Journal of Science,** v. 285, p. 865-903, 1985. <https://doi.org/10.2475/ajs.285.10.865>

NEVES, S. C.; ALMEIDA-ABREU, P. A.; FRAGA, L. M. S. Fisiografia. In: SILVA, A. C. *et al.* **Serra do Espinhaço Meridional: Paisagens e Ambientes.** Belo Horizonte: O Lutador, p. 47-58, 2005.

NIMER, E.C. Clima. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Geografia do Brasil (IBGE), **Geografia do Brasil: Região Sudeste.** IBGE, Rio de Janeiro, pp. 51–89, 1977.

NORRISH, K.; TAYLOR, R.M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. **Journal of Soils Sciences**, 12(2): 294 -306, 1961.

OLIVEIRA F.S., VARAJÃO A.F.D.C., VARAJÃO C.A.C., BOULANGÉ B., COSTA J.L.G., VESSANI L.A. Alteração supergênica e morfogênese tropical no Complexo Máfico-Ultramáfico Acamadado de Barro Alto, GO. **Geoc.**, 28: 255 - 272, 2009.

OLIVEIRA F.S., VARAJÃO A.F.D.C., VARAJÃO C.A.C., BOULANGÉ B., GOMES N.S. Bauxitization of anorthosites from Central Brazil. **Geoderma**, 167-168, 319-327, 2011.

OLIVEIRA F.S., VARAJÃO A.F.D.C., VARAJÃO C.A.C., BOULANGÉ B., SOARES C.C.V. Mineralogical, micromorphological and geochemical of the facies from the Bauxite deposit of Barro Alto, Central Brazil. **Catena**, 105: 29-39, 2014.

OLIVEIRA F.S., VARAJÃO A.F.D.C., VARAJÃO, C.A.C., BOULANGÉ, B. A comparison of properties of clay minerals in isalteritic and in degraded facies. **Clay Minerals**, 48: 697-711, 2013.

OLIVEIRA, F. S. de. **A bauxita de Barro Alto (GO): Gênese e evolução mineralógica, micromorfológica e geoquímica**. 2011. Tese Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais), Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. **Soil Research**, v. 29, n. 6, p. 717-728, 1991. <https://doi.org/10.1071/SR9910717>

PATON, T. R.; WILLIAMS, M. A. J. The concept of laterite. *Annals of the Association of American Geographers*, v. 62, n. 1, p. 42-56, 1972.

PAWLIK, Ł. The role of trees in the geomorphic system of forested hillslopes - A review. **Earth-Science Rev.** 126:250-65, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.008>

PAWLIK, Ł.; MIGON, P.; OWCZAREK, P.; KACPRZAK, A. Surface processes and interactions with forest vegetation on a steep mudstone slope, Stołowe Mountains, SW Poland. **Catena**. 109:203-16, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.012>

PAWLIK, Ł.; PHILLIPS, J. D.; ŠAMONIL, P. Roots, rock, and regolith: Biomechanical and biochemical weathering by trees and its impact on hillslopes-A critical literature review. **Earth-Science Rev.** 159:142-59, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.003>

PFEFFER, W. Druck- und Arbeitsleistung durch wachsende Pflanzen, von W. Pfeffer. Leipzig,: S. Hirzel,; 1893. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.13149>

PHILLIPS, J. D. Biogeomorphology and contingent ecosystem engineering in karst landscapes. **Progress in Physical Geography**, v. 40, n. 4, p. 503-526, 2016. <https://doi.org/10.1177/0309133315624641>

PHILLIPS, J. D.; MARION, D. A. Biomechanical effects of trees on soil and regolith: beyond treethrow. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 96, n. 2, p. 233-247, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2006.00476.x>

PHILLIPS, J. D.; MARION, D. A.; TURKINGTON, A. V. Pedologic and geomorphic impacts of a tornado blowdown event in a mixed pine-hardwood forest. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 278-287, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.004>

PHILLIPS, J. D.; TURKINGTON, A. V.; MARION, D. A. Weathering and vegetation effects in early stages of soil formation. **Catena**, v. 72, n. 1, p. 21-28, 2008b. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.03.020>

PHILLIPS, J.; MARION, D. A.; YOCUM, C.; MEHLHOPE, S. H.; OLSON, J. W.; Geomorphological impacts of a tornado disturbance in a subtropical forest. **Catena**, v. 125, p. 111-119, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.014>

RAPOSO, F. O. **Formações Ferríferas e metassedimentos químicos de áreas selecionadas do Quadrilátero Ferrífero e suas relações com níveis Rudáceos**. 1995. 134f. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1995.

REZENDE, E. A.; SALGADO, A. A. R. Mapeamento de unidades de relevo na média Serra do Espinhaço Meridional-MG. **GEOUSP Espaço e Tempo** (Online), v. 15, n. 3, p. 45-60, 2011.

RIZZINI, C. T. Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos sociológicos e florísticos. São Paulo: Editora de humanismo, Ciência e Tecnologia, 1979.

ROERING, J. J.; MARSHALL, J.; BOOTH, A. M.; MORT, M.; JIN, Q. Evidence for biotic controls on topography and soil production. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 298, n. 1-2, p. 183-190, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.07.040>

RUCHKYS, U. A. Sítios geológicos e propostas brasileiras de geoparques em geossistemas ferruginosos. **Geossistemas ferruginosos do Brasil**. Belo Horizonte: Editora 3i, p. 169-194, 2015.

RUELLAN, A.; DOSSO, M. Regards sur le sol. Paris: Fouchaer, 1993.

SAADI A. A. Geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. **Geonomos**, Belo Horizonte. v. 3, p 41-75, 1995.

SALGADO, A. A. R. **Estudo da evolução do relevo do Quadrilátero Ferrífero, MG - Brasil, através da quantificação dos processos erosivos e denudacionais**. 2006, 125 f., Tese (doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais), Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Université Paul Cezanne - AixMarseille III, 2006.

SALGADO, A. A. R.; CARMO, F F. 'Quadrilátero Ferrífero': a beautiful and neglected landscape between the gold and iron ore reservoirs. **Landscapes and landforms of Brazil**, p. 319-330, 2015.

SAMBATTI, J. A.; COSTA, A. D.; MUNIZ, A. S.; SENGIK, E.; SOUZA JUNIOR, I. G.; & BIGHAM, J. M. Relações entre a substituição isomórfica de Fe por Al e as características químicas e mineralógicas de hematitas sintéticas. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 26, p. 117-124, 2002.

ŠAMONIL, P.; DANĚK, P.; SCHAETZL, R. J.; VAŠÍČKOVÁ, I.; VALTERA, M. Soil mixing and genesis as affected by tree uprooting in three temperate forests. **European Journal of Soil Science**, v. 66, n. 3, p. 589-603, 2015. <https://doi.org/10.1111/ejss.12245>

ŠAMONIL, P.; KRÁL, K.; HORT, L. The role of tree uprooting in soil formation: a critical literature review. **Geoderma**, v. 157, n. 3-4, p. 65-79, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.03.018>

ŠAMONIL, P.; SCHAETZL, R. J.; VALTERA, M.; GOLIAŠ, B.; BALDRIAN, P.; VAŠÍČKOVÁ, I.; ADAM, D.; JANÍK, D.; HORT, L. Crossdating of disturbances by tree uprooting: can treethrow microtopography persist for 6000 years?. **Forest Ecology and Management**, v. 307, p. 123-135, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.045>

ŠAMONIL, P.; VAŠÍČKOVÁ, I.; DANĚK, P.; JANÍK, D.; ADAM, D. Disturbances can control fine-scale pedodiversity in old-growth forests: is the soil evolution theory disturbed as well?. **Biogeosciences**, v. 11, n. 20, p. 5889-5905, 2014. <https://doi.org/10.5194/bg-11-5889-2014>

SCHAEFER, C. E. G. R. Brazilian latosols and their B horizon microstructure as long-term biotic constructs. **Australian Journal Soil Research**, v. 39, n. 5, p. 909-926, 2001.

SCHAEFER, C. E. G. R.; GILKES, R. J.; FERNANDES, R. B. A. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma**, v. 123, n. 1-2, p. 69-81, 2004.

SCHAEFER, C. E. G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; RIBEIRO, A. S. Solos desenvolvidos sobre canga ferruginosa no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais**. Organizado por Flávio Fonseca do Carmo e Luciana Hiromi Yoshino Kamino. Belo Horizonte: 3ª Edição, 2015.

SCHAEFER, C.; DALRYMPLE, J. Landscape evolution in Roraima, North Amazonia: planation, paleosols and paleoclimates. **Zeitschrift für Geomorphologie**, p. 1-28, 1995. <https://doi.org/10.1127/zfg/39/1995/1>

SCHAEFER, C.E.G.R.; DIAS, J.R.; MATA, L.C.; MICHEL, R.F. & OLIVEIRA, A.C. Análise Espacial do Regime Hídrico dos Solos e da Bacia da Mutuca, após Instalação da Cava da Mina de Capão Xavier - Nova Lima - MG. In: **XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da água, Santa Maria – RS, 2004**.



SCHAEFER, C.E.G. R; SIMAS, F.N.B.; MENDON.A, B.A.F.; SABOYA, A.S.; FERREIRA J.; NIOR, W.G.; NUNES, J.A. &CORREA, G.R. Geodiversidade dos Ambientes de Canga na Região de Carajás – Pará. **Relatório técnico Vale do Rio Doce**, 2008. 75 p.

SCHAETZL, R. J. Complete soil profile inversion by tree uprooting. **Physical Geography**, v. 7, n. 2, p. 181-189, 1986.  
<https://doi.org/10.1080/02723646.1986.10642290>

SCHAETZL, R. J.; BURNS, S. F.; JOHNSON, D. L.; SMALL, T. W. Tree uprooting: review of impacts on forest ecology. **Vegetatio**, v. 79, p. 165-176, 1988.  
<https://doi.org/10.1007/BF00044908>

SCHELLMANN, W. Considerations on the definition and classification of laterites. In: **Proceedings of the International Seminar on Lateritisation Processes**, Trivandrum, India, 1981. AA Balkema, p. 1-10, 1981.

SCHMIDT-LORENZ, R. Soil Reddening through hematite from plinthitized saprolite. 1978.

SCHULZE, D. G. The influence of aluminum on iron oxides. VIII. Unit-cell dimensions of Al-substituted goethites and estimation of A1 from them. **Clays Clay Miner**, v. 32, n. 1, p. 36-44, 1984.

SCHWERTMANN, U.; FITZPATRICK, R. W.; TAYLOR, R.; LEWIS, D. G. The influence of aluminum on iron oxides. Part II. Preparation and properties of Al-substituted hematites. **Clays and Clay Minerals**, v. 27, p. 105-112, 1979.  
[https://Doi.Org/10.1346/Ccmn.1979.0270205](https://doi.org/10.1346/Ccmn.1979.0270205)

SCHWINNING, S. Do we need new rhizosphere models for rock-dominated landscapes?. **Plant and soil**, v. 362, p. 25-31, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1482-2>

SHOUSE, M.; PHILLIPS, J. Soil deepening by trees and the effects of parent material. **Geomorphology**, v. 269, p. 1-7, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.031>

SILVA, S.L.da. Estudos do Meio Físico. IN: SILVA, S.L., ed. **Projeto APA Sul RMBH: Estudos do meio físico**. Belo Horizonte, CEMAD/CPRM, p.46- 50, 2005.

SINGH, B.; GILKES, R. J. Properties and distribution of iron oxides and their association with minor elements in the soils of south-western Australia. **Journal of soil Science**, v. 43, n. 1, p. 77-98, 1992.

STOOPS, G.; CHUN, Shi Guang; ZAUZYAH, S. Combined micromorphological and mineralogical study of a laterite profile on graphite sericite phyllite from Malacca (Malaysia). **Bulletin de la Société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie**, v. 99, n. 1, p. 79-92, 1990.

STOOPS, G.; MARCELINO, V. Lateritic and Bauxitic Materials. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. **Elsevier**; p. 329-50. 2010. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53156-8.00015-6>

STOOPS, G.; MARCELINO, V.; ZAUAYAH, S.; MAAS, A. Micromorphology of soils of the humid tropics. **Dev Soil Sci.** 22:1-15, 1994. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70393-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70393-4)

STOOPS, G. Guidelines for the Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. SSSA. Madison, 2003.

SUHALDOLNIK, J.V.S. **Caracterização Macro e Micromorfológica de Feições Tubulares em Perfil de Alteração do Quadrilátero Ferrífero**, MG, 27p., 2017.

TARDY, Y. Diversity and terminology of lateritic profiles. In **'Weathering, soils and paleosols'**. (Eds IP Martini, W Chesworth) pp. 379–405, 1992.

TARDY, Y. Petrology of laterites and tropical soils. Balkema Publishers, 1997.

TARDY, Y.; BARDOSSY, G.; NAHON, D. Fluctuations de l'activité de l'eau et successions de minéraux hydratés et déshydratés au sein des profils latéritiques ferrugineux et bauxitiques. **Comptes rendus de l'Académie des sciences**. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre, v. 307, n. 7, p. 753-759, 1988.

TARDY, Y.; KOBILSEK, B.; PAQUET, H. Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia. **Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)**, v. 12, n. 1-2, p. 283-295, 1991.

TARDY, Y.; NOVIKOFF, André. Activité de l'eau et déplacement des équilibres gibbsite-kaolinite dans les profils latéritiques. **Comptes rendus de l'Académie des sciences**. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre, v. 306, n. 1, p. 39-44, 1988.

TARDY, Y.; SOLER, J. M. *Pétrologie des latérites et des sols tropicaux*. Paris: Masson, 416 p. 1993.

TROLARD, F.; TARDY, Y. The stabilities of gibbsite, boehmite, aluminous goethites and aluminous hematites in bauxites, ferricretes and laterites as a function of water activity, temperature and particle size. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 51, n. 4, p. 945-957, 1987. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90107-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90107-4)

ULANOVA, N. G. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review. **Forest ecology and management**, v. 135, n. 1-3, p. 155-167, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00307-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00307-8)

USGS. Mineral Commodity Summaries 2012. Virginia, U.S. Geological Survey. 206 p.; 2017.

USGS. Mineral Commodity Summaries 2018. Virginia, U.S. Geological Survey. 204 p.; 2018.

USGS. Mineral Commodity Summaries 2020. Virginia, U.S. Geological Survey. 204 p.; 2020.

VALADÃO, R. C. Geodinâmica de superfícies de aplanamento, desnudação continental e tectônica ativa como condicionantes da megageomorfologia do Brasil orientado. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, 2009.

VALENTE, E. L. **Relações solo-vegetação no Parque Nacional da Serra do Cipó, Espinhaço Meridional, Minas Gerais**. 138 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

VARAJÃO, C. A. C.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; BRAUCHER, R.; COLIN, F. NALINI JUNIOR, H. A. Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10Be) e da pedogênese. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1409-1425, 2009.

VELOSO, H. P.; RANGEL-FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 1991.

WHITELEY, G. M.; DEXTER, A. R. The behaviour of roots encountering cracks in soil: I. Experimental methods and results. **Plant and Soil**, v. 77, p. 141-149, 1984. <https://doi.org/10.1007/BF02182918>

WIDDOWSON, M. Laterite and ferricrete. In: NASH, David J.; MCLAREN, Sue J. **Geochemical sediments and landscapes**. 2007.

WILKINSON, M. T.; RICHARDS, P. J.; HUMPHREYS, G. S. Breaking ground: pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation. **Earth-Science Reviews**, v. 97, n. 1-4, p. 257-272, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.09.005>

YATES, C. J.; GIBSON, N.; PETIT, N. E.; DILLON, R.; PALMER, R. The ecological relationships and demography of restricted ironstone endemic plant species: implications for conservation. **Australian Journal of Botany**, v. 59, n. 7, p. 692-700, 2011. <https://doi.org/10.1071/BT11199>

YATSU, E. The nature of weathering: an introduction. Sozosha, 1988.

ZWIENIECKI, M. A.; NEWTON, M. Roots growing in rock fissures: their morphological adaptation. **Plant and Soil**, v. 172, p. 181-187, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00011320>