

Ferricretes em arquivos fluviais quaternários: desdobramentos para a dinâmica fluvial recente no Quadrilátero Ferrífero/MG

Ferricretes in quaternary fluvial archives: deployments to the recent fluvial dynamics in the Quadrilátero Ferrífero/MG

Luiz Fernando de Paula Barros^{ab}, Fábio Soares de Oliveira^{ac}, Antônio Pereira Magalhães Júnior^{ad}, Guilherme Eduardo Macedo Cota^{ae}

^aPrograma de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais

^bluizfpbarros@yahoo.com.br, ^cfabiosolos@gmail.com, ^dantonio.magalhaes.ufmg@gmail.com, ^eguilhermeduardo.geo@gmail.com

Resumo

Estudos anteriores mostram a ocorrência regional de ferricretes associados a sedimentos aluviais quaternários no Quadrilátero Ferrífero. Esses estudos também apontam que os ferricretes podem ter retardado a dissecação fluvial em alguns vales e que elas não se formam nas condições atuais. Para testar essas hipóteses, este estudo realizou novas análises nos vales dos rios Conceição e Mango. Amostras indeformadas de ferricrete foram coletadas para caracterização micromorfológica e amostras de sedimentos foram datadas por Luminescência Opticamente Estimulada (LOE). Os resultados confirmam as hipóteses anteriores. No vale do Rio Conceição, verificou-se que houve um longo tempo de acumulação no nível deposicional com ferricretes ainda encontrado no fundo do vale, em contraste com uma planície de inundação muito jovem e sem ferricretes, situação análoga à do vale do Ribeirão do Mango. As diferenças em termos de preservação do ferricrete em relação ao nível da água do Rio Conceição e a identificação de uma nova microestrutura de ferricrete no vale do Ribeirão do Mango mostram que esses materiais estão em lenta transformação e degradação, e não em construção.

Palavras-chave: Geomorfologia fluvial; geocronologia; evolução da paisagem.

Abstract

Previous studies show the regional occurrence of ferricretes associated with Quaternary alluvial sediments in the Quadrilátero Ferrífero. These studies also pointed out that ferricretes may have slowed down the river incision in some valleys and that ferricretes are not forming in current conditions. In order to test these hypotheses, this study carried out new analyses in the Conceição and Mango river valleys. Undisturbed ferricrete samples were collected for micromorphological characterization and sediment samples were collected for Optically Stimulated Luminescence dating (OSL). The results confirm the previously raised hypotheses. In the Conceição River valley, a long accumulation time at the depositional level with ferricretes found in the valley floor was observed, in contrast to a very young floodplain without ferricretes, similar situation to the Mango River valley. Differences in preservation of the N3 ferricrete in relation to the water level in the Conceição River valley and the identification of a new microstructure to the ferricrete in Mango River valley show that these materials are undergoing slow transformation and degradation rather than under formation.

Keywords: Fluvial geomorphology; geochronology; landscape evolution.

1. Introdução

Localizado na borda sul do Cráton São Francisco, o Quadrilátero Ferrífero (QF) corresponde a um expressivo conjunto serrano na região central do estado de Minas Gerais. Sua morfologia é sustentada por rochas arqueanas e proterozoicas, compondo um substrato geológico bastante deformado pelas orogêneses Transamazônica e Brasiliana, respectivamente a 2,2-2,0 Ga e 600 Ma (Uhlein & Noce 2012).

O critério para a delimitação do QF é a ocorrência de formações ferríferas bandadas – BIF's (Alkmim & Marshak 1998), do Paleoproterozoico, conhecidas regionalmente como itabiritos. Devido à sua maior resistência ao intemperismo, estas rochas, assim como quartzitos, sustentam as porções mais elevadas do

relevo (Salgado et al. 2008). A intemperização dos itabiritos e de coberturas por eles compostas deu origem a duricrusts ferruginosos (Monteiro et al. 2014; Machado et al. 2021), também de elevada resistência à degradação e que, portanto, também sustentam diversas áreas elevadas. Regionalmente conhecidos pelo termo canga, esses materiais se encaixam no modelo geral de duricrust (Nahon 1986).

O processo de formação desses duricrusts e de evolução dos saprolitos de itabirito, muitas vezes subjacentes, levou à exportação de grandes quantidades de ferro para os cursos d'água e as águas subterrâneas ao longo do Cenozoico (Spier et al. 2006; Monteiro et al. 2014). Nesse contexto, em diversas fases de clima mais seco que o atual ao longo do Quaternário Tardio, a flutuação do nível freático em fundos de vale colmatados por sedimentos aluviais grossos levou à

cimentação dos materiais por enriquecimento absoluto de ferro, preenchendo os espaços intergranulares nos depósitos (Barros 2015; Barros et al. 2016a, b; Figueiredo Filho et al. 2019; Barros & Magalhães Jr. 2020). Desse modo, sendo formados pelo enriquecimento absoluto de ferro em áreas de descarga de águas subterrâneas, esses materiais são melhor definidos como ferricretes (Goudie 1973; McFarlane 1976).

Barros (2015) evidencia a ocorrência regional de ferricretes associados a arquivos fluviais pleistocênicos no QF e Figueiredo Filho et al. (2019) focaram a análise e classificação desses ferricretes no vale do Rio Conceição. Nesses dois trabalhos, são apresentados resultados de análises micromorfológicas, microquímicas e mineralógicas. Esses e outros estudos anteriores que abordaram a presença dos ferricretes em sedimentos aluviais pleistocênicos na região (Barros et al. 2016a, b; Barros & Magalhães Jr. 2020) apontam duas hipóteses: os ferricretes i) podem ter retardado a dissecação fluvial em alguns vales; e ii) não se formam nas condições atuais.

O objetivo do presente trabalho é contribuir para o entendimento desses materiais, seus processos de (trans)formação e suas implicações geomorfológicas a partir de novas análises que permitam testar as referidas hipóteses. Para isso, foram escolhidos como estudo de caso os vales dos rios Conceição e Mango, os quais apresentam ferricretes aflorantes no fundo de vale (Barros & Magalhães Jr. 2020). Dessa forma, espera-se contribuir para o amplo debate dos complexos processos envolvidos na evolução das coberturas superficiais (Goudie 1973; McFarlane 1976; Ollier &

Galloway 1990; Tanner & Khalifa 2010; Bourman et al. 2020; Milagres et al. 2023), especialmente em regiões tropicais.

2. Área de estudo

O Rio Conceição é afluente da bacia do Rio Doce, a qual drena a porção leste do QF. Por sua vez, o Ribeirão do Mango compõe a bacia do alto Rio das Velhas, que drena a porção central desse mesmo domínio.

Destacam-se nas bacias dos rios estudados as seguintes unidades geológicas (Alkmim & Marshak 1998): Embasamento Cristalino, composto por granitos, gnaisses e migmatitos arqueanos; Supergrupo Rio das Velhas, uma sequência vulcanossedimentar neoarqueana tipo greenstone belt, com predomínio de xistos e filitos; e Supergrupo Minas, encontrado principalmente nas cabeceiras dos cursos d'água, é constituído por rochas metassedimentares paleoproterozoicas, destacando-se itabiritos e quartzitos (Figura 1). Há ainda a ocorrência de diques de diabásio e coberturas cenozoicas (duricrusts paleogênicos e aluviões quaternários) – Figura 1.

Conforme Medina et al. (2005), o vale do Rio Conceição se configura como um típico vale anticlinal e se caracteriza como um extenso vale encaixado, quase retilíneo, apresentando uma sucessão de morros de topos alinhados sob a forma de extensos espiões. Os desniveis variam de 180 a 300 m, com declividades elevadas (30-40°). A densidade de drenagem é alta, com padrão predominantemente em treliça, onde o Rio Conceição segue uma direção preferencial SSW-NNE e os tributários principais assumem direções ortogonais.

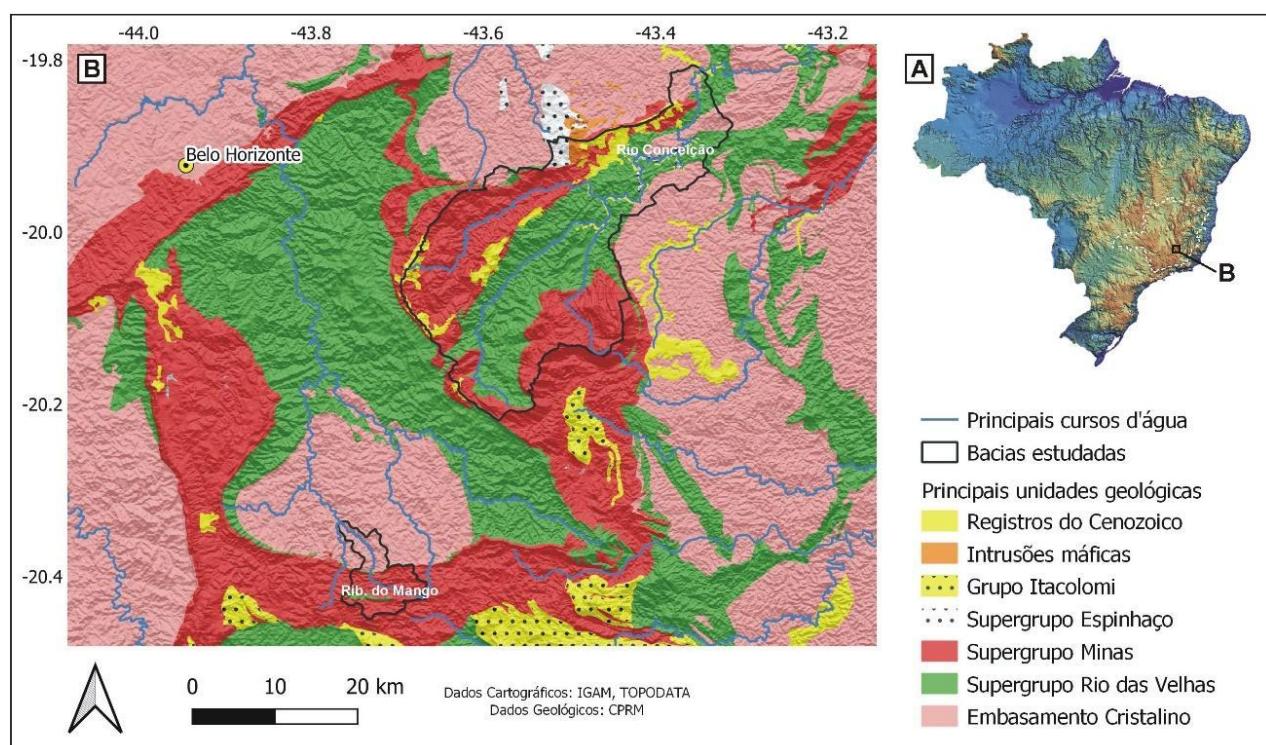


Figura 1: A – Situação de Minas Gerais e da região do QF em croqui do modelo digital de elevação do Brasil; B – Localização dos vales dos rios Conceição e Mango e esboço geológico regional.

Por sua vez, no vale do Ribeirão do Mango é comum encontrar soleiras rochosas que estabelecem importantes níveis de base locais, inclusive pelo fato de ser encontrado em um contexto mais de cabeceira na bacia do alto Rio das Velhas, tendo seu alto e médio cursos em rochas dos supergrupos Minas e Rio das Velhas (Barros et al. 2008). Dessa forma, nesse trecho se nota a configuração de um relevo mais dissecado, com consideráveis variações morfológicas e altimétricas. Já na área do Complexo do Bação, encontra-se um relevo colinoso e a rede de drenagem se instala ao longo das principais descontinuidades tectônicas do embasamento cristalino (Barros et al., 2008).

O clima regional é o tropical de altitude, marcado por um período de precipitação elevada (outubro/março) e outro de estiagem (abril/setembro), com médias anuais de precipitação entre 1.000-1.500 mm e de temperatura entre 19-22°C (SEA 1980), porém com variações locais importantes em função dos efeitos da orografia. A região apresenta uma transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, com grande diversidade e complexidade estrutural de ambientes e

tipos fitofisionômicos (Carvalho Filho et al. 2010). Entretanto, ao longo do Quaternário Tardio, diversos cenários bioclimáticos foram identificados na região, com uma sucessão de fases mais secas e mais frias e fases mais úmidas e mais frias (Behling & Lichte 1997; Parizzi et al. 1998; Araújo et al. 2005; Gomes et al. 2009; Barros et al. 2011, 2016a).

3. Materiais e métodos

O levantamento e entendimento da organização dos níveis deposicionais fluviais e dos ferricretes foram embasados em trabalhos anteriores (Raposo et al. 2008; Barros 2015; Barros & Magalhães Jr. 2012, 2018, 2019, 2020; Barros et al. 2016a, b; Figueiredo Filho et al. 2019). Dos oito níveis deposicionais presentes no vale do Rio Conceição, foi dado foco aos mais recentes, que estão em contato direto com o leito atual, a saber: o N3, ainda preservado como terraço fluvial, e o N2, referente à planície de inundação consolidada (Figura 2). No caso do vale do Ribeirão do Mango, o arranjo é muito semelhante, sendo o N2 ainda preservado como baixo terraço fluvial e o N1 referente à planície de inundação.

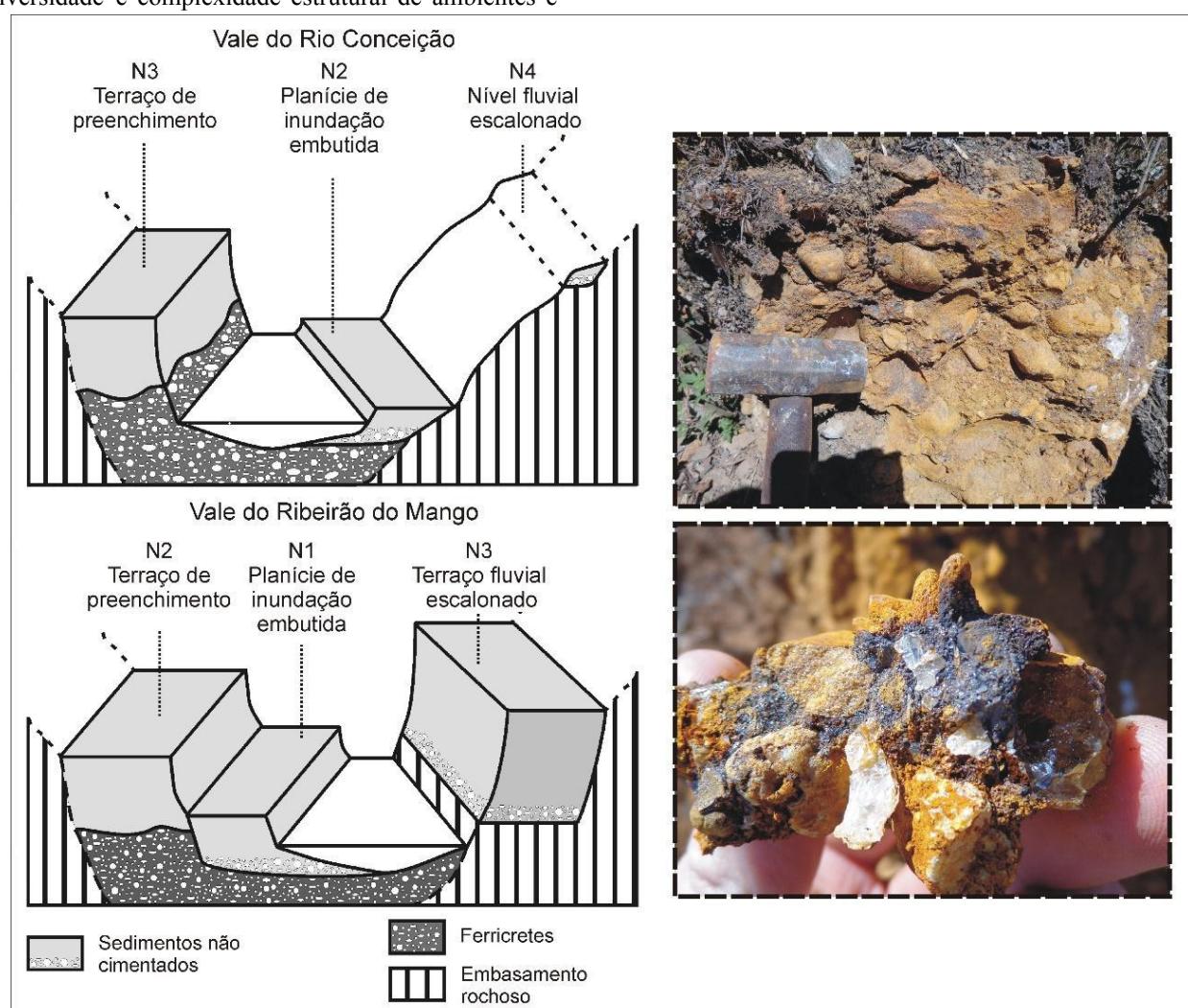


Figura 2: Esquema com a situação dos níveis deposicionais fluviais em fundo de vale dos rios Conceição e Mango (Barros et al. 2016a adaptado) e amostras de ferricretes na região.

No vale do Rio Conceição, num trecho onde o ferricrete (fácie basal do N3) aflora na margem (Figura 3A), foram coletadas três amostras de ferricrete para análise micromorfológica, sendo uma na porção superior, outra na porção intermediária e a última na porção inferior, no contato com a lâmina d'água. Em trecho próximo, onde a fácie superior do N3 também é encontrada na margem e sobreposta por sedimentos não cimentados (Figura 3B), foi coletada amostra para datação destes sedimentos por Luminescência Opticamente Estimulada (LOE). A jusante, num trecho

onde a planície de inundação (N2) apresenta-se bem desenvolvida e alguns níveis de acumulação ferruginosa são observados, também foram feitas análises estratigráficas e coletada amostra para datação por LOE (Figura 3C). No vale do Ribeirão do Mango foram coletadas amostras apenas do ferricrete, todas dispostas no leito atual (Figura 3D e E), sujeitas à ação da água na maior parte do ano. A localização das amostras coletadas e a indicação das análises empreendidas são feitas na Tabela 1.



Figura 3: Trechos onde foram feitas as amostragens nos vales dos rios Conceição (A e B) e Mango (C e D).

Tabela 1: Localização das amostras coletadas e indicação das análises empreendidas.

Vale fluvial	Sítio amostral (coordenadas)	Nível deposicional associado	Amostras	Material amostrado	Análise
Rio Conceição	20°03'13.6"S 43°34'15.7"W	N3	MC1 (base), MC2 (meio) e MC3 (topo) DC1	Ferricrete	Micromorfológica
	19°59'31.9"S 43°29'53.5"W	N2	DC2	Sedimentos marginais	LOE
Ribeirão do Mango	20°20'54.2"S 43°45'11.6"W	N2	MM1 e MM2	Ferricrete	Micromorfológica, microquímica e mineralógica

Para a análise micromorfológica, lâminas delgadas foram confeccionadas na dimensão de 1,8 x 30 x 40 mm a partir de amostras indeformadas, polidas e cobertas com lamínula. A caracterização micromorfológica foi realizada em microscópio trinocular Zeiss, modelo Axiophot, com câmera fotográfica acoplada. Foi utilizada a terminologia de Stoops (2003) para a caracterização das microestruturas e termos específicos do estudo de sistemas de alteração propostos em Nahon (1991) e Delvigne (1998).

Para as amostras do vale do Ribeirão do Mango também foram feitas caracterizações geoquímica e mineralógica, realizadas por microanálise em seções finas e difratometria de raios-X (DRX), respectivamente. No caso do vale do Rio Conceição, resultados dessas análises foram apresentados em trabalhos anteriores (Barros 2015; Figueiredo Filho et al. 2019). Optou-se pelo uso da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com sensores EDS e WDS para investigar a composição química das amostras. Nas análises mineralógicas, o material do cimento, mesmo com a presença de matriz, foi pulverizado e submetido à leitura, tendo em vista que no interior do cimento existem muitos pequenos grãos minerais da matriz que não podem ser separados, devido à dureza do material.

Nas análises com EDS, as seções finas metalizadas com carbono foram observadas em MEV da marca FEI (modelo QUANTA 3D), e para as análises com WDS foi utilizado um MEV da marca JEOL (modelo JCXA-8900 RL), sendo ambos os equipamentos do Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). As leituras foram feitas com aceleração de 15 Kv e corrente de 20 nA. Com o EDS foram produzidos mapas microquímicos, e com o WDS análises pontuais. Foram utilizados os padrões da coleção Ian Steele e considerados os elementos Fe, Al, Si, C e O, sendo os teores reportados em óxidos (% em peso).

As análises mineralógicas por Difração de Raios-X (DRX) foram realizadas no Laboratório de Mineralogia do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV) utilizando um Difratômetro X'Pert Panalytical com radiação de CoKa. A leitura foi feita no intervalo de 2 a 70o 2θ e os difratogramas foram interpretados no software X'Pert HighScore Plus, bem como por meio de padrões da literatura (Brindley & Brown, 1980).

Por fim, para a datação dos sedimentos por LOE, foram coletadas amostras ao abrigo de luz, utilizando-se sacos pretos e tubos de PVC (5x30 cm). Estes foram inseridos nos perfis horizontalmente, por percussão. As amostras foram enviadas ao laboratório Datação, Comércio e Prestação de Serviços Ltda., em São Paulo, onde foram preparadas e analisadas para a extração de sua idade absoluta. As amostras foram analisadas pelo método SAR (single aliquot regenerative-dose), tendo sido analisadas dez alíquotas em cada amostra e obtido um valor médio. O

detalhamento da metodologia pode ser encontrado no sítio eletrônico do laboratório responsável (<http://www.datacao.com.br/>).

4. Resultados e discussões

4.1 Análises micromorfológicas, mineralógicas e microquímicas

No vale do Ribeirão do Mango, os ferricretes foram identificados no leito atual, embora sejam associados a um nível deposicional mais antigo, o N2 (Raposo et al. 2008; Barros & Magalhães Jr. 2018, 2020). O Ribeirão do Mango apresenta uma dinâmica sedimentar bastante acelerada atualmente (Raposo et al. 2009), por isso, a exposição do ferricrete ocorre apenas pontualmente.

Acredita-se que, em função desse contexto, as análises micromorfológicas do ferricrete revelam uma microestrutura diferente para o material cimentante nas amostras MM1 e MM2 em relação ao verificado em outros vales da região. Ao invés das microestruturas septária ou microlaminar, presentes em ferricretes de níveis fluviais acima da drenagem atual (Barros 2015; Figueiredo Filho et al. 2019), as amostras coletadas no leito do Ribeirão do Mango revelam uma organização micronodular (Figuras 4A e 4B), classificada como solta e descontínua (Stoops, 2003). Trata-se de revestimentos no entorno de clastos que se dissociam na forma de nódulos típicos, não zonados, caracterizando uma distribuição relativa quito-enaulica. Tais nódulos são pequenos e irregulares, tendendo ao maior arredondamento quanto mais distante estiverem dos revestimentos. Alguns se apresentam coalescidos a outros nódulos, formando uma segunda hierarquia microestrutural. A composição química ferruginosa é destacada pelos mapas microquímicos (Figuras 4C e 4D). Neste caso, as imagens com maior detalhamento (aumento da ordem de 2.500X) revelaram a presença de material ferro-silicático.

Em termos da composição mineralógica, os resultados da análise de DRX (Figura 5) destacam a presença marcante da goethita e hematita, sendo a primeira mais comum, o que é independente da organização (septária, microlaminar ou micronodular), tendo em vista os resultados de trabalhos anteriores (Barros 2015, Figueiredo Filho et al. 2019). Como as análises envolveram também clastos arenosos da matriz, o difratograma apresenta picos de quartzo e muscovita e picos de argila (caulinita), sendo esses de baixa intensidade. Por sua vez, as sondagens pontuais no interior e borda dos micronódulos (Figura 6, pontos 1 e 2) indicaram que o material é ferruginoso, mas que há na composição um conteúdo médio de 3% de SiO₂, tal como já havia sido evidenciado pelos mapas microquímicos. O conteúdo de Fe₂O₃ é maior na borda e a expressiva quantidade de H₂O sinaliza para a natureza goethítica do material. O revestimento do clasto de quartzo (Figura 6, ponto 4) apresenta conteúdo de Al₂O₃ e SiO₂ maior que aquele dos nódulos, embora também mantenha confirmada sua natureza ferruginosa.

Em vista dessas análises, acredita-se que a microestrutura revelada para as amostras do vale do Ribeirão do Mango (micronodular) e o elevado conteúdo de água na composição do cimento ferruginoso indicam que esta seja uma fácie de alteração do ferricrete. Essa composição química corrobora com a presença de um material ferruginoso

mais goethítico, que está de acordo com a mineralogia observada em processos sucessivos de dissolução e reprecipitação dos ferricretes. Conforme destacou Ramanaidou (2009), a paragênese mineral típica de processos de degradação de couraças ferruginosas leva à alteração das hematitas para goethitas, que vão se tornando goethitas aluminosas, e destas para gibbsita.

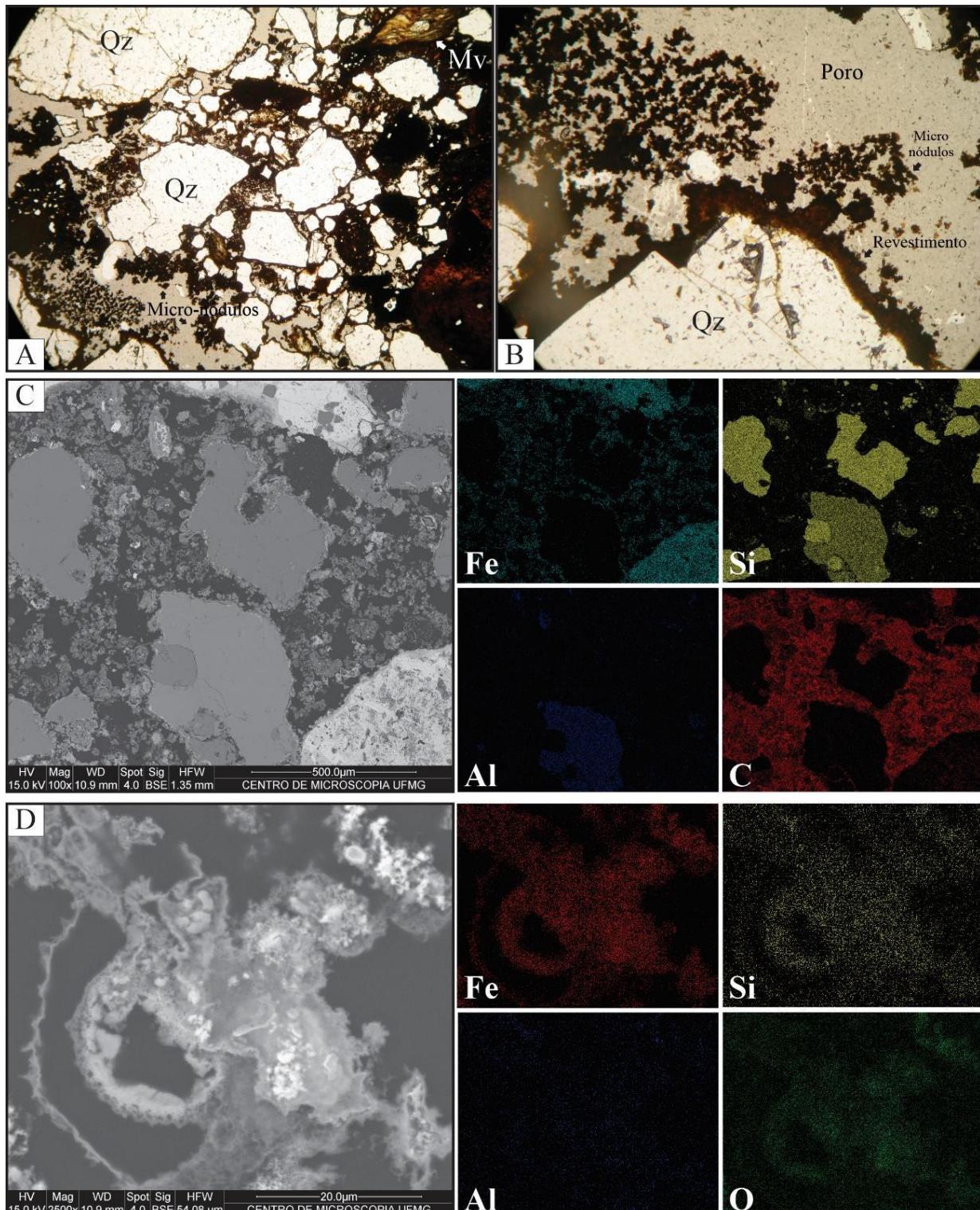


Figura 4. Aspecto micromorfológico dos ferricretes do vale do Ribeirão do Mango, evidenciando: A e B – Fotomicrografias obtidas em microscópio óptico (níveis paralelos) das organizações micronodulares do cimento ferruginoso, bem como do revestimento de fragmentos de quartzo e porosidade secundária associada; C e D – Mapas microquímicos dos elementos Fe, Al, Si, C e O obtidos por sonda EDS acoplada em MEV, com respectivas imagens de elétrons retroespelhados. As porções coloridas indicam a presença do elemento químico. Qz = quartzo; Mv = muscovita.

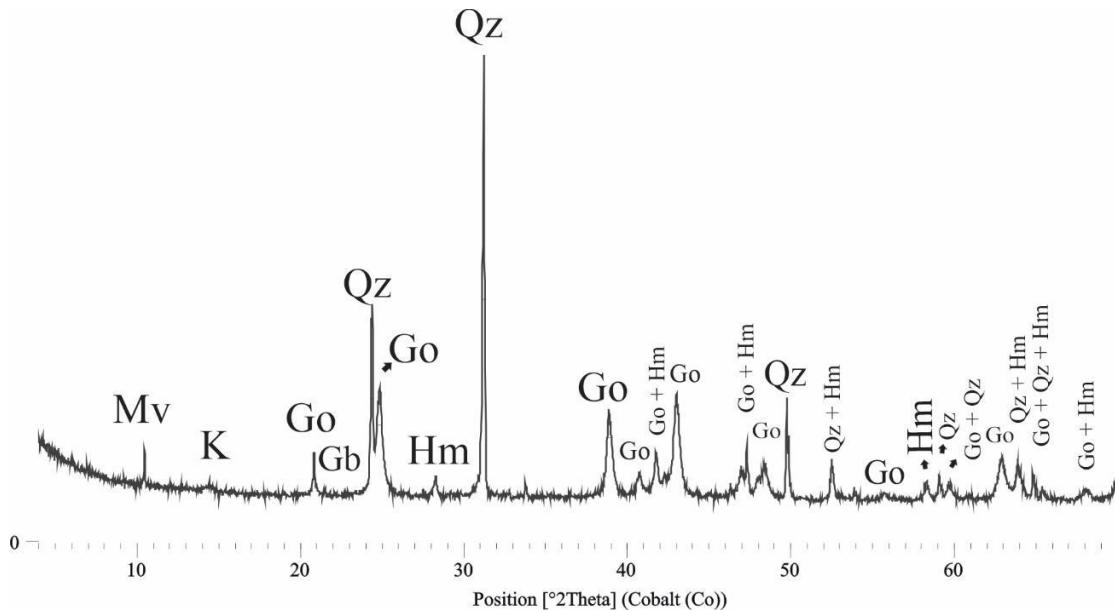
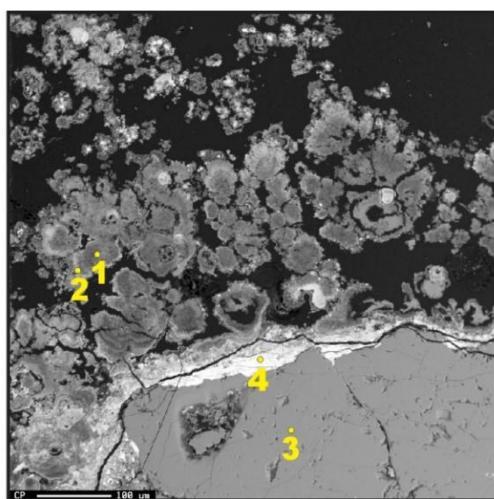


Figura 5. Difratograma de Raios-X (radiação CoK α) do cimento ferruginoso na microestrutura micronodular de ferricrete do vale do Ribeirão do Mango. K = caulinita; Go = goethita; Mv = muscovita; Qz = quartzo e Hm = hematita.



Ponto	Descrição	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	Total
1	Centro do micronódulo	0,34	2,11	28,82	67,00	98,27
2	Borda do micronódulo	0,53	3,77	55,47	40,00	99,78
3	Fragmento de quartzo	0,02	92,77	0,02	0,00	92,81
4	Material na borda do fragmento de quartzo	4,51	6,12	65,46	21,00	97,09

Figura 6. Microanálises pontuais obtidas por microssonda WDS acoplada em MEV com respectivas imagens de elétrons retroespelhados de ferricretes do vale do Ribeirão do Mango. Os números nas imagens indicam as posições em que foi posicionado o feixe e realizadas as leituras. Os elementos analisados foram Al, Si, Fe, além do conteúdo de água, todos reportados em óxidos.

O alto conteúdo de água e a dificuldade de analisar esse cimento em função do seu comportamento diante do feixe de detecção da microssonda WDS acoplada em MEV levam a considerar que se trata de um material muito poroso. O fechamento para o clasto de quartzo menor que 99% (Figura 5, ponto 3) sugere uma rede menos adensada do cristal, o que pode ser um reflexo da presença de alta porosidade, revelando outro possível sinal de alteração mineral. Isso porque, nos

ciclos de dissolução e reprecipitação do ferro, a tendência é que os cristais de quartzo sejam parcialmente dissolvidos e se tornem ruíniformes (Nahon 1991, Tardy 1997). Corroboram com o fato a observação nas fotomicrografias de cristais com bordas digitadas e corroídas, além de fraturas com preenchimento de material ferruginoso.

No caso do vale do Rio Conceição, o N3 é caracterizado pela abundante formação de ferricretes

associados às fácies basais (com sedimentos mais grossos) ao longo de todo o vale (Barros & Magalhães Jr. 2012, 2019). De modo recorrente, tais ferricretes afloram no leito e nas margens do curso d'água atual, mostrando não ter ocorrido incisão fluvial no substrato rochoso após a formação do N3.

As fotomicrografias obtidas para análise do ferricrete associado ao N3 (Figura 7) mostram que a amostra coletada no contato com a lâmina d'água

(MC1) apresenta distribuição relativa quitoquítônica (partículas maiores envolvidas por material mais fino), cujos materiais grossos são constituídos por fragmentos de itabirito alterado, mas com bandamento evidente. Há ainda a ocorrência de grãos de quartzo (areia grossa) angulosos a subarredondados, cimentados entre si por um material fino de composição ferruginosa, de cor vermelho escuro e que ocorre na forma de revestimentos dos grãos, com poros cavitários grandes e regulares.

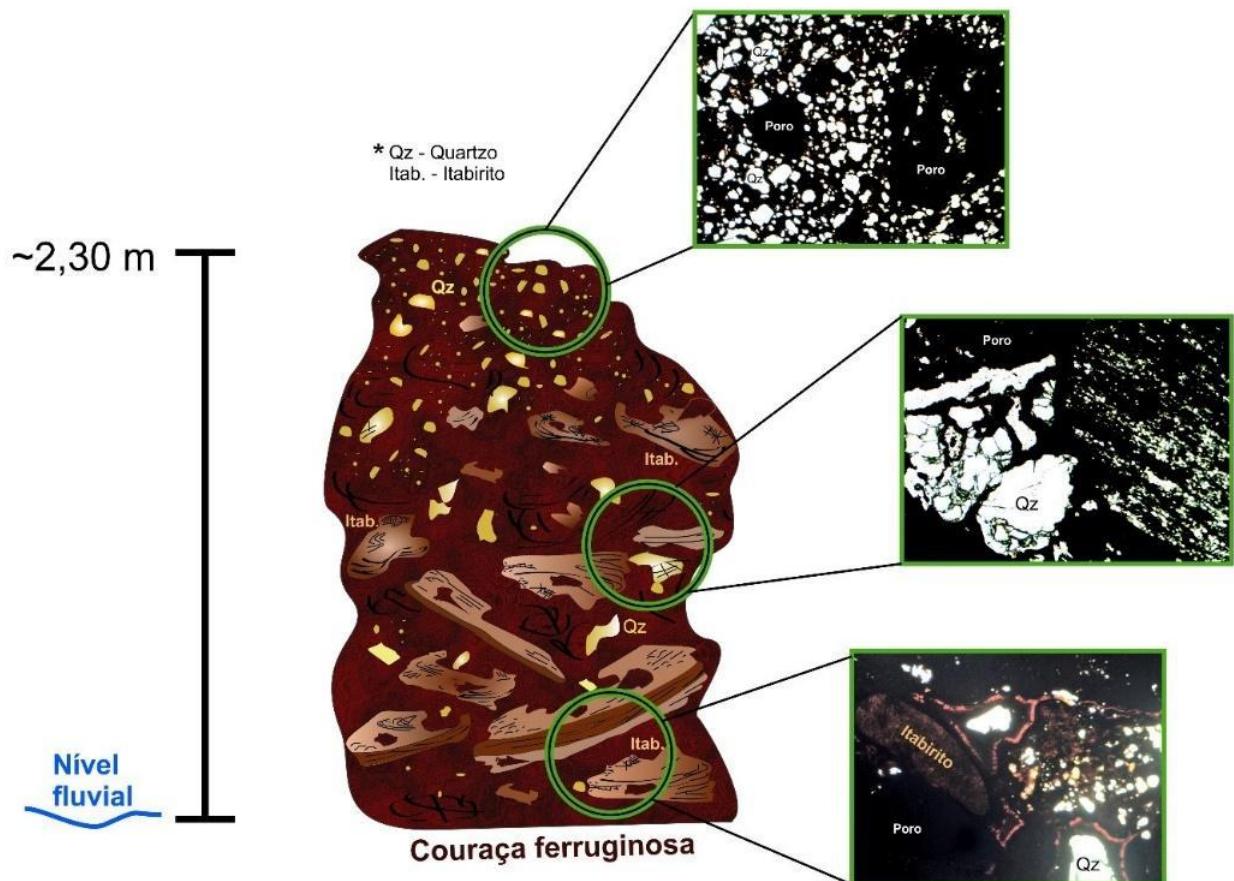


Figura 7: Aspecto micromorfológico das amostras coletadas em ferricrete associado ao N3 do vale do Rio Conceição.

A amostra intermediária (MC2) apresenta distribuição quito-porfírica com os mesmos constituintes grossos encontrados na base do ferricrete, mas com redução da participação do itabirito e aumento do quartzo. A micromassa apresenta, neste caso, características de preenchimento e revestimento, com poros cavitários médios a pequenos.

Já a amostra coletada no topo (MC3) apresenta distribuição relativa porfírica (as partículas grossas se distribuem numa matriz de material mais fino) com composição de material grosso distinta das outras amostras coletadas. Na porção superior do ferricrete há uma menor participação do itabirito e maior participação de quartzo (angular e fraturado). A micromassa apresenta características de preenchimento, com fábrica birrefringente indiferenciada (opaca – ausência de cores de interferência) de composição ferruginosa.

Nesse sentido, além das diferenças compostionais e estruturais herdadas dos processos de sedimentação aluvial, com marcante granodescrescência ascendente, a análise microscópica revela maiores níveis de transformação e degradação do cimento ferruginoso quanto maior a proximidade do nível d'água. Assim, os ferricretes do N3 não mostram sinais de estarem em formação nas condições atuais, mas sim que passam por lenta degradação, sobretudo sob influência da lâmina d'água, tendo em vista o aumento do tamanho e regularidade dos poros na micromassa (cimento) com a proximidade do nível d'água.

Dessa forma, no vale do Ribeirão do Mango e no vale do Rio Conceição, as amostras de ferricrete em ambiente fluvial sujeito à influência da lâmina d'água atual mostram sinais de transformação e degradação dos materiais e não de que estão em formação. Entretanto, no vale do Ribeirão do Mango, as a

amostras foram coletadas no leito, ou seja, em ambiente permanentemente afetado pela água, enquanto no vale do Rio Conceição as amostras foram coletadas na margem do curso d'água, onde a influência da água é menor e flutua sazonalmente. Por isso, o ferricrete do vale do Ribeirão do Mango se mostra mais transformado.

Em tese, trabalhos realizados nos vales dos rios Conceição e das Velhas indicam um pH geralmente

neutro para as águas superficiais, podendo variar entre 6,44 e 8,07 no primeiro (Parra et al., 2007) e entre 6,9 e 7,2 no segundo (Jardim, 2011), sendo insuficientes para a solubilização do Fe. Entretanto, em função da estabilização de barras arenosas no leito junto aos ferricretes (Figura 8), localmente, o desenvolvimento da vegetação pode contribuir com substâncias ácidas, alterando pontualmente o pH e permitindo a solubilização de pequenas quantidades de Fe e a transformação do cimento.



Figura 8: A – ferricretes no leito do Ribeirão do Mango; B – detalhe de barra de pontal vegetada associada ao ferricrete.

4.2 Datações por LOE

Os resultados das datações de sedimentos por LOE são mostrados na Tabela 2. No caso do N3 do Rio Conceição, a idade obtida ($2,6 \pm 0,25$ mil anos) é significativamente inferior à anteriormente obtida por Barros e Magalhães Jr. (2019) para outro depósito associado ao N3, o qual foi datado em $27,5 \pm 4,3$ mil anos. Conforme o laboratório responsável, a taxa de dose anual é praticamente a mesma para as duas amostras do N3, em torno de 1.200 ± 10 Gy/ano, o que confirma serem materiais de uma mesma região com a

Tabela 2: Nível deposicional, taxa de dose anual, dose equivalente, taxa de radiação cósmica, conteúdo de água, profundidade da coleta e idade obtidas para as amostras.

Amostra	Taxa de Dose Anual (μ Gy/ano)	Dose Equivalente (Gy)	Taxa de Radiação Cósmica (μ Gy/ano)	Conteúdo de água (%)	Profundidade da coleta (m)	Idade (anos)
DC1	1.205 ± 80	3,2	251 ± 25	8,1	1,5	2.635 ± 250
DC2	910 ± 80	0,6	257 ± 26	3,7	1,2	625 ± 65

Nesse sentido, entende-se que o novo resultado reforça que o Rio Conceição permaneceu por longo período em sua posição associada ao N3. Uma possibilidade a ser considerada é a de que, em alguns trechos, após a formação dos ferricretes a ele associados, em razão da resistência do material no leito, o curso d'água tenha transferido sua energia para as margens, fazendo com que as fácies sedimentares com materiais mais finos e não cimentadas por ferro fossem removidas em alguns locais e substituídas por

mesma composição. As curvas de decaimento são bem definidas e a curva de calibração é excelente, não havendo saturação do sinal de LOE. A diferença encontra-se, portanto, na intensidade da LOE medida, pois a intensidade da amostra analisada por Barros e Magalhães Jr. (2019) é bem maior que na amostra analisada neste trabalho (~35 Gy e ~3 Gy, respectivamente), confirmando ser a amostra deste trabalho mais jovem, ou seja, exposta a menos tempo à radiação ambiental.

sedimentos mais jovens. Trata-se, portanto, de um processo típico de leitos encouraçados (Xu, 1996; Vericat et al., 2006), conforme já reportado em trabalhos anteriores na região (Magalhães Jr. et al. 2008; Raposo et al. 2008, 2009; Barros 2010; Cota et al. 2022). Em outros trechos, no entanto, essa mobilidade lateral seria menor, permitindo a preservação de fácies superiores mais antigas.

Por sua vez, o N2 não apresenta ferricretes bem desenvolvidos. Neste nível deposicional são

encontrados apenas, ocasionalmente, fragmentos de ferricretes, provavelmente relacionados ao nível anterior (Barros & Magalhães Jr. 2012). Localmente, no depósito amostrado para datação dos sedimentos por LOE, ocorrem alguns níveis com pequenas acumulações de oxi-hidróxidos de ferro. Entretanto, essas acumulações são insuficientes para a cimentação dos sedimentos aluviais, não tendo permitido a coleta de amostras indeformadas (Figura 9).

A idade obtida para o N2 neste trabalho (625 ± 65 anos, Tabela 2) é compatível com a idade anteriormente obtida por Barros e Magalhães Jr. (2019) para outro depósito associado ao mesmo nível, o qual foi datado em 1.900 ± 300 anos. A idade também é compatível com outros depósitos de planícies de inundação de outros vales na região, os quais apresentam uma idade média de 1.100 anos (Barros & Magalhães Jr. 2020). A

formação dessas planícies está provavelmente ligada à instalação das condições climáticas atuais, que levaram à expansão do bioma Mata Atlântica, sobretudo na porção leste do QF (Barros & Magalhães Jr. 2020).

Acredita-se que em períodos mais úmidos como o atual, a proteção das encostas pela vegetação iniba a formação de espessos aluviões grossos nos fundos de vale e uma maior flutuação do nível freático (Barros et al. 2016a). Ademais, em tese, nos períodos mais frios do último período glacial haveria menor decomposição da matéria orgânica nos solos e formações superficiais. Assim, mesmo em períodos relativamente mais secos, a água que infiltra e percola esses materiais seria enriquecida em substâncias orgânicas ácidas, possibilitando maior solubilização do Fe, aumentando sua presença nas águas superficiais e subterrâneas e, assim, alimentando o processo de formação dos ferricretes.



Figura 9: Sucessão deposicional de planície de inundação do Rio Conceição (A) e níveis de acumulação de ferro (B), descontínuos e quebradiços.

5. Considerações finais

Levantamentos anteriores mostraram a ocorrência regional de ferricretes associados a sedimentos aluviais pleistocênicos no QF, especialmente na bacia do Rio Conceição, onde elas foram cicличamente formadas, podendo ser encontradas em diferentes níveis deposicionais fluviais. Análises micromorfológicas, mineralógicas e de difração de raios-X mostram que esses materiais são formados pela precipitação de oxi-hidróxidos de Fe via oscilação do nível freático. Eles apresentam, portanto, uma fonte alóctone para o Fe que compõe o cimento e, por isso, são conceitualmente melhor enquadrados como ferricretes.

Esses estudos anteriores também apontam que os ferricretes podem ter retardado a dissecação fluvial em alguns vales do QF e que elas não se formam nas condições ambientais atuais. Os resultados obtidos para o vale do Rio Conceição neste trabalho confirmam essas hipóteses. Verificou-se que houve um longo tempo de acumulação no nível deposicional com ferricretes ainda encontrado como terraço no fundo do vale (N3), em contraste com uma planície de inundação (N2) embutida, muito jovem e sem ferricretes. As

idades obtidas por LOE apontam para um período de acumulação aproximado entre $27,5 \pm 4,3$ mil anos e $2,6 \pm 0,25$ mil anos, o que reforça a estabilidade vertical do curso d'água e a possibilidade da ocorrência de processos de erosão lateral associados ao encorajamento de leito fluvial. As diferenças em termos de preservação do ferricrete no N3 em relação ao nível d'água no vale do Rio Conceição e a identificação de uma nova microestrutura de ferricrete no vale do Ribeirão do Mango, constatadas na análise micromorfológica, mostram que esses materiais não estão em construção, mas sim em lenta transformação e degradação, embora sejam bastante resistentes tanto mecanicamente como quimicamente.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro (Projetos APQ-00511-21 e APQ-00695-17), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de produtividade em pesquisa e ao grupo de pesquisa RIVUS - Geomorfologia e Recursos Hídricos (UFMG).

Referências

- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São 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.
- ARAUJO, A.G.M.; NEVES, W.A.; PILÓ, L.B.; ATUI, J.P.V. Holocene dryness and human occupation in Brazil during the "Archaic Gap". *Quaternary Research*, v. 64, p. 298-307, 2005.
- BARROS, P. H. C. A. Processos de encorajamento de calhas fluviais: Panorama teórico-conceitual e o exemplo do Rio Conceição (Quadrilátero Ferrífero-MG). 2010. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- BARROS, L. F. P. Implicações geomorfológicas e paleoambientais de registros sedimentares fluviais do Quadrilátero Ferrífero-Minas Gerais. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, 131p.
- BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JR., A. P. Eventos sedimentares e evolução morfodinâmica do vale do Rio Conceição - Quadrilátero Ferrífero/MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, p. 323-336, 2012.
- BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JR., A. P. MORFOGÊNESE NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO/MG NO QUATERNÁRIO SUPERIOR: processos fluviais e condicionantes paleoambientais na bacia do rio das Velhas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, p. 547-565, 2018.
- BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JR., A. P. O papel da bacia do Rio Doce na configuração geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero/MG. *Boletim de Geografia*, v. 37, p. 145-167, 2019.
- BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JR., A. P. Late quaternary landscape evolution in the Atlantic Plateau (Brazilian highlands): Tectonic and climatic implications of fluvial archives. *Earth-Science Reviews*, v. 207, p. 1-21, 2020.
- BARROS, L. F. P.; RAPOSO, A. A.; RAPOSO, A. A.; OLIVEIRA, L. A. F.; MAGALHÃES JR., A. P.; CHEREM, L. F. S. Análise Comparativa entre os Eventos Depositionais Fluviais Cenozoicos nos Vales do Rio Maracujá e Ribeirão do Mango - Quadrilátero Ferrífero/ MG. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 7, 2008, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Tec Art, 2008, v. 1, p. 270-280.
- BARROS, L. F. P.; LAVARINI, C.; LIMA, L.S.; MAGALHÃES JR., A. P. Síntese dos cenários paleobioclimáticos do Quaternário Tardio em Minas Gerais/sudeste do Brasil. *Sociedade & Natureza*, v. 23, p. 371-386, 2011.
- BARROS, L. F. P.; COE, H. H. G.; SEIXAS, A. P.; MAGALHÃES JR., A. P.; MACARIO, K. C. D. Paleobiogeoclimatic scenarios of the Late Quaternary inferred from fluvial deposits of the Quadrilátero Ferrífero (Southeastern Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 67, p. 71-88, 2016a.
- BARROS, L. F. P.; OLIVEIRA, F.S.; MAGALHÃES JR., A. P. Implicações geomorfológicas de couraças em níveis fluviais pleistocênicos no Quadrilátero Ferrífero/MG. In: XI Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2016, Maringá. 11° SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA - Geomorfologia: Compartimentação de Paisagens, Processos e Dinâmicas, 2016b.
- BEHLING, H.; LICHTE, M. Evidence of dry and cold climatic conditions at glacial times in tropical southeastern Brazil. *Quaternary Research*, v. 48, p. 348-358, 1997.
- BOURMAN, R.P.; BUCKMAN, S.; CHIVAS, A.R.; OLLIER, C.D.; PRICE, D.M. Ferricretes at Burringurrah (Mount Augustus), Western Australia: Proof of lateral derivation. *Geomorphology*, 354, 107017, 2020.
- BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification (Monograph 5). Min. Soc., London, 495 p., 1980.
- CARVALHO FILHO, A.; CURI, N.; SHINZATO, E. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(8), 903-916, 2010.
- COTA, G. E. M.; HENRIQUES, R. J.; MAGALHÃES JR., A. P. Processos de encorajamento de leitos fluviais (bed armouring) na perspectiva geomorfológica: o caso do rio Conceição - Quadrilátero Ferrífero/MG. *RA'EGA*, v. 53, p. 95-115, 2022.
- DELVIGNE, J. E. *Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering*. 3rd ed. Canadian Mineralogist Special Publication. 509 pp, 1998.
- FIGUEIREDO FILHO, W. F. A.; OLIVEIRA, F. S.; BARROS, L. F. P.; MACHADO, H. A.; MAGALHÃES JR., A. P. O papel da dinâmica do relevo na evolução de couraças no vale do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero – MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 1, p. 201-216, 2019.
- GOMES, M.O.S.; RODRIGUES, M.F.; DELICIO, M.P. Evolução paleoclimática e paleoecológica da bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto (MG), com base na microflora. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 21, Belém. Anais... Belém, p. 37, 2009.
- GOUDIE, A. *Duricrust in tropical and Subtropical Landscapes*. Oxford: Clarendon Press, 1973, 174p.
- JARDIM, B.F.M. 2011. Variação dos parâmetros físicos e químicos das águas superficiais da bacia do Rio das Velhas-MG e sua associação com as florações de cianobactérias. 126 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- MACHADO, H. A.; OLIVEIRA, F. S.; OLIVEIRA, C. V. Gênese e inserção na paisagem das couraças ferruginosas (cangas) no Maciço da Pedra Rachada, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 1, p. 79-102, 2021.
- MAGALHÃES JR., A. P.; SANTOS, G. B.; CHEREM, L. F. S. Processos de Encorajamento da Calha do Alto Rio das Velhas e seus Reflexos na Dinâmica Fluvial Moderna, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 7, 2008, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Tec Art, 2008. v. 1. p. 120-130.
- McFARLANE, M.J. *Laterite and Landscape*. London: Academic Press, 1976, 151 p.
- MEDINA, A. I.; DANTAS, M. E.; SAADI, A. Geomorfologia. In: PROJETO APA SUL RMBH -Estudos do Meio Físico. v. 6. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005. 45 p.
- MONTEIRO, H.S.; VASCONCELOS, P.M.; FARLEY, K.A.; SPIER, C.A.; MELLO, C.L. (U-Th/He geochronology of goethite and the origin and evolution of cangas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 131, 267-289, 2014.
- MILAGRES, A. R.; OLIVEIRA, F. S.; VARAJÃO, A. F. D. C.; VARAJÃO, C. A. C.; MEDEIROS, E. B.; RAMANAIDOU, E. R. Lithological control on the formation of ferruginous duricrusts in the Espinhaço Range (Minas Gerais, Brazil). *Catena*, 231, 107374, 2023.
- NAHON, D.B. Evolution of iron crusts in tropical landscapes. In: S.M. Colman & D.P. Dethier (Eds), *Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals*. Academic Press, New York, 1986, p. 169-191.
- NAHON, D.B. Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. John Wiley & Sons, New York, 313 pp, 1991.
- OLLIER, C. D.; GALLOWAY, R. W. The laterite profile, ferricrete and unconformity. *Catena*, 17(2), 97-109, 1990.
- PARIZZI, M.G.; SALGADO-LABOURIAU, M.L.; KHOLER, H.C. Genesis and environmental history of Lagoa Santa, southeastern Brazil. *The Holocene*, v. 8, p. 311-321, 1998.
- PARRA, R.R.; ROESER, H.M.P.; LEITE, M.G.P.; NALINI JR., H.A.; GUIMARÃES, A.T.A.; PEREIRA, J.C.; FRIESE, K. Influência antrópica na geoquímica de água e sedimentos do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Brasil. *Geochimica Brasiliensis*, v. 21, n. 1, 036-049, 2007.
- RAMANAIDOU, E. R. Genesis of lateritic iron ore from banded iron-formation in the Capanema mine (Minas Gerais, Brazil). *Australian Journal Earth Science*, v.56, p.605-620, 2009.
- RAPOSO, A. A.; OLIVEIRA, L. F.; MAGALHÃES JR., A. P.; CHEREM, L. F. S. Níveis e sequências deposicionais do vale do Ribeirão do Mango, Quadrilátero Ferrífero/MG. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 7, 2008, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Tec Art, 2008. v. 1. p. 110-120.
- RAPOSO, A. A.; BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JR., A. P. Pressões humanas e impactos na dinâmica erosivo-deposicional do Alto Rio das Velhas: análise comparativa entre as bacias do Rio Maracujá e Ribeirão do Mango. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, Campo Grande, 2009. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2009. v. 1. p. 106-125.

- SALGADO, A. A. R.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; VARAJÃO, A. F. D.; NALINI JUNIOR, H. A. Relief evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) by means of (^{10}Be) cosmogenic nuclei. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 52, n. 3, p. 317-323, 2008.
- SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA – SEA. *Atlas de zoneamento agroclimático do Estado de Minas Gerais*, 1980.
- SPIER, C. A., VASCONCELOS, P. M., OLIVIERA, S. M. B. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the evolution of lateritic iron deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Chemical Geology*, v. 234, n. 1-2, p. 79-104, 2006.
- STOOPS, G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. *Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin*, 184 p, 2003.
- TANNER, L.H., KHALIFA, M.A. Origin of ferricretes in fluvial-marine deposits of the Lower Cenomanian Bahariya Formation, Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 56, 179-189, 2010.
- TARDY, Y. *Petrology of Laterites and Tropical Soils*. Masson, S.A. Éditeurs, Balkema Publishers, Paris. 408p. 1997.
- UHLEIN, A., NOCE, C.A. Quadrilátero Ferrífero. In: CARNEIRO, C. D. R. R., HASUI, Y., BARTORELLI, A. (Org.). *Geologia do Brasil. 1ª ed. São Paulo: Beca*, v. 1, p. 228-235, 2012.
- VERICAT, D.; BATALLA, R. J.; GARCIA, C. Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: The lower Ebro. *Geomorphology*, v. 76, p. 122-136, 2006.
- XU, J. Underlying gravel layers in large sand bed river and their influence on downstream-dam channel adjustment. *Geomorphology*, v. 17, p. 351-359, 1996.

¹Recebido 31 de julho de 2023
Aceito 06 de setembro de 2023