

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 25/03/2025.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

**Estudos geoquímico e geocronológico aplicados em lateritas ferruginosas
endurecidas dos setores de Cuesta e Depressão Periférica Paulista**

EVERTON TIAGO SULATO

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

EVERTON TIAGO SULATO

**ESTUDOS GEOQUÍMICO E GEOCRONOLÓGICO
APLICADOS EM LATERITAS FERRUGINOSAS
ENDURECIDAS DOS SETORES DE CUESTA E
DEPRESSÃO PERIFÉRICA PAULISTA**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen

Rio Claro - SP
2024

S949e Sulato, Everton Tiago
Estudos geoquímico e geocronológico aplicados em lateritas
ferruginosas endurecidas dos setores de Cuesta e Depressão
Periférica Paulista / Everton Tiago Sulato. -- Rio Claro, 2024
139 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientadora: Vania Silvia Rosolen

1. Geoquímica. 2. Geocronologia. 3. Isótopos. 4.
Óxi-hidróxido de ferro. 5. Paleoambiente. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa contribui para os ODS 13 e 15, relacionados às mudanças climáticas e à preservação da vida terrestre, respectivamente, ao agregar dados que ampliam a compreensão sobre o paleoclima da região estudada. Esses resultados subsidiam o estudo das mudanças climáticas, utilizando crostas lateríticas como indicadores, além de endossar a importância do uso sustentável e do combate à desertificação.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The research contributes to SDGs 13 and 15, related to climate change and terrestrial life preservation, respectively, by providing data that subsidize the understanding of the region's paleoclimate. This information supports climate change understanding using lateritic duricrusts as indicators and reinforces the importance of sustainable land use and combating desertification.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

EVERTON TIAGO SULATO

**ESTUDOS GEOQUÍMICO E GEOCRONOLÓGICO
APLICADOS EM LATERITAS FERRUGINOSAS
ENDURECIDAS DOS SETORES DE CUESTA E
DEPRESSÃO PERIFÉRICA PAULISTA**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. VANIA SILVIA ROSOLEN
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Profa. Dra. MARGARETH SUGANO NAVARRO
IG/UNICAMP/Campinas (SP)

Profa. Dra. ADRIANA MARIA COIMBRA HORBE
IGD/UnB/Brasília (DF)

Dr. MITSURU ARAI
UNESPetro/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. GUILHERME TAITSON BUENO
IESA/UFG/Goiânia (GO)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 25 de setembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Peter Christian Hackspacher (*in memoriam*) pelo entusiasmo em iniciar este estudo e conhecimento transmitido em vida.

À Prof^a. Vania Rosolen pelo suporte, exemplo e conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento deste estudo.

Ao Prof. Danieli Pinti pelo acolhimento, exemplo e conhecimento compartilhado durante meu intercambio.

À banca examinadora pelas contribuições e dedicação na avaliação desta tese.

À UNESP, todos os amigos e funcionários do IGCE pelas experiências proporcionadas e estrutura disponibilizada.

À *Université du Québec à Montréal* (UQÀM), todos os amigos e funcionários pelo acolhimento e estrutura disponibilizada durante meu intercambio.

À Capes e CNPq, pelo apoio financeiro essencial para a realização deste estudo.

Ao programa *Emerging Leaders in America Program* (ELAP) pelo apoio financeiro que possibilitou meu período sanduíche.

Por fim, agradeço o apoio dos meus amigos e familiares.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Processo n 140763/2022-8).

RESUMO

O objetivo foi realizar um estudo geoquímico e geocronológico em perfis lateríticos da porção central do estado de São Paulo; a partir das idades (U-Th)/He; das concentrações de elementos terras raras (ETR), U, Th, razões dos isótopos de Pb; teores C_{total} e valores $\delta^{13}C$. As amostras foram submetidas a diversas técnicas analíticas, fornecendo elementos que subsidiam a interpretação dos processos de formação e evolução da paisagem, bem como o paleoambiente associado. As análises mostraram que os óxi-hidróxidos de Fe cimentam grãos de quartzo. Uma tendência diferenciou as amostras de lateritas ferruginosas endurecidas coletadas em baixa e alta elevação. Amostras de maior elevação, predominantemente hematita, indicam condições ambientais mais estáveis, enquanto as de baixa elevação, compostas por minerais menores e menos organizados, geralmente goethita, refletem ciclos ambientais menos estáveis. A diferenciação foi reforçada pela relação da razão hematita/goethita e a altitude dos pontos de coleta. As concentrações de ETR nas lateritas ferruginosas endurecidas foram menores em hematitas e maiores em goethitas e amostras em estágio de alteração. O fracionamento entre os ETR leves (ETRL) e pesados (ETRP) indicou predominância de ETRL sobre ETRP em todos os compartimentos estudados, sugerindo uma maior mobilidade e acumulação diferencial dos ETR para os solos, possivelmente associada a processos de intemperismo e alteração química dos materiais sedimentares. A variação nas razões isotópicas de Pb ($^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$) foram consistentes com valores da crosta continental superior e reforça uma origem comum entre os materiais analisados. Diferenças nas razões Th/U e U/Pb em lateritas ferruginosas endurecidas indicam idades distintas. A relação inversa de Pb com U e Th em amostras de média-alta altitude, sugere idades mais antigas. Os valores de $\delta^{13}C$ indicam a predominância de vegetação C4, típica de savanas, durante a formação das lateritas ferruginosas endurecidas, refletindo a transição vegetal e condições climáticas do Mioceno tardio. Variações de $\delta^{13}C$ entre solo e lateritas ferruginosas endurecidas refletem influências locais e possíveis transições de ambientes com plantas C3 para C4, além de possíveis impactos por intensificação do uso da terra com agricultura. Os valores $\delta^{13}C$ e C_{total} são condizentes com as condições ambientais de formação das lateritas ferruginosas endurecidas. As idades (U-Th)/He das lateritas ferruginosas endurecidas sugerem três eventos de formação: Mioceno (23-5,3 Ma), Plioceno (5,3-1,6 Ma) e Pleistoceno (<1,6

Ma). A cronologia das superfícies de aplainamento mostrou relação com a altimetria. Na Superfície Rio Claro, relativamente jovem, as idades foram <1 Ma, correspondentes ao Pleistoceno. Na Superfície Urucaia, as idades variaram de 20 ± 2 Ma a <1 Ma, abrangendo o Mioceno e o Pleistoceno. Na Superfície Cuesta, mais elevada, as idades variaram de 18 ± 2 Ma a 3 ± 1 Ma, abarcando o Mioceno e Plioceno. Esses resultados são consistentes com a literatura, que correlaciona a altimetria à idade de formação. No entanto, a complexidade dos eventos tectônicos e climáticos ao longo do tempo acarretou uma sobreposição de idades, refletindo a formação de laterita ferruginosa endurecida em diferentes períodos, evidenciada pelas idades do Mioceno na superfície Urucaia e idades do Plioceno encontradas na superfície de Cuesta.

Palavras-chave: (U-Th)/He; elementos terras raras; razão isotópica de Pb; $\delta^{13}\text{C}$; crosta laterítica.

ABSTRACT

The objective was to carry out a geochemical and geochronological study in lateritic profiles of the central portion of the State of São Paulo; based on (U-Th)/He ages; the concentrations of rare earth elements (REE), U, Th, Pb isotope ratios; C_{total} contents and $\delta^{13}\text{C}$ values. The samples were subjected to several analytical techniques, providing elements that support the interpretation of the processes of formation and evolution of the landscape, as well as the associated paleoenvironment. The analyses showed that the Fe oxyhydroxides cement quartz grains. A trend differentiated the samples of lateritic duricrust collected at low and high elevations. Samples from higher elevations, predominantly hematite, indicate more stable environmental conditions, while those from lower elevations, composed of smaller and less organized minerals, generally goethite, reflect less stable environmental cycles. The differentiation was reinforced by the relationship between the hematite/goethite ratio and the altitude of the sample sites. REE concentrations in lateritic duricrusts were lower in hematites and higher in goethites and samples in the alteration stage. Fractionation between light REE (LREE) and heavy (HREE) indicated a predominance of LREE over HREE in all studied compartments, suggesting greater mobility and differential accumulation of REE in the soils, possibly related to weathering processes and chemical alteration of the sedimentary materials. Variations in Pb isotopic ratios ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) were consistent with values from the upper continental crust and reinforce a common origin of the studied materials. Differences in Th/U and U/Pb ratios in lateritic duricrusts indicate different ages. The inverse relationship of Pb with U and Th in mid- to high-altitude samples suggests older ages. The $\delta^{13}\text{C}$ values indicate the predominance of C4 vegetation, typical of savannas, during the formation of the lateritic duricrusts, reflecting the vegetation transition and climatic conditions of the late Miocene. Variations in $\delta^{13}\text{C}$ between soil and lateritic duricrusts reflect local influences and possible transitions from environments with C3 to C4 vegetation, in addition to possible effects of land use intensification with agriculture. The $\delta^{13}\text{C}$ and C_{total} values are consistent with the environmental conditions of formation of the lateritic duricrusts. The ages (U-Th)/He of the lateritic duricrusts suggest three formation events: Miocene (23-5.3 Ma), Pliocene (5.3-1.6 Ma) and Pleistocene (<1.6 Ma). The chronology of the planation surfaces showed a relationship with the altimetry. On the relatively young Rio Claro Surface, ages were <1 Ma, corresponding to the Pleistocene. On the Urucaia

Surface, ages ranged from 20 ± 2 Ma to <1 Ma, spanning the Miocene and Pleistocene. On the higher Cuesta Surface, ages ranged from 18 ± 2 Ma to 3 ± 1 Ma, spanning the Miocene and Pliocene. These results are consistent with the literature, which correlates altimetry with age of formation. However, the complexity of tectonic and climatic events over time resulted in an overlap of ages, reflecting the formation of lateritic duricrusts in different periods, as evidenced by the Miocene ages on the Urucaia Surface and Pliocene ages found on the Cuesta Surface.

Keywords: (U-Th)/He; rare earth elements; Pb isotope ratio; $\delta^{13}\text{C}$; lateritic duricrust.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do relevo da área de estudo, destacando a superfície de cimeira, correspondente ao nível de aplainamento do topo da cuesta (950-1000 m), bem como as superfícies Interplanáltica Urucaia (690-720 m) e Rio Claro (600-630 m).....	23
Figura 2 – Mapa dos compartimentos de relevo da área de estudo.....	32
Figura 3 – Mapa hipsométrico e perfis de elevação dos compartimentos de coleta das amostras.....	33
Figura 4 – Ponto de coleta P01.....	35
Figura 5 – Ponto de coleta P02.....	36
Figura 6 – Ponto de coleta P03 e P04.....	38
Figura 7 – Ponto de coleta P05.....	39
Figura 8 – Ponto de coleta P06.....	40
Figura 9 – Ponto de coleta P07.....	41
Figura 10 – Ponto de coleta P08.....	42
Figura 11 – Ponto de coleta P09.....	43
Figura 12 – Ponto de coleta P10.....	44
Figura 13 – Ponto de coleta P11.....	45
Figura 14 – Ponto de coleta P12.....	46
Figura 15 – Laboratório de Gases Nobres, HELIX-MC Plus, linha de extração e purificação.....	56
Figura 16 – Exemplo de óxi-hidróxidos de Fe cimentando grãos de quartzo herdados da rocha e composição semiquantitativa por EDS-MEV.....	59
Figura 17 – Caracterização das amostras por MEV.....	61
Figura 18 – Exemplo de laterita ferruginosa endurecida com matriz mista em hematita botrioidal e reniforme e composição semiquantitativa por EDS-MEV.....	62
Figura 19 – Caracterização mineralógica das amostras de laterita ferruginosa endurecida por DRX.....	66
Figura 20 – Diagrama ternário das concentrações de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ por FRX (%), segundo a classificação de Schellmann (1993).....	68
Figura 21 – Avaliação da potência do laser empregando dois ciclos de 100 s, com 1 e 3,2% da sua capacidade (0,155 e 0,496 mW, respectivamente).....	70
Figura 22 – Espectro Raman das amostras de lateritas ferruginosas endurecidas	72
Figura 23 – Matriz de correlação de Spearman de ETR e minerais abundantes em lateritas ferruginosas endurecidas.....	77
Figura 24 – PCA da composição mineralógica e ETR nas lateritas ferruginosas endurecidas.....	79
Figura 25 – ETR em lateritas ferruginosas endurecidas, solo e material parental, normalizados pelo condrito e crosta superior (UCC) de Taylor & McLennan (1985) e pelo material parental.....	86
Figura 26 – Razões médias (n = 2 digestões) de ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb e ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb para lateritas ferruginosas endurecidas, solos, material parental e valores reportados para a crosta continental superior (UCC).....	96

Figura 27 – Razões médias (n = 2 digestões) de $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ para lateritas ferruginosas endurecidas, solos e material parental.....	97
Figura 28 – Pb, U e Th de lateritas ferruginosas e solos relativos, normalizados pelas respectivas unidades parentais.....	99
Figura 29 – Valores obtidos de $\delta^{13}\text{C}$ em lateritas ferruginosas endurecidas e valores da literatura para C3 (floresta), C4 (gramíneas) e solos ferralíticos tropicais conforme Desjardins et al. (1991).....	109
Figura 30 – Concentração de U (mg kg^{-1}) e idade (U-Th)/He (Ma), em múltiplos fragmentos de laterita ferruginosa endurecida submetidas a 900°C por 6 mim (01) e submetidas a 900°C por 12 mim (02).....	114
Figura 31 – Elevação (m) e idade (U-Th)/He (Ma), em múltiplos fragmentos de laterita ferruginosa endurecida submetidas a 900°C por 6 mim (01) e submetidas a 900°C por 12 mim (02).....	115
Figura 32 – Razão Th/U e idade (U-Th)/He (Ma), em múltiplos fragmentos de laterita ferruginosa endurecida submetidas a 900°C por 6 mim (01) e submetidas a 900°C por 12 mim (02).....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição dos pontos de coleta na área de estudo. Informações dos municípios, latitude, longitude, altitude, material parental e superfície correspondente.....	34
Tabela 2 – Concentração de óxidos em lateritas ferruginosas endurecidas por FRX (% peso).....	63
Tabela 3 – Mineralogia e substituições calculadas a partir do método de DRX/Rietveld (% peso para mineralogia, fração molar para as substituições).....	64
Tabela 4 – Índice de Laterização (IOL) e Índice de Alteração Química (IAQ) em amostras laterítica ferruginosa endurecida.....	67
Tabela 5 – Limite de Detecção (LD) e Limite de Quantificação (LQ), valores obtidos (média $\pm$ desvio padrão; mg kg^{-1}), valores de referência $\pm$ incerteza (mg kg^{-1}) e recuperação média (%) de ETR em padrões de referência BCR-2, BHVO-2 (USGS) (n = 4 digestões) e Mica-Fe (CRPG) (n = 1 digestão, análise em duplicata de diluição) em amostras digeridas, determinados por ICP-MS.....	74
Tabela 6 – Valores médios e desvio padrão (Média $\pm$ Desvio Padrão, n = 2 digestões - mg kg^{-1}) de ETRL (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu e Gd) e Sc e Σ ETRL em amostras de laterita ferruginosa endurecida, solo e material parental, determinados por ICP- MS.....	81
Tabela 7 – Valores médios e desvio padrão (Média $\pm$ Desvio Padrão, n = 2 digestões - mg kg^{-1}) de ETRP (Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu) e Σ ETRP em amostras de laterita ferruginosa endurecida, solo e material parental, determinados por ICP-MS.....	83
Tabela 8 – Fracionamento dos ETRL e ETRP (La/Yb) _N ; fracionamento dos ETRL (La/Sm) _N ; fracionamento dos ETRP (Gd/Yb) _N e Anomalias de Ce (Ce/Ce*) e Eu (Eu/Eu*) calculadas a partir das concentrações normalizadas pelo material parental.....	91
Tabela 9 – Valores obtidos (média $\pm$ desvio padrão; mg kg^{-1}), valores de referência $\pm$ incerteza (mg kg^{-1}) e recuperação média (%) de Pb, Th e U em padrões de referência BCR-2, BHV-2 (USGS) (n = 4 digestões) e Mica-Fe (CRPG) (n = 1 digestão, com análise em duplicata de diluição) em amostras digeridas, determinados por ICP-MS.....	92
Tabela 10 – Valores médios e desvio padrão (média $\pm$ desvio padrão - mg kg^{-1} , n = 2 digestões) de Pb, Th, U e razão Th/Pb, U/Pb e Th/U em amostras de laterita ferruginosa endurecida, solo e material parental, determinados por ICP-MS.....	101
Tabela 11 – Razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (média $\pm$ desvio padrão, n = 2 digestões) em amostras de laterita ferruginosa endurecida, solo e material parental, determinados por ICP-MS.....	103
Tabela 12 – Concentração de C _{total} (%) e valores $\delta^{13}\text{C}$ no material parental, laterita ferruginosa endurecida e solo.....	110
Tabela 13 – Concentração de ^4He (ccSTP/g), valores médios e desvio padrão (M $\pm$ DP; n = 2) e respectivo desvio padrão relativo (DPR; %) em fragmentos individuais de lateritas ferruginosas endurecidas.....	112
Tabela 14 – Concentração de ^4He (ccSTP/g), U e Th (mg kg^{-1}) e idade (U-Th)/He (Ma) e respectivos erros, em múltiplos fragmento de laterita ferruginosa endurecida e padrão de referência Durango calculados por diluição isotópica.....	116

Tabela 15 – Concentração de ^4He (ccSTP/g), U, Th, Sm (mg kg^{-1}), idade (U-Th)/He (Ma) e respectivos erros, em múltiplos fragmento de laterita ferruginosa endurecida e padrão de referência Durango calculados a partir da curva analítica.....117

Tabela 16 – Idades (U-Th)/He (média $\pm$ erro) de amostras de laterita ferruginosa endurecida, com informações sobre pontos de coleta, altimetria e superfícies associadas. As amostras mais jovens (P01 a P05) foram agrupadas como <1 Ma...119

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Lateritas e cronologia das lateritas.....	18
1.2 Eventos geológicos do setor de cuesta e Depressão Periférica Paulista.....	20
1.3 O relevo e a ocorrência das lateritas na Cuesta e Depressão Periférica.....	22
2 OBJETIVOS.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 A área de estudo e locais de coleta do material parental, laterita ferruginosa endurecida e solo.....	29
3.2 Coleta das amostras no campo.....	31
3.3 Procedimentos de laboratório.....	47
3.3.1 Caracterização mineralógica e cristalográfica das amostras de laterita ferruginosa endurecida.....	48
3.3.2 Determinação de ETR.....	49
3.3.3 Determinação de U, Th e isótopos de Pb.....	51
3.3.4 Datação (U-Th)/He.....	52
3.3.5 Determinação da concentração de C_{total} e valores $\delta^{13}C$	57
3.3.6 Determinação dos limites de detecção e quantificação.....	58
3.3.7 Análise estatística e interpretação dos resultados.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 Caracterização.....	59
4.1.1 Caracterização química por FRX e mineralógica por DRX.....	62
4.1.2 Caracterização Mineralógica de Fragmentos por Espectroscopia Raman.....	69
4.2 ETR por ICP-MS.....	72
4.3 U, Th e isótopos de Pb por ICP-MS.....	92
4.4 Avaliação do teor de C_{total} e da natureza do carbono orgânico $\delta^{13}C$ das lateritas ferruginosas endurecidas, solos e material parental.....	105

4.5 Idade (U-Th)/He.....	111
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123
REFERÊNCIAS.....	125

1. INTRODUÇÃO

As composições químicas e isotópicas de minerais de baixa temperatura formados em perfis de intemperismo podem ser utilizadas para reconstituir as condições ambientais passadas no momento da precipitação mineral (MONTEIRO *et al.*, 2018). Os minerais secundários, produzidos por processos de transferência de massa e energia no ambiente próximo da superfície, podem ser preservados no registro geológico por dezenas de milhões de anos (VASCONCELOS *et al.*, 1994a, b; SHUSTER *et al.*, 2005). Além de informações sobre as condições paleoambientais, a história destes minerais supergênicos permitem determinar o tempo e a taxa dos processos que moldaram a superfície terrestre. A recuperação das informações de minerais supergênicos requer a combinação de mineralogia detalhada, geocronologia exata e precisa com investigação de altas escalas de resolução temporal e espacial, além da análise de modelos geológicos e geomorfológicos de evolução da superfície a ser estudada.

A hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) e a goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) têm sido reportadas como produtos mais comuns do intemperismo de minerais que contêm Fe, estando em evidência em estudos da geocronologia devido à sua abundância e relativa estabilidade em ambiente superficial. Vários estudos procuraram estabelecer a relação genética e cronológica entre as paleossuperfícies e as coberturas lateríticas como forma de interpretar a história da dinâmica das paisagens (TARDY & ROQUIN, 1998, BIGARELLA, 2003). Estudos recentes vêm buscando interpretar e reconstruir a história geológica destas paisagens usando métodos geocronológicos como o $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, (U-Th)/He e datação da caulinita através de técnicas como a espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) e paleomagnetismo (THÉVENIAUT & FREYSSINET, 2002; PIDGEON *et al.*, 2004; SHUSTER *et al.*, 2005; HEIM *et al.*, 2006; YAPP & SHUSTER 2011, SHUSTER *et al.*, 2012; FARLEY & FLOWERS, 2012; DANIŠÍK *et al.*, 2013; VASCONCELOS *et al.*, 2013; MONTEIRO *et al.*, 2014; REINERS *et al.*, 2014; RIFFEL *et al.*, 2015, 2016; DENG *et al.*, 2017; GARCIA *et al.*, 2017; HOFMANN *et al.*, 2017; ALLARD *et al.*, 2018; MONTEIRO *et al.*, 2018; WELLS *et al.*, 2019; ALBUQUERQUE *et al.*, 2020; HOFMANN *et al.*, 2020; ANSART *et al.*, 2022; GAUTHERON *et al.*, 2022; HELLER *et al.*, 2022; MONTEIRO *et al.*, 2022; de CAMPOS *et al.*, 2023; Marques *et al.*, 2023; GÜLYÜZ *et al.*, 2024).

Processos geológicos são responsáveis pela geração da crosta continental. Agentes do intemperismo, erosão, transporte e deposição modelam a superfície exposta da crosta. A variação da composição da crosta está relacionada com muitos fatores. Os processos geoquímicos de solubilidade e remoção de elementos e o balanço de proporção de massa das rochas geradoras são os principais fatores que influenciam na distribuição dos elementos na crosta continental (TAYLOR & MCLENNAN, 1985).

Elementos de terras raras (ETR) compreendem um grupo de dezessete elementos químicos da tabela periódica. Este grupo inclui os quinze lantanídeos, junto com Y e Sc, conforme classificados pela *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC). A compreensão da dinâmica de mobilização e distribuição desses elementos terras raras (ETR), contribuem para a interpretação da evolução das paisagens e o entendimento das interações entre as condições climáticas e os processos geológicos através da compreensão dos ciclos geoquímicos nos perfis de intemperismo (NGON *et al.*, 2016; GEBRU *et al.*, 2020; DENYS *et al.*, 2021; HORBE *et al.*, 2021; MILAGRES *et al.*, 2023). O enriquecimento de ETR em lateritas ocorre devido à remoção de elementos móveis das rochas originais, favorecida por climas quentes e úmidos ao longo de extensos períodos geológicos (KYNICKY *et al.*, 2012). As maiores concentrações de ETR estão ligadas a rochas cristalinas do embasamento (BRAUN *et al.*, 1990), sendo o fracionamento desses elementos resultado do intemperismo, e não do processo de deposição sedimentar (RANDIVE *et al.*, 2014).

A análise dos isótopos de Pb tem sido empregada na identificação e caracterização das fontes deste elemento, permitindo estabelecer relação com o material parental e variações em perfis de intemperismo (PENG *et al.*, 2014; KŘÍBEK *et al.*, 2016; HORBE *et al.*, 2021). As assinaturas isotópicas do Pb podem fornecer informações para rastrear a origem desse elemento, permitindo a identificação de suas fontes geradoras (KŘÍBEK *et al.*, 2016; HORBE *et al.*, 2021). O ^{204}Pb não é proveniente de decaimento radioativo, e sua abundância é constante no sistema terrestre. Por sua vez, o aumento da concentração dos isótopos de ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb resulta do decaimento radioativo dos isótopos de ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , respectivamente (BAKER *et al.*, 2004; WEIS *et al.*, 2006). As assinaturas isotópicas são determinadas através da relação entre as concentrações dos isótopos pais e filhos de cada elemento. As concentrações de U, Th, Pb, assim como as razões isotópicas de Pb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$), são

fundamentais para a identificação da origem e entendimento da evolução do material desde sua formação (DESEM *et al.*, 2022).

No contexto das paisagens tropicais, o carbono também desempenha um papel crucial na compreensão das condições paleoclimáticas e dos processos de formação mineral. A análise dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ referentes ao ciclo fotossintético dos diferentes tipos de plantas (C3, C4 e CAM) contribui para a interpretação das condições climáticas predominantes durante a formação dos perfis lateríticos (PESSENDA *et al.*, 1997; SCHIEBER, 2018; FRITZ & YAPP, 2018; GUIMARÃES *et al.*, 2023). Plantas C3 utilizam o ciclo de Calvin para fixar o CO₂ atmosférico. Por sua vez, plantas C4 (gramíneas), mais especializadas a climas quentes, utilizam um intermediário C4 para a fixação do CO₂ no ciclo conhecido como *Hatch-Slack*. Plantas do tipo CAM (do inglês, *Crassulacean acid metabolism*) possuem adaptações fisiológicas e anatômicas para climas áridos. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em plantas C3 variam de -24 a -32‰, em plantas C4 variam de -11 a -15‰ e plantas CAM, de -15 a -24‰ (SCHIEBER, 2018). A técnica baseada nos isótopos de carbono é amplamente utilizada por ser adequada em reconstituição paleoambiental que, por serem estáveis, a razão isotópica que não varia com o tempo (MARTINELLI *et al.*, 2009). Essa metodologia possibilita interpretar a origem da matéria orgânica preservada no solo (ou laterita ferruginosa endurecida, no caso desse estudo), discriminando plantas de ciclos fotossintéticos C3, C4 e CAM nas comunidades vegetais pretéritas (ORTIZ *et al.*, 2004).

A Depressão Periférica Paulista apresenta uma sequência de superfícies escalonadas que representam estágios distintos de evolução da paisagem (KING, 1956; ALMEIDA, 1964; PENTEADO, 1976). Sua interface com a cuesta basáltica exibe um relevo complexo e diversificado, influenciado pela interação entre os derrames basálticos, arenitos Botucatu e as formações Itaqueri e Marília. Nessa região, siltitos, folhelhos e arenitos variam em composição, muitas vezes apresentando endurecimento devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro ou sílica, resultando em uma paisagem marcada por relevos residuais e couraças ferruginosas (ALMEIDA *et al.*, 1981). A influência dos intensos ciclos de secas e chuvas no Quaternário desencadeou processos de lixiviação, contribuindo para a formação e preservação das crostas lateríticas, cruciais na manutenção desses relevos (RANZANI *et al.*, 1972). A busca pela compreensão da dinâmica das paisagens tem sido foco de vários estudos, que visam estabelecer a relação genética e cronológica entre as paleossuperfícies e as coberturas lateríticas (TARDY &

ROQUIN, 1998, BIGARELLA, 2003; VALADÃO, 2009). Neste contexto, o estudo das idades, caracterização e análise geoquímica, e a investigação das implicações paleoclimáticas são essenciais para interpretar a evolução de paisagens tropicais, moldadas por processos geológicos, variações climáticas e as interações complexas de intemperismo ao longo do tempo.

1.1 Lateritas e cronologia das lateritas

O estudo das lateritas e as correlações que explicam a idade e a evolução das paisagens ofereceram importantes resultados quando aplicado nas regiões tropicais úmidas, particularmente nos territórios brasileiro, africano e na Guiana (NAHON, 1976; GRANDIN & THIRY, 1983; TARDY & ROQUIN, 1992; CHARDON *et al.*, 2006 THÉVENIAUT & FREYSSENET, 2002). No Brasil, as lateritas ferruginosas ocupam as maiores extensões das paisagens do Cerrado e Amazônia (SOMBROEK & CAMARGO, 1983; TARDY *et al.*, 1988a). Desde o Neógeno, as condições de clima quente e úmido induziram a formação de crostas lateríticas endurecidas em áreas cratônicas estáveis, embora, sob muitos aspectos, sua gênese e evolução foram objeto de controvérsia, em particular a origem *in situ* ou alóctone dos materiais endurecidos em crostas contínuas ou na forma de “linhas de pedra” composto por fragmentos, concreções ou nódulos ferruginosos compondo os perfis lateríticos (BRAUCHER *et al.*, 1998). De forma geral, as lateritas ferruginosas são encontradas nas posições altas dos relevos aplainados, associadas com Latossolos (Oxisols) e apresentando diferentes níveis de preservação (HORBE & COSTA, 2005, ROSOLEN *et al.*, 2017).

A utilização das técnicas de datação absoluta por isótopos radiogênicos para determinar a idade de precipitação de minerais secundários (geocronologia do intemperismo) tem permitido a investigação das taxas e dos mecanismos de propagação da frente de intemperismo (VASCONCELOS, 1999). Trabalhos publicados por Carmo e Vasconcelos (2004) e Spier *et al.* (2006) têm apontado idades superiores a 60 Ma para perfis do Quadrilátero Ferrífero (QF). Monteiro *et al.* (2018) utilizando a datação por (U-Th)/He e isótopos cosmogênicos (^3He) em óxidos de ferro no QF, registraram idades de precipitação mineral em torno de 55 Ma e idades de exposição superiores a 5 Ma, mostrando que perfis lateríticos que cobrem paisagens do QF possuem uma longa história de exposição à superfície, associadas as

remanescentes de antigas paleosuperfícies erosivas. O método geocronológico mais utilizado para os estudos do intemperismo é baseado na técnica de datação $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em óxidos de Mn portadores de K (VASCONCELOS *et al.*, 2008). No entanto, a utilização de um método baseado em óxidos de Mn é inviabilizada em caso de escassez destes minerais no perfil laterítico. A hematita e a goethita tem sido reportada como produto mais comum do intemperismo de minerais que contêm Fe, estando em evidência em estudos da termocronologia, devido à sua abundância e relativa estabilidade no ambiente superficial (SHUSTER *et al.*, 2005).

Neste trabalho, laterita ferruginosa é definida como “materiais endurecidos constituintes dos solos, desenvolvidos nos horizontes superficiais ou profundos dos perfis de alteração do meio intertropical atual ou dos paleoambientes tropicais antigos. São constituídas por caulinita, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e quartzo residual” (TARDY, 1992). Na área de estudo, as acumulações ferruginosas apresentam-se endurecidas e descontínuas sob a forma de fragmentos de crosta e/ou nódulos e concreções (de acordo com o padrão de ocorrência apresentado por BOCQUIER *et al.*, 1984). As lateritas ferruginosas endurecidas são produtos de intensa alteração meteórica constituídas por uma associação mineral representada por goethita, hematita, gibbsita, caulinita e quartzo residual apresentando lixiviação de Ca, K, Na e Mg. O endurecimento (encouraçamento) é típico de climas tropicais com estações contrastadas em solos desenvolvidos a partir de rochas silicosas, aluminosas ou ferríferas (TARDY, 1992).

Em sua origem, os horizontes lateríticos endurecidos podem ser autóctones compondo um horizonte pedológico que em certa medida reflete uma litodependência em relação a composição química e mineralógica (minerais resistentes e elementos traços) ou alóctones resultante do transporte lateral de ferro e dos elementos que o acompanham ou transporte mecânico (TARDY, 1992). Segundo o autor, a litodependência é maior e mais evidente quando a couraça é pouco evoluída.

Seguindo essa concepção, Costa (1991) propõe o conceito de laterito maduro e imaturo para os materiais ferruginosos presentes em regiões amazônicas. Os lateritos maduros exibem feições policíclicas e ocupam menor extensão geográfica, restritos a regiões específicas dos relevos mais elevado sob a forma de platôs ou morros. Exibem cor marrom-avermelhada, sob a forma de rocha dura e densa, presente no topo dos perfis, formado por agregados de nódulos, concreções e esferólitos vermelhos de oxi-hidróxidos de ferro ligados por córtex microcristalino.

Quando em vias de intemperismo, são recobertos por latossolos areno-argilosos autóctones ou alóctones. Os lateritos imaturos correspondem a plintitos (horizonte argiloso mosqueado) e petroplintitos (horizonte ferruginoso concrecionário). Estão distribuídos por toda região Amazônica e formam o relevo jovem, de baixo grau de evolução caracterizado pela presença de um horizonte concrecionário ferruginoso na porção superior do perfil, de cor marrom-avermelhada, constituído por nódulos e concreções de oxi-hidróxidos de ferro em matriz argilosa a terrosa. O retrabalhamento desses materiais pelo intemperismo químico e físico e a formação de um novo horizonte composto por relíquias das formações pretéritas ocorreram no Mioceno e Pleistoceno (COSTA, 1991). Geralmente os fatores impulsionadores pelas mudanças da estrutura e posicionamento no relevo são as alterações do nível de base e do entalhamento da drenagem que estão associadas às condições climáticas ou tectônicas. Segundo Tardy & Roquin (1992), a história paleoclimática é o fator de maior relevância para a formação e destruição dos perfis e das paisagens lateríticas e o desencadeamento desses eventos torna complexo decifrar a distribuição e a cronologia da formação das lateritas ferruginosas.

1.2 Eventos geológicos do setor de cuesta e Depressão Periférica Paulista

Dois compartimentos geológicos-geomorfológicos caracterizam a área de estudo (seguindo a classificação de Almeida, 1964): o setor da Cuesta arenito-basáltica e a Depressão Periférica. O setor de cuesta (relevo cuestiforme no sentido E-W) é caracterizado como um relevo escarpado no limite com a Depressão Periférica, e constitui a superfície de cimeira. O "front" das escarpas arenito-basálticas (arenitos da Formação Botucatu e eruptivas básicas da Formação Serra Geral) se desdobram regionalmente em níveis escalonados entre 850 e 1000 m (PENTEADO, 1976). Sua origem está ligada às sucessivas reativações que geraram uma escarpa de falha posteriormente retrabalhada pela erosão pós-cretácea (AB'SABER, 1969).

No setor que corresponde a Depressão Periférica, uma faixa sedimentar paleozoica, deprimida pela atuação de processos erosivos, delimita a borda oriental da cuesta. Sua origem está associada a instalação da rede de drenagem e escavação dos sedimentos paleozoicos e mesozoicos seguidas às movimentações no Planalto Atlântico durante o Paleógeno, à erosão diferencial das camadas arenito-basálticas,

à instalação da rede de drenagem fortemente encaixadas nas litoestruturas com forte capacidade erosiva e à atuação dos processos morfodinâmicos dos mais variados contextos paleoclimáticos (ALMEIDA, 1964; FULFARO & BARCELOS, 1989). Segundo Almeida (1949), desde o fim do Cretáceo se prolongando até o Eoceno (53 a 36,5 Ma), grandes movimentos verticais fraturaram e soergueram esta superfície. A linha de cuesta a oeste e a elevação do Planalto Cristalino a leste associado com a grande escarpa de linha de falha da Serra do Mar, abriu-se a grande depressão periférica com sedimentos paleozoicos.

Na Depressão Periférica, a Zona do Médio Tietê tem cerca de 15.200 km² e possui relevo suavizado, com desníveis da ordem de 200 a 300 metros (PENTEADO, 1976). Nesta Zona, o topo aplainado das colinas e morrotes está subnívelado no intervalo de 600-700 m e compõe divisores de vales largos com planícies aluviais pouco expressivas (PENTEADO, 1976). O nivelamento ocorreu em todas as diferentes litologias e dos mergulhos regionais de direção geral noroeste, indicando que toda a região esteve sujeita, em determinada época geológica, aos processos de aplainamento generalizado que arrasaram o seu relevo, constituindo verdadeira superfície de erosão. O estabelecimento da drenagem exorréica que deu início à escavação da bacia (Tietê e Piracicaba, por exemplo) em clima úmido foi guiada pela reativação das linhas tectônicas (possivelmente ao final do Cretáceo) e perturbações tectônicas devido aos falhamentos provocados pelas intrusões de diques e *sills* de diabásio (PENTEADO, 1976) e ocorreu somente após o Paleógeno-Neógeno (65 Ma a 1,6 Ma) gerando fases de entalhe e de aplainamento sucessivas. Ab'Saber (1969) atribui a este compartimento a presença de superfícies poligênicas desenvolvidos entre o Neoplioceno (5,3 Ma) e Eopleistoceno (1,6 Ma) e denominou essa superfície nivelada de "Superfície interplanálticas desdobradas e marcadamente poligênicas". A presença de cascalheiras nos planos das várzeas indica fases sucessivas de aplainamento lateral e entalhe oriundas de alterações climáticas e lento tectonismo positivo pós subnívelamento interplanáltico, entre o Pleistoceno e o Holoceno (>1,6 Ma).

A atividade tectônica com reativação de antigas falhas contrárias aos canais de drenagem favoreceu o seccionamento da Depressão Periférica, gerando condições para a deposição do material aluvial e coluvial vindo de montante (PENTEADO, 1976). Durante o Mioceno, a reativação tectônica regional de baixa magnitude resultou no soerguimento do domo de Pitanga levando ao alinhamento das maiores drenagens

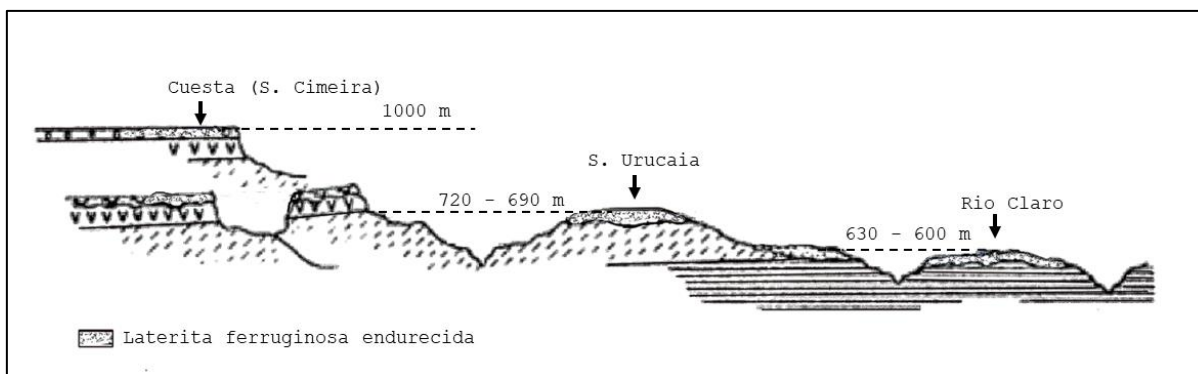
como as do Rio Tietê (direção NW-SE) e do Rio Corumbataí e seus tributários Passa Cinco e Cabeça, que drenam na direção NW-SE (BJÖRNBERG & LANDIM, 1966, GODOY *et al.*, 2006). Devido o arranjo ocasionado pelo Domo de Pitanga, as unidades estratigráficas presentes na porção superior do curso do Corumbataí (Formações Botucatu, Piramboia e Corumbataí) e na porção inferior (Formação Corumbataí) exibem idades mais recentes em comparação com aquelas encontradas na porção média (Grupo Itararé e Formação Tatuí) (PERINOTTO e LINO, 2007).

1.3 O relevo e a ocorrência das lateritas na Cuesta e Depressão Periférica.

Paleossuperfície e feições de aplanamento resultam de processos erosivos e/ou deformações tectônicas em escala regional e são componentes importantes para estudar a evolução das paisagens (WIDDOWSON, 1997). A posição relativa das paleossuperfícies na paisagem é controlada pelo nível de base devido às alterações climáticas de longo prazo ou aos movimentos epirogênicos (CHARDON *et al.*, 2006). Particularmente nas paisagens tropicais, processos de lateritização mais ou menos intensos são geneticamente influenciados e associados a estas superfícies e, uma vez formadas, contribuem para dar sustentação para os relevos residuais (MILLOT, 1970).

A Zona do Médio Tietê (Almeida, 1964) é caracterizada como um setor interplanáltico profundamente erodido, quando comparado com outros setores, com estruturas mais resistentes que se salientam na paisagem (recebe nomes locais como Serra Itaqueri, Serra São Pedro, Serra de Itirapina e Serra de Santana) e, sendo um compartimento interplanáltico bem definido morfologicamente é composto pelas superfícies Urucaia e Rio Claro, drenado pela bacia do rio Corumbataí (PENTEADO, 1976) (Figura 1).

Figura 1 – Representação do relevo da área de estudo, destacando a superfície de cimeira, correspondente ao nível de aplainamento do topo da cuesta (950-1000 m), bem como as superfícies Interplanáltica Urucaia (690-720 m) e Rio Claro (600-630 m). As setas indicam a presença de crostas ferruginosas nos respectivos compartimentos.



Fonte: Adaptado de Penteado (1976)

Na Bacia do Rio Corumbataí há uma sequência de 3 superfícies escalonadas que representam etapas de evolução da paisagem:

(1) superfície mais antiga de cimeira (950-1000 m) que corresponde ao nível aplainado do topo da cuesta arenito-basáltica com crosta ferruginosa (Sul-Americana de KING, 1956). O seu nível de aplainamento se deve ao seu período de formação, superior a 50 Ma (Neocretáceo ao Mioceno). Em diversas porções, é recoberto por uma espessa camada de regolito e crostas lateríticas maduras (KING, 1956; VALADÃO, 2009). No Brasil, a superfície sul-americana foi elaborada a partir da individualização da Placa Sul-Americana, notadamente após o encerramento da sedimentação mesozoica na Bacia do Paraná (VALADÃO, 2009).

(2) superfície intermediária, nível Serra de Santana (850-1000 m), entre a cuesta e os níveis interplanálticos Urucaia e Rio Claro, caracterizada pelos arenitos (Pirambaia) com crosta ferruginosa (Sul-Americana II de Penteado 1976). Os sedimentos mais característicos do topo dessa formação são os siltitos variegados, predominantemente rosa e arroxeados. Paleopavimento detrítico de quartzo e canga acompanham as vertentes (abaixo dos horizontes do solo). A presença de cobertura de detritos rudáceos fazem supor terem sido modelados em um evento de oscilação climática seca, por processos de pedimentação. Datado do Pleistoceno Médio (Pleistoceno de 1,6 a 0,01 Ma) trata-se de um verdadeiro planalto que se estende cerca de 15 km de leste a oeste até as proximidades de Itirapina.

(3) superfície de idade mais recente de colinas com encostas convexas, topos planos caracterizada pelos argilitos-siltitos da Formação Corumbataí sobreposta por arenitos inconsolidados da Formação Rio Claro recobertas com Latossolos e Argissolos, possivelmente pertencentes a Superfície Velhas - Oligoceno-

Mioceno, e representa um nível intermediário entre a superfície sul-americana e as atuais planícies fluviais (Quaternário) incisadas por bacia hidrográfica (KING, 1956).

De acordo com Penteado (1976) os níveis interplanálticos são de idade neogênica e são divididos em:

(i) Superfície Urucaia (690 a 720 m) ou Neogênica I: mostra desmantelamento e fragmentos de crostas ferruginosas e correspondência com os patamares (também com canga) da Superfície da Serra de Santana. Exibe blocos de canga retrabalhados de depósitos pretéritos provenientes das escarpas mais elevadas e tênues crostas de arenito limonitizado capeando os altos planos (PENTEADO 1976, p.64). Corresponde à Superfície Velhas de King (1956) embora Penteado (1976) a tenha inserido igualmente como Superfície Sul Americana (PENTEADO 1976, p.64). A superfície de Urucaia é a mais antiga das superfícies interplanálticas regionais e por ser fruto de uma grande fase de pediplanação, é generalizada em toda a Depressão Periférica.

(ii) Superfície Rio Claro (600 a 630 m) ou Neogênica II: representada por interflúvios tabuliformes capeados com sedimentos arenosos nas bacias dos rios Corumbataí-Cabeça, Cabeça-Passa Cinco, Corumbataí-Ribeirão Claro e dos pequenos afluentes desses rios. Essas feições apresentam-se sobrepostas por arenitos inconsolidados da Formação Rio Claro em depósitos de areia modernos e tênues crostas de arenito limonitizado. Foram estimuladas pelo encaixamento da calha dos rios e por epirogênese positiva de caráter generalizado resultantes da reativação de antigas linhas de falhas. A nivelação dos topos correspondendo a superfície Rio Claro foi produzida nas oscilações climáticas do Quaternário (Pleistoceno-Holoceno $\geq 1,6$ Ma). Representa um nível intermediário entre a Superfície Sul Americana I e as atuais planícies fluviais (Quaternário), que foram incisadas por bacias hidrográficas (KING, 1956) podendo ser correlacionada com a Superfície Sul Americana II de Valadão (2009).

De acordo com a classificação de King (1956), a mais jovem, Superfície Velha (Oligoceno-Mioceno), atua como um nível intermediário entre a Superfície Sul-Americana e as atuais planícies fluviais (Quaternário), que foram incisadas por bacias hidrográficas e exibem uma rede de drenagem mais densa que a Superfície Sul-americana (KING, 1956).

Em razão da dificuldade de estabelecer uma classificação usando denominações idênticas aos autores mencionados com risco de imprecisão, neste trabalho foi considerada a seguinte correspondência: (1) Superfície I correspondendo

a superfície de cimeira/Cuesta; (2) Superfície II correspondendo a Urucaia e (3) Superfície III correspondendo a Superfície Rio Claro.

O estabelecimento dessas superfícies é importante para associar com a presença de lateritas ferruginosas endurecidas preservadas ou não ou sem registro evidente como é o caso observado na Bacia do Corumbataí, onde lateritas ferruginosas endurecidas não foram encontradas na Superfície Rio Claro. Segundo Pedro & Volkoff (1984) e Volkoff (1985), na Superfície Velhas, o ferricrete está ausente e nas colinas onduladas e convexas desenvolvem-se Ferralsols caulíníticos cujas propriedades intrínsecas estão bem correlacionadas com a litologia e o clima atual, e os solos têm uma maior suscetibilidade à degradação seja por erosão hídrica ou por transformação geoquímica. Na área de estudo, a laterita ferruginosa endurecida encontra-se desmantelada e foi encontrado apenas no nível topográfico mais alto de 650-1200 m.

Os processos biogeoquímicos de longa duração combinados com certa estabilidade tectônica ou a ação de processos erosivos que desestruturam estes materiais são fundamentais para a formação e permanência das crostas lateríticas ferruginosas e aluminosas nas camadas superficiais do solo e protegendo as superfícies de aplanamento (NAHON, 1986). Estima-se que o tempo necessário para formação das crostas lateríticas presentes nos platôs >300 m (por exemplo em Carajás (PA), Paragominas-Capim (PA), Gurupi (PA-MA)) foi de 10 a 30 Ma e que elas tenham se formado no Cretáceo Superior, entre 70-65 Ma (COSTA, 1991). Em contrapartida, a taxa de erosão na província de Carajás foi relativamente muito mais baixa, entre 0,13-0,46 m Ma (SHUSTER *et al.*, 2012). Outro nível de lateritização mais jovem (horizontes mosqueados e concrecionários), formado no Pleistoceno (1,6 Ma), está presente em quase toda a região amazônica, exceto nas áreas com cobertura sedimentar pleistocênica tardia a holocênica, ocupando relevo quase plano e ondulado, dissecado pelo rebaixamento do nível de base que se seguiu ao movimento tectônico ascendente (COSTA, 1991). Atualmente estas crostas estão se desmantelando como resposta do clima mais úmido que domina a região (NAHON, 2003).

Fácies de desmantelamento formando níveis pisolíticos, concrecionários e blocos mais resistentes caracterizam os remanescentes da crosta indicando condições climáticas mais úmidas do que os climas quentes com fortes contrastes sazonais necessários para a concentração hematítica na forma de crosta (TARDY &

ROQUIN, 2000). Elevação epirogênica e mudanças paleoclimáticas têm papel relevante na evolução das superfícies de aplanamento por regular a taxa de erosão e o nível de base (CHARDON *et al.*, 2006).

As superfícies de aplanamento no interior do Brasil são interpretadas como sendo o resultado de ciclos erosivos que truncam diferentes litoestruturas acompanhado de movimentos epirogenéticos que hoje encontram-se revestidas por mantos de alteração profundos, geoquimicamente evoluídos e com presença ou não encrostamentos lateríticos (VALADÃO, 2009). Na escala continental, a presença de crostas ferruginosas lateríticas estão geralmente associadas com a superfície Sul-Americana (KING, 1956) amplamente distribuída no interior do continente e elaborada entre o Cretáceo e o Neógeno, após o evento de separação do supercontinente gondwânico. A elaboração desta superfície ocorreu em um longo período com ambiente árido seguido por condições climáticas úmidas que aprofundaram o manto de intemperismo, a segregação de ferro e a formação de crosta em subsuperfície (SUGUIO & BIGARELLA, 1979). Superfícies cronologicamente mais novas com altimetrias mais baixa - Ciclo Velhas do Pleistoceno e Paraguassu do Quaternário, que correspondem às áreas de dissecação mais recente - apresentam igualmente topos aplanados e nivelados com encostas convexizadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises mostraram que os óxi-hidróxidos de Fe cimentam grãos de quartzo. Uma tendência separa as amostras lateritas ferruginosas endurecidas coletadas em baixa e alta elevação. As amostras de maior elevação, predominantemente hematitas de arranjo botrioidal, indicam condições ambientais mais estáveis, enquanto as de baixa elevação, composta por minerais menores e menos organizados, geralmente goethita, refletem ciclos seco-úmido mais curtos, portanto, menos estáveis. A diferenciação entre as lateritas ferruginosas endurecidas foi ressaltada através da relação entre a razão hematita/goethita e a altitude dos pontos de coleta, corroborando com a influência das condições ambientais de formação mineralógica.

As concentrações de ETR nas lateritas ferruginosas endurecidas estão relacionadas com as variadas proporções mineralógicas e estágio de alteração, sendo menores em hematitas e maiores em goethitas e amostras em estágio de alteração. A análise do fracionamento entre ETRL e ETRP mostrou uma predominância de ETRL sobre ETRP em todos os compartimentos estudados (lateritas ferruginosas endurecidas, solos e material parental), sugerindo uma maior mobilidade e acumulação diferencial dos ETR para os solos, possivelmente associada a processos de intemperismo e alteração química dos materiais sedimentares.

A variação nas razões isotópicas de Pb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) entre as amostras é consistente com valores reportados para a crosta continental superior e reforça uma origem comum entre os materiais analisados. As lateritas ferruginosas endurecidas de baixa-média altitude apresentaram razões Th/U e U/Pb distintas das encontradas em média-alta altitude, sugerindo diferenças significativas nas idades. A predominância de um sistema fechado, evidenciada pela relação inversa de Pb com U e Th nas amostras de média-alta altitude, sugere idades mais antigas para essas amostras.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ das lateritas ferruginosas endurecidas indicam a predominância de vegetação C4, típica de savanas, durante a formação dessas crostas, coerente com a transição vegetal e as condições climáticas do Mioceno tardio. As variações observadas no $\delta^{13}\text{C}$ entre as amostras de solo e as lateritas ferruginosas endurecidas refletem influências locais e possíveis transições de ambientes com plantas C3 para C4, além de possíveis impactos devido à intensificação do uso da terra com agricultura. Os resultados obtidos em relação ao

$\delta^{13}\text{C}$ e C_{total} estão de acordo com as condições necessárias para a formação das lateritas ferruginosas endurecidas. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ dos materiais parentais mostram empobrecimento significativo nos carbonatos da Formação Irati e no diabásio da Formação Serra Geral. Estudos anteriores corroboram esses resultados, indicando que o $\delta^{13}\text{C}$ não está correlacionado com a idade geológica e pode ser influenciado por processos geológicos de alta temperatura e assimilação de CO_2 por plantas. Embora algumas formações apresentem assinaturas isotópicas compatíveis com ambientes áridos e semi-áridos, outras, como a Formação Corumbataí, não têm a mesma origem ambiental. É necessário aprofundar a compreensão dos processos ambientais responsáveis pelo fracionamento isotópico e dinâmica do $\delta^{13}\text{C}$ nos diferentes materiais analisados.

As idades (U-Th)/He das lateritas ferruginosas endurecidas sugerem três eventos de formação: Mioceno (23-5,3 Ma), Plioceno (5,3-1,6 Ma) e Pleistoceno (idades menores que 1,6 Ma). A cronologia das superfícies de aplainamento mostra uma relação direta com a altimetria, onde a Superfície Rio Claro, relativamente mais jovem, apresentou amostras com idades inferiores a 1 Ma, correspondentes ao Pleistoceno. Na Superfície Urucaia, foram obtidas idades que variaram de 20 ± 2 Ma a menos de 1 Ma, abrangendo o Mioceno e o Pleistoceno. Já a Superfície Cuesta, mais elevada, mostrou uma variação de idades de 18 ± 2 Ma a 3 ± 1 Ma, abarcando o Mioceno e Plioceno. Esses resultados são consistentes com a literatura, que correlaciona a altimetria das superfícies ao seu período de formação, sendo que as superfícies mais elevadas são geralmente mais antigas. No entanto, a complexidade dos eventos tectônicos e climáticos ao longo do tempo acarretou uma sobreposição de idades, refletindo a formação de laterita ferruginosa endurecida em diferentes períodos, evidenciado pelas idades do Mioceno na superfície Urucaia e idades do Plioceno encontradas na superfície de Cuesta.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. A depressão periférica paulista: um setor das áreas de circundesnudação pós-cretácica na Bacia do Paraná. *Geomorfologia*, n. 15, p. 1 -15, 1969. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001351571>
- ALBUQUERQUE, M.F.S.; HORBE, A.M.C.; DANIŠÍK, M. Episodic weathering in Southwestern Amazonia based on (U-Th)/He dating of Fe and Mn lateritic duricrust. *Chemical Geology*, v. 553, 119792, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119792>
- ALEXANDER, L.T.; CADY, J.G. Genesis and hardening of laterite in soil. Technical Bulletin n. 1282. Soil Conservation Service / United State Department of Agriculture: Washington, DC, 1962.
- ALLARD, T.; GAUTHERON, C.; RIFFEL, S. B.; BALAN, E.; SOARES, B. F.; PINNA-JAMME, R.; DERYCKE, A.; MORIN, G.; BUENO, G. T.; NASCIMENTO, N. Combined dating of goethites and kaolinites from ferruginous duricrusts. Deciphering the Late Neogene erosion history of Central Amazonia. *Chemical Geology*, v. 479, p. 136-150, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.01.004>
- ALLÈGRE, C. J.; LEWIN, E. Chemical structure and history of the Earth: evidence from global non-linear inversion of isotopic data in a three-box model. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 96, p. 61-88, 1989. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90124-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90124-6)
- ALMEIDA, F. F. M. Relevô de “cuestas” na bacia sedimentar do Rio Paraná. *Boletim Paulista De Geografia*, (3), 21-33, 1949. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/1408>
- ALMEIDA, F. F. M. O planalto basáltico da Bacia do Paraná. *Boletim Paulista de Geografia*, n. 24, p. 3-34, 1956. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/1293>
- ALMEIDA, F.F. M. Fundamentos Geológicos do relevo paulista. *Bol. Inst. de Geol. e Geogr.*, 41, 167-263, 1964.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; DANTAS, A.S.L.; CARNEIRO, C.D.R.; MELO, M.S.; BISTRICH, C.A. Mapa geológico do Estado de São Paulo na escala 1:500.000, nota explicativa. São Paulo, IPT, Monografias, v. 1, 126 p. 1981.
- ANGÉLICA, R. S.; COSTA, M. L. Geochemistry of rare-earth elements in surface lateritic rocks and soils from the Maicuru complex, Para, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 47, n. 1-3, p. 165-182, 1993. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(93\)90064-S](https://doi.org/10.1016/0375-6742(93)90064-S)
- ANSART C.; QUANTIN C.; CALMELS D.; ALLARD T.; ROIG J. Y.; COUEFFE R.; HELLER B.; PINNA-JAMME R.; NOUET J.; REGUER S.; VANTELON D.; GAUTHERON C. (U-Th)/He Geochronology Constraints on Lateritic Duricrust Formation on the Guiana Shield. *Frontiers in Earth Science*, v. 10, 2022. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.888993>
- ASMEROM, Y.; JACOBSEN, S.B. The Pb isotopic evolution of the Earth: inferences from river water suspended loads. *Earth and Planetary Science Letters*, v 115, p. 245-256, 1993. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(93\)90225-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(93)90225-X)
- BABECHUK, M.G.; WIDDOWSON, M.; KAMBER, B.S. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology*, v. 363, p. 56-75, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.027>

BAKER, J.; PEATE, D.; WRIGHT, T.; MEYZEN, C. Pb isotopic analysis of standards and samples using a ^{207}Pb – ^{204}Pb double spike and thallium to correct for mass bias with a double-focusing MC-ICP-MS, *Chemical Geology*, v. 211 (3-4), p. 275-303, 2004.

<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.030>

BARDOSSY, G.; ALEVA, G. J. J. Lateritic bauxites. Elsevier; Distribution for the U.S.A. and Canada, Elsevier Science Pub. Co., 624 p, 1990. Disponível em: <https://nla.gov.au/nla.cat-vn1736689>

BEAUVAIS, A. Ferricrete biochemical degradation on the rainforest–savannas boundary of Central African Republic. *Geoderma*, v. 150 (3-4), p. 379 - 388, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.02.023>

BEERLING, D.J.; OSBORNE, C.P. The origin of the savanna biome. *Global Change Biology*, v. 12, p. 2023-2031, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01239.x>

BIGARELLA, J. J. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis (SC): Ed. da UFSC, v. 3, p. 877-1436, 2003.

BJÖRNBERG, A. J. S.; LANDIM, P. M. B. Contribuição ao estudo da Formação Rio Claro (neocenoico). *Boletim Sociedade Brasileira de Geologia*, São Paulo, v.15, n. 4, p.43 - 67, 1966.

BLANCHARD, M.; MORIN, G.; LAZZERI, M.; BALAN, E. First-principles study of the structural and isotopic properties of Al- and OH-bearing hematite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 74(14), p. 3948-3962, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.04.018>.

BRAUN, J.J.; PAGEL, M.; MULLER, J.P.; BILONG, P.; MICHARD, A.; GUILLET, B. Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 54 (3), p. 781-795, 1990. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90373-S](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90373-S)

BOCQUIER, G.; MULLER, J. P.; BOULANGE, B. Les latérites : connaissances et perspectives actuelles sur les mécanismes de leur différenciation. In: Livre jubilaire du cinquantenaire AFES 1934-1984. Paris: AFES, p. 123-138, 1984. Disponível em:

<https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:21625>

BOUTTON, T. Stable carbon isotope ratios of soil organic matter and their use as indicators of vegetation and climate change. In: T.W. Boutton & S.-I. Yamasaki (ed.) *Mass spectrometry of soils*. New York, Marcel Dekker, p. 47 - 82, 1996.

BRAUCHER, R.; BOURLÈS, D.L.; COLIN, F.; BROWN, E.T.; BOULANGE, B. Brazilian laterite dynamics using in situ-produced ^{10}Be . *Earth and Planetary Science Letters*, v. 163 (1-4), p. 197-205, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00187-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00187-3)

CAMPODONICO, V. A.; PASQUINI, A. I.; LECOMTE, K. L.; GARCÍA, M. G.; DEPETRIS, P. J. Chemical weathering in subtropical basalt-derived laterites: A mass balance interpretation (Misiones, NE Argentina). *CATENA*, v. 173, p. 352-366, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.027>

CARMO, I. O.; VASCONCELOS, P. M. P. Geochronological evidence for pervasive Miocene weathering, Minas Gerais, Brazil. *Earth Surface, Processes and Landforms*, v. 29, p.1303-1320, 2004. <https://doi.org/10.1002/esp.1090>

- CASTRO, R. T.; HORBE, A. M. C.; CHEREM, L. F. S. The Brazilian Midwest lateritic domains: Regolith features and dynamic. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 118, 103959, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103959>
- CHARDON, D.; CHEVILLOTTE, V.; BEAUVAIS, A.; GRANDIN, G.; BOULANGÉ, B. Planation, bauxites and epeirogeny: One or two paleosurfaces on the West African margin? *Geomorphology*, v 82, p. 273-282, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.05.008>
- CHRISTIN, P. A.; BESNARD, G.; SAMARITANI, E.; DUVALL, M. R.; HODKINSON, T. R.; SAVOLAINEN, V.; SALAMIN, N. Oligocene CO₂ decline promoted C4 photosynthesis in grasses. *Current Biology*, 18 (1), 37-43, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.058>
- CHRISTOFOLETTI, A.; QUEIROZ NETO, J. P. Estudos geomorfológicos a respeito da Serra de Santana, SP. *Boletim Paulista De Geografia*, n 38, p. 3-20, 1961. Recuperado de <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/1210>
- COELHO, C.V.S.; ROSOLEN, V.; BUENO, G.T.; MESQUITA, A.; MOREIRA, C.A.; FURLAN, L.M.; GOVONE, S. The formation of high-alumina-clay in a pedosedimentary sequence of Marília formation (Western Minas Gerais, Brazil). *Journal of South American Earth Science*, 95, 102263, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102263>
- COLLERSON, K. D.; KAMBER, B. S.; SCHOENBERG, R. Applications of accurate, high-precision Pb isotope ratio measurement by multi-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, v. 188 (1-2), p. 65-83, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00059-1)
- COMPTON, J. S.; WHITE, R. A.; SMITH, M. Rare earth element behavior in soils and salt pan sediments of a semi-arid granitic terrain in the Western Cape, South Africa. *Chemical Geology*, v. 201 (3-4), p. 239-255, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00239-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00239-0)
- CONCEIÇÃO, F. T.; SANTOS, C. M.; SARDINHA, D. S.; NAVARRO, G. R. B.; GODOY, L. H. Chemical weathering rate, denudation rate, and atmospheric and soil CO₂ consumption of Paraná flood basalts in São Paulo State, Brazil. *Geomorphology*, v. 233, p. 41-51, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.040>
- CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2nd Edition, p.39-58, 2003. <https://doi.org/10.1002/3527602097.ch3>
- COSTA, M. L. Aspectos Geológicos dos Lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21 (2), p. 146 -160, 1991. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1991146160>
- COSTA, C. R.; PINTO DA LUZ, C. F.; HORÁK-TERRA, I.; DE CAMARGO, P. B.; BARRAL, U. M.; MENDONÇA-FILHO, C. V.; CONÇALVES, T. S.; SILVA, A. C. Paleoenvironmental dynamics in central-eastern Brazil during the last 23 000 years: tropical peatland record in the Cerrado biome. *Journal of Quaternary Science*, v. 38 (1), p. 61-75, 2023. <https://doi.org/10.1002/jqs.3459>
- DANIŠÍK, M.; EVANS, N. J.; RAMANAIDOU, E. R.; MCDONALD, B. J.; MAYERS, C.; MCINNIS, B. I. A. (U-Th)/He chronology of the Robe River channel iron deposits, Hamersley Province, Western Australia. *Chemical Geology*, v. 354, p. 150 - 162, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.06.012>
- DE CAMPOS, D. S.; MONTEIRO, H. S.; VASCONCELOS, P. M.; FARLEY, K. A.; SILVA, A. C.; VIDAL-TORRADO, P. A new model of bauxitization in quartzitic landscapes: A case

study from the Southern Espinhaço Range (Brazil). *Earth Surf Process Landforms*, v. 48, p. 2788-2807, 2023. <https://doi.org/10.1002/esp.5660>

DE FARIA, D. L. A.; SILVA, S. V.; OLIVEIRA, M. T. Raman microspectroscopy of some iron oxides and oxyhydroxides. *Journal of Raman spectroscopy*, v. 28, p. 873-878, 1997. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4555\(199711\)28:11<873::AID-JRS177>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4555(199711)28:11<873::AID-JRS177>3.0.CO;2-B)

DENG, XIAO-DONG; LI, JIAN-WEI; SHUSTER, D. L. Late Mio-Pliocene chemical weathering of the Yulong porphyry Cu deposit in the eastern Tibetan Plateau constrained by goethite (U–Th)/He dating: Implication for Asian summer monsoon. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 472, p. 289-298, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.04.043>

DENYS, A.; JANOTS, E.; AUZENDE, A.; LANSON, M.; FINDLING, N.; TRCERA N. Evaluation of selectivity of sequential extraction procedure applied to REE speciation in laterite. *Chemical Geology*, v. 559, p. 119954, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119954>

DESEM, C. U.; MAAS, R.; WOODHEAD, J.; CARR, G.; GREIG, A. The utility of rapid throughput single-collector sector-field ICP-MS for soil Pb isotope studies, *Applied Geochemistry*, v. 143, 105361, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105361>

DESJARDINS, T.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F.; CERRI, C. C. Distribution du carbone total et de l'isotope ^{13}C dans des sols ferrallitiques du Brésil. *Science du Sol*, v. 29, 3, p.175 - 187, 1991. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010016054>

FARLEY, K. A.; WOLF, R. A.; SILVER, L.T. The effects of long alpha-stopping distances on (U–Th)/He ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 60 (21), p. 4223-4229, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00193-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00193-7)

FARLEY, K. A. (U–Th)/He Dating: Techniques, Calibrations, and Applications. *Reviews in mineralogy and Geochemistry*, v. 47 (1), p. 819-844, 2002. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.18>

FARLEY, K. A.; KOHN, B. P.; PILLANS, B. The effects of secular disequilibrium on (U–Th)/He systematics and dating of Quaternary volcanic zircon and apatite. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 201 (1), p. 117-125, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00659-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00659-3)

FARLEY, K.A.; FLOWERS, R.M. (U–Th)/Ne and multidomain (U–Th)/He systematics of a hydrothermal hematite from eastern Grand Canyon. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 359-360, p. 131-140, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.10.010>

FITZPATRICK, R. W.; SCHWERTMANN, U. Al-substituted goethite-an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. *Geoderma*, v. 27, p. 335-347, 1982. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(82\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0016-7061(82)90022-2)

FREEDMAN, P. A. Mass bias in ICP mass spectrometers. *Goldschmidt Conference Abstracts*, p. A245, 2002. <https://goldschmidtabstracts.info/abstracts/abstractView?id=2002001555>

FRITZ, T. O.; YAPP, C. J. Miocene weathering environments in Western Australia-Inferences from the abundance and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ of $\text{Fe}(\text{CO}_3)\text{OH}$ in CID goethite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 227, p. 186-210, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.02.023>

FULFARO, V.J.; BARCELOS, J.H. Movimentações verticais e evolução da Depressão Periférica e escarpa da Serra Geral em São Paulo. In: SBG, SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 1, Rio de Janeiro, Boletim de Resumos, p. 109-110, 1989.

GARCIA, V. H.; REINERS, P. W.; SHUSTER, D. L.; IDLEMAN, B.; ZEITLER, P. K. Thermochronology of sandstone-hosted secondary Fe- and Mn-oxides near Moab, Utah: Record of paleo-fluid flow along a fault. *GSA Bulletin*, v. 130 (1-2), p. 93-113, 2017. <https://doi.org/10.1130/B31627.1>

GAUTHERON, C.; SAWAKUCHI, A. O.; ALBUQUERQUE, M. F. S.; CABRIOLU, C.; PARRA, M.; RIBAS, C. C.; PUPIM, F. N.; SCHWARTZ, S.; KERN, A. K.; GÓMEZ, S.; ALMEIDA, R. P.; HORBE, A. M.C.; HAURINE, F.; MISKA, S.; NOUET, J.; FINDLING, N.; RIFFEL, S. B.; PINNA-JAMME, R. Cenozoic weathering of fluvial terraces and emergence of biogeographic boundaries in Central Amazonia. *Global and Planetary Change*, v. 212, 103815, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103815>

GEBRU, Y.; GIDEY, T.; GEBRESILASSIE, B.; HADGU, T. Mineralogical and geochemical characteristics of the iron–duricrust deposit in Adi-Daero area, northwestern Tigray, Ethiopia: implication for the origin and controlling factors. *Applied Earth Science*, v. 129:4, p. 231 - 247, 2020. <https://doi.org/10.1080/25726838.2020.1809956>

GODOY, D. F. Termotectônica por traços de fissão em apatitas dos altos Estruturais de pitanga, pau d'álho e jiboia - centro do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências - Área de Concentração em Geologia Regional p. 9, 2006. <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/92914>

GODOY, D.F.; HACKSPACHER, P.; GUEDES, S.; HADLER NETO, J.C. Reconhecimento da tectônica Mesozóica-Cenozóica na borda leste da Bacia do Paraná através da aplicação de traços de fissão em apatitas no Domo de Pitanga (sudoeste de Rio Claro, SP). *Geociências*, v. 25 (1), p. 151-164, 2006. <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/132/94>

GRANDIN, G.; THIRY, M. Les grandes surfaces continentales tertiaires des régions chaudes. Succession des types d'altération. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.* v. 13 (1), p. 3-18, 1983. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/geologie/03264.pdf

GREGOIRE, D. C. Determination of boron isotope ratios in geological material by inductively coupled plasma mass spectrometry. *American Chemical Society, Analytical Chemistry*, v. 59 (20), 1987. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac00147a009>

GUERRERA JR, A.; PEACOCK, S.M.; KNAUTH, L.P. Large ¹⁸O and ¹³C depletions in greenschist facies carbonate rocks, western Arizona. *Geology*, v. 25 (10), p. 943-946, 1997. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0943:LOACDI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0943:LOACDI>2.3.CO;2)

GUILLOCHEAU, G.; SIMON, B.; BABY, G.; BESSIN, P.; ROBIN, C.; DAUTEUIL, O. Planation surfaces as a record of mantle dynamics: The case example of Africa. *Gondwana Research, Elsevier*, v. 53, p. 82-98, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.05.015>

GUIMARÃES, J.T.F.; SAHOO, P.K.; E SOUZA-FILHO, P.W.M.; SILVA, M.S.; RODRIGUES, T.M.; SILVA, E.F.; REIS, L.S.; DE FIGUEIREDO, M.M.J.C.; LOPES, K.D.S.; MORAES, A.M.; LEITE, A. S.; JÚNIOR, R. O. S.; SALOMÃO, G. N.; AGNOL, R. D. Landscape and Climate Changes in Southeastern Amazonia from Quaternary Records of Upland Lakes. *Atmosphere*, v. 14 (4), p. 621, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14040621>

GÜLYÜZ, N.; KUŞCU, İ.; DANIŞIK, M. Application of (U-Th)/He hematite geochronology to the Çaldağ lateritic Ni-Co deposit, Western Anatolia: Implications for multi-stage weathering events during interglacial periods/segments. *Ore Geology Reviews*, v. 172, 106203, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106203>

HANESCH, M. Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy)hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studies. *Geophysical Journal International*, v. 177, p. 941-948, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04122.x>

HEIM, J. A.; VASCONCELOS, P. M.; SHUSTER, D. L.; FARLEY, K. A.; BROADBENT, G. Dating paleochannel iron ore by (U-Th)/He analysis of supergene goethite, Hamersley province, Australia. *Geology*, v. 34 (3), p. 173-176, 2006. <https://doi.org/10.1130/G22003.1>

HELLER, B. M.; RIFFEL, S. B.; ALLARD, T.; MORIN, G.; ROIG, J. Y.; COUËFFÉ, R.; AERTGEERTS, G.; DERYCKE, A.; ANSART, C.; PINNA-JAMME, R.; GAUTHERON, C. Reading the climate signals hidden in bauxite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 323, p. 40-73, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.02.017>

HEMMING, S. R.; MCLENNAN, S. M. Pb isotope compositions of modern deep sea turbidites. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 184 (2), p. 489-503, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00340-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00340-X)

HENDERSON, P. Rare earth element geochemistry. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1984.

HILL, I. G.; WORDEN, R. H.; MEIGHAN, I. G. Geochemical evolution of a palaeolaterite: the Interbasaltic Formation, Northern Ireland. *Chemical Geology*, v. 166 (1-2), p. 65-84, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00179-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00179-5)

HOFMANN, F.; REICHENBACHER, B.; FARLEY, K. A. Evidence for >5 Ma paleo-exposure of an Eocene–Miocene paleosol of the Bohnerz Formation, Switzerland. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 465, p. 168-175, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.02.042>

HOFMANN, F.; TREFFKORN, J.; FARLEY, K. A. U-loss associated with laser-heating of hematite and goethite in vacuum during (U–Th)/He dating and prevention using high O₂ partial pressure. *Chemical Geology*, v. 532, 119350, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119350>

HORBE, A.M.C.; COSTA, M.L. Lateritic crusts and related soils in eastern Brazilian Amazonia. *Geoderma*, v. 126 (3-4), p. 225-239, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.09.011>

HORBE, A. M. C.; ALBUQUERQUE, M. F. S.; CASTRO, R. T.; PEIXOTO, S.F. Advances in geochemical footprint, iron speciation, and Pb isotopes in the tropical regolith of north-northwestern Amazonia, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 106, 103096, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103096>

HOUSE, M. A.; FARLEY, K. A.; STOCKLI, D. Helium chronometry of apatite and titanite using Nd-YAG laser heating. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 183 (3-4), p. 365-368, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00286-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00286-7)

INMETRO, 2020. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Orientação Sobre validação de métodos de analíticos -DOQ-CGCRE-008. Revisão: 09 – JUN/2020. Disponível em: <https://www.gov.br/cdtn/pt-br/assuntos/documentos-cgcre-abnt-nbr-iso-iec-17025/doq-cgcre-008/view>

IUPAC, 1997. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. <https://doi.org/10.1351/goldbook>

JÚNIOR, E. P. S.; CONCEIÇÃO, F. T.; FERNANDES, A. M.; SARDINHA, D. S.; MENEGÁRIO, A. A.; MORUZZI, R. B. Chemical weathering rates of clastic sedimentary rocks from the Paraná Basin in the Paulista Peripheral Depression, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 96, 102369, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102369>

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. *Geoderma*, v. 29 (1), p. 27-39, 1983. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(83\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0016-7061(83)90028-9).

KEELEY, J.E.; RUNDEL, P.W. Fire and the Miocene expansion of C4 grasslands. *Ecology Letters*, v. 8, p. 683-690, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00767.x>

KETCHAM, R. A.; GAUTHERON, C.; TASSAN-GOT, L. Accounting for long alpha-particle stopping distances in (U-Th-Sm)/He geochronology: Refinement of the baseline case. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 75 (24), p. 7779-7791, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.10.011>

KING, L. C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*., Rio de Janeiro, v. 18, n 2, 1956, p 147-265, 1956. Disponível em: http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/115/rbg_1956_v18_n2.pdf

KNORR, K.; NEUMANN, R. Advances in quantitative X-ray mineralogy: Mixed crystals in bauxite. In: Broekmans, M. (eds) *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27682-8_45

KŘÍBEK, B.; ZACHARIÁŠ, J.; KNĚSL, I.; MÍKOVÁ, J.; MIHALJEVIČ, M.; VESELOVSKÝ, F.; BAMBA, O. Geochemistry, mineralogy, and isotope composition of Pb, Zn, and Cu in primary ores, gossan and barren ferruginous crust from the Perkoa base metal deposit, Burkina Faso. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 168, p. 49-64, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.05.007>

KYNICKY, J.; SMITH, M.P.; XU, C. Diversity of rare earth deposits: the key example of China. *Elements*, v. 8 (5), p. 361-367, 2012. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.5.361>

LAFUENTE, B.; DOWNS, R. T.; YANG, H.; STONE, N. The power of databases: the RRUFF project. In: *Highlights in Mineralogical Crystallography*, T Armbruster and R M Danisi, eds. Berlin, Germany, W. De Gruyter, p. 1-30, 2015. Disponível em: <https://rruff.info/about/downloads/HMC1-30.pdf>

LEDRU, M.P.; BRAGA, P. I. S.; SOUBIES, F.; FOURNIER, M.; MARTIN, L.; SUGUIO, K.; TURCQ, B. The last 50.000 years in the Neotropics (Southern Brazil): evolution of vegetation and climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 123 (1-4), p. 239-257. 1996. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(96\)00105-8](https://doi.org/10.1016/0031-0182(96)00105-8)

LIPPOLT, H. J.; WERNICKE, R. S.; BAHR, R. Paragenetic specularite and adularia (Elba, Italy): Concordant (U + Th)-He and K-Ar ages. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 132 (1-4), p. 43-51, 1995. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00046-F](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00046-F)

MAMEDE, L.; ROSS, J. L. S.; SANTOS, L. M.; NASCIMENTO, M. A. L. S. GEOMORFOLOGIA DA FOLHA SE22 - GOIÂNIA. In: Projeto RADAMBRASIL. (Org.). LEVANTAMENTO DE RECURSOS NATURAIS - PROJETO RADAMBRASIL. Rio de Janeiro: Gráfica do Projeto RADAMBRASIL, v. 31, p. 349-403, 1984.

MANTOVANI, J. R.; BUENO, G. T. Uma proposta metodológica para o mapeamento de superfícies de aplanamento. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23 (2), p. 1456-1480, 2022. <https://doi.org/10.20502/rbq.v23i2.2094>

MARQUES, K. P. P.; ALLARD, T.; GAUTHERON, C.; BAPTISTE, B.; PINNA-JAMME, R.; MORIN, G.; DELBES, L.; VIDAL-TORRADO, P. Supergene phases from ferruginous duricrusts: non-destructive microsampling and mineralogy prior to (U-Th)/He geochronological analysis. *European Journal of Mineralogy*, v. 35, p. 383-395, 2023. <https://doi.org/10.5194/ejm-35-383-2023>

MARTINELLI, L.A.; OMETTO, J.P.H.B.; FERRAZ, E.S.; VICTORIA, R.L.; CAMARGO, P.B.; MOREIRA, M.Z. Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis. São Paulo: Oficina de Textos, Edição: 1, ISBN: 9788586238857, p. 144, 2009.

MAYLE, F. E.; BURN, M. J.; POWER, M.; URREGO, D. H. Vegetation and fire at the Last Glacial Maximum in tropical South America. In: VIMEUX, F.; SYLVESTRE, F.; KHODRY, M. (eds) *Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions*. Springer, v. 14, p. 89-112, 2009. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9_4

MCDOWELL, F. W.; MCINTOSH, W. C.; FARLEY, K. A. A precise ^{40}Ar - ^{39}Ar reference age for the Durango apatite (U-Th)/He and fission-track dating standard. *Chemical Geology*, v. 214 (3-4), p. 249-263, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.10.002>

MEESTERS, A. G. C. A.; T. J. DUNAI. A noniterative solution of the (U-Th)/He age equation, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v. 6 (4), Q04002, 2005. <https://doi.org/10.1029/2004GC000834>

MELFI, A. J.; PEDRO, G.; VOLKOFF, B. Natureza e distribuição dos compostos ferríferos nos solos do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 3, p. 47-54, 1979.

MILAGRES, A. R.; OLIVEIRA, F. S.; VARAJÃO A. F. D. C.; VARAJÃO, C. A. C.; MEDEIROS, E. B. DE; RAMANAIDOU, E. R. Lithological control on the formation of ferruginous duricrusts in the Espinhaço Range (Minas Gerais, Brazil). *CATENA*, v. 231, 107374, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107374>

MILLOT G. *Geology of Clays: Weathering, Sedimentology, Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 126-130, 1970. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-41609-9>

MILLOT, R.; ALLÈGRE, C. J.; GAILLARDET, J.; ROY, S. Lead isotopic systematics of major river sediments: a new estimate of the Pb isotopic composition of the Upper Continental Crust. *Chemical Geology*, v. 203 (1-2), p. 75-90, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.09.002>

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*, v. 131, p. 267-289, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2014.01.036>

MONTEIRO, H. S.; VASCONCELOS, P. M. P.; FARLEY, K. A. A combined (U-Th)/He and cosmogenic ^3He record of landscape armoring by biogeochemical iron cycling. *J. of*

Geophysical Research: Earth Surface, v.123, p. 298-323, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.02.045>

MONTEIRO, H. S.; VASCONCELOS, P. M. P.; FARLEY, K. A.; MELLO, C.L.; CONCEIÇÃO, F.T. Long-term vegetation-induced goethite and hematite dissolution-reprecipitation along the Brazilian Atlantic margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 601, 111137, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111137>

NAHON, D. Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs: géochimie, structure, relais et coexistence. Strasbourg: Institut de Géologie - Université Louis-Pasteur, 44, p 3-232, 1976.

NAHON D. B. Evolution of iron crusts in tropical landscapes. In *Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals* (eds. Steven M. Colman and David P. Dethier). Academic Press, Orlando, pp. 169-191, 1986.

NAHON, D.B. Altérations dans la zone tropicale. Signification à travers les mécanismes anciens et/ou encore actuels. *Comptes Rendus Acad. Sci. Geoscience* v. 335, p. 1109-1119, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.10.008>

NAVARRO, M. S.; ANDRADE, S.; ULBRICH, H.; GOMES, C. B.; GIRARDI, V. A.V. The Direct Determination of Rare Earth Elements in Basaltic and Related Rocks using ICP-MS: Testing the Efficiency of Microwave Oven Sample Decomposition Procedures. *Geostandards and Geoanalytical Research*, v. 32 (2), p. 167-180, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2008.00840.x>

NDJIGUI, P.-D.; BILONG, P.; BITOM, D. Negative cerium anomalies in the saprolite zone of serpentinite lateritic profiles in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, v. 53 (1-2), p. 59-69, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2008.09.002>

NEGRÃO, L.; COSTA, M.; PÖLLMANN, H.; ABREU, D.; SILVA, A.; SANTOS, P. Quantification of Al in goethites and hematites of Salinópolis-PA and lateritic profiles in Carajás, Juruti and Rondon do Pará (Eastern Amazon). *Contribuições à Geologia da Amazônia*, v. 10, p. 41-51, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327416583>

NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, v. 299 (5885), p. 715-717, 1982. <https://doi.org/10.1038/299715a0>

NEUMANN, R.; AVELAR, A. N.; COSTA, G. M. Refinement of the isomorphic substitutions in goethite and hematite by the Rietveld method, and relevance to bauxite characterisation and processing. *Minerals Engineering*, v. 55, p. 80-86, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.020>

NEWMAN, K.; GEORG, R. B. The measurement of Pb isotope ratios in sub-ng quantities by fast scanning single collector sector field-ICP-MS. *Chemical Geology*, v. 304-305, p. 151-157, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.010>

NGON, G. F. N.; ETAME, J.; NTAMAK-NIDA, M. J.; MBESSE, C. O.; MBAI, J. S.; BAYIGA, É. C.; GERARD, M. Geochemical and palaeoenvironmental characteristics of Missole I iron duricrusts of the Douala sub-basin (Western Cameroon). *Comptes Rendus Geoscience*, v. 348 (2), p. 127-137, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.10.006>

NORTHFLEET, A. A.; NEVES, S. B. Interpretação fotogeológica da região nordeste de Franca, São Paulo Ponta Grossa, PETROBRAS/DESUL (Relatório Técnico Interno, 373), 38 p., 1968.

NOVELLO, V.F.; CAMPOS, M.C.; CHIESSI, C.M.; PAULA-SANTOS, G.M.; PESSEDA, L.C.R.; GOMES, T.; UTIDA, G.; CRUZ, F.W. Aplicação de Isótopos Estáveis de Carbono no Estudo das Mudanças Climáticas e Ambientais. *Derbyana*, São Paulo, 42: e735, 2021. <https://doi.org/10.14295/derb.v42.735>

OLIVEIRA, S. M. B.; IMBERNON, R. A. L. Weathering alteration and related REE concentration in the Catalão I carbonatite complex, central Brazil. *Journal of American Earth Sciences*, v. 11 (4), p. 379-388, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(98\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(98)00024-8)

ORTIZ, J.E.; TORRES, T.; DELGADO, A.; JULIA, R.; LUCINI, M.; LLAMAS, F.J.; REYES, E.; SOLER, V.; VALLE, M. The palaeoenvironmental and palaeohydrological evolution of Padul Peat Bog (Granada, Spain) over one million years, from elemental, isotopic and molecular organic geochemical proxies. *Organic geochemistry*, v. 35 (11), p. 1243-1260, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2004.05.013>

PALECHATY, S.M.; KAUFMAN, A.J.; GROTZINGER, J.P. Evaluation of $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy for intrabasinal correlation: Vendian strata of northeast Siberia. *GSA Bulletin*, v. 108; no. 8; p. 992-1003, 1996. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1996\)108<0992:EOCCFI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1996)108<0992:EOCCFI>2.3.CO;2)

PEDRO, G.; VOLKOFF, B. Grandes provinces pédologiques du Brésil. Cadre général de l'évolution pédologique. In C.R. du séminaire du lab. de géologie Cah. ORSTOM, sér. Géol. XII (2), 165-169, 1984.

PENG, B.; RATE, A.; SONG, Z.; YU, C.; TANG, X.; XIE, S.; TU, X.; TAN, C. Geochemistry of major and trace elements and Pb-Sr isotopes of a weathering profile developed on the Lower Cambrian black shales in central Hunan, China, *Applied Geochemistry*, v. 51, p. 191-203, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.007>

PENTEADO, M. M. Geomorfologia do Setor Centro-Occidental da Depressão Periférica Paulista. (Tese de Doutorado). Rio Claro, 1976. Disponível em: <https://geoparkcorumbatai.com.br/wp-content/uploads/2017/11/Penteado-1976-Geomorfologia-do-Setor-Centro-Occidental-da-Depress%C3%A3o-Perif%C3%A9rica-Paulista.pdf>. Originalmente apresentado como tese do autor (doutorado - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, 1968). Bibliografia: p. 70-77. Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=26915>

PERINOTTO, J. A.; LINO, I. C. Geologia, Recursos Minerais e Passivos Ambientais. Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí. Centro de Análise e Planejamento Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, 2007. Disponível em: <http://www1.rc.unesp.br/igce/ceapla/atlasv3/geologia.php>

PESSEDA, L.; GOUVEIA, S.; ARAVENA, R.; GOMES, B.; BOULET, R.; RIBEIRO, A. ^{14}C Dating and Stable Carbon Isotopes of Soil Organic Matter in Forest–Savanna Boundary Areas in the Southern Brazilian Amazon Region. *Radiocarbon*, 40(2), 1013-1022, 1997. <https://doi.org/10.1017/S0033822200018981>

PIDGEON, R. T.; BRANDER, T.; LIPPOLT, H. J. Late Miocene (U+Th)– ^4He ages of ferruginous nodules from lateritic duricrust, Darling Range, Western Australia. *Australian*

Journal of Earth Sciences, v.51 (6), p. 901-909, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1400-0952.2004.01094.x>

RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais, Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória, geologia; geomorfologia; pedologia; vegetação; uso potencial da terra / Projeto RAMDAMBRASIL - Rio de Janeiro, v. 32, 780 p., 1983. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/bibliotecacatalogo?id=217129&view=detalhes>

RAMANAIDOU, E.; NAHON, D.; DECARREAU, A.; MELFI, A. J. Hematite and goethite from duricrusts developed by lateritic chemical weathering of Precambrian banded iron formations, Minas Gerais, Brazil. *Clays and Clay Minerals*, v. 44 (1), p. 22-31, 1996. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1996.0440102>

RAMANAIDOU, E.; WELLS, M.; LAU, I.; LAUKAMP, C. 6 - Characterization of iron ore by visible and infrared reflectance and, Raman spectroscopies, Editor(s): Liming Lu, *Iron Ore*, Woodhead Publishing, p. 191-228, 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-156-6.00006-X>

RANDIVE, K.; KUMAR, J. V.; BHONDWE, A.; LANJEWAR, S. Understanding the behaviour of rare earth elements in minerals and rocks. *Gondwana Geological Magazine*, v. 29 (1-2), p. 29-37, 2014. <https://www.researchgate.net/publication/275337571>

RANZANI, G.; PENTEADO, M.M.; SILVEIRA, J.D. Concreções ferruginosas, paleosolo e a superfície de cimeira no planalto ocidental Paulista. *Geomorfologia (São Paulo)*. Editora: Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia, n. 31, 28 p., 1972.

REINERS, P.W.; NICOLESCU, S. Measurement of parent nuclides for (U-Th)/He chronometry by solution sector ICP-MS, ARHDL Report 1, 33 p, 2006. <http://www.geo.arizona.edu/~reinners/arhdl/arhdl.htm>

REINERS, P. W.; CHAN, M. A.; EVENSON, N S. (U-Th)/He geochronology and chemical compositions of diagenetic cement, concretions, and fracture-filling oxide minerals in Mesozoic sandstones of the Colorado Plateau. *GSA Bulletin*; v. 126 (9-10), p. 1363-1383, 2014. <https://doi.org/10.1130/B30983.1>

RIFFEL, S. B.; VASCONCELOS, P. M.; CARMO, I. O.; FARLEY, K. A. Combined $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He geochronological constraints on long-term landscape evolution of the Second Paraná Plateau and its ruiniform surface features, Paraná, Brazil. *Geomorphology*, v. 233, p. 52-63, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.041>

RIFFEL, S. B.; VASCONCELOS, P. M.; CARMO, I. O.; FARLEY, K. A. Goethite (U-Th)/He geochronology and precipitation mechanisms during weathering of basalts. *Chemical Geology*, v. 446, p. 18-32, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.03.033>

ROSOLEN, V.; BUENO, G.T.; MELFI, A.J.; MONTES, C.R.; COELHO, C.V.S.; ISHIDA, D.A.; GOVONE, J.S. Evolution of iron crust and clayey Ferralsol in deeply weathered sandstones of Marília Formation (Western Minas Gerais State). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 79, p. 421-430, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.09.001>

RUTHERFORD, E. Present problems in radioactivity. *The Popular Science Monthly*, v. 67, p. 5-34, 1905.

SALGADO, A.A.R.; BUENO, G.T.; DINIZ, A.D.; MARENT, B.R. Long-Term Geomorphological Evolution of the Brazilian Territory. In: Vieira, B., Salgado, A., Santos, L.

(eds) Landscapes and Landforms of Brazil. World Geomorphological Landscapes. Springer, Dordrecht, p. 19-31, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_3

SCHAEFER, C. E. G. R.; RIBEIRO, A. S. S.; CORRÊA, G. R.; LIMA NETO, E.; SIMAS, F. N. B.; KER, J. C. Características químicas e mineralogia de solos perféricos da Serra Sul de Carajás. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais, v. 11(1): p. 57-69, 2016. <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v11i1.460>

SHELLMANN, W. A new definition of laterite. Natural Resources and Development, v. 18, p. 7 - 21, 1983.

SHELLMANN, W. Geochemical differentiation in laterite and bauxite formation. CATENA, v. 21, p. 2 - 3, 1994. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90007-8)

SHELLMANN, W. Discussion of "A critique of the Schellmann definition and lassification of laterite" by R. P. Bourman and C. D. Ollier (Catena 47, 117 - 131). Catena, v. 52(1), p. 77 - 79, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00178-9)

SCHIEBER, A. Chapter 1 - Introduction to Food Authentication, Editor(s): Da-Wen Sun, Modern Techniques for Food Authentication (Second Edition), Academic Press, 2018, Pages 1-21, ISBN 9780128142646, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814264-6.00001-3>

SCHULZE, D. G. The Influence of Aluminum on Iron Oxides. VIII. Unit-Cell Dimensions of Al-Substituted Goethites and Estimation of Al from them. Clays and Clay Minerals, v. 32 (1), p. 36-44, 1984. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1984.0320105>

SEGALEN, L.; RENARD, M.; LEE-THORP, J.A.; EMMANUEL, L.; LE CALLONNEC, L.; DE RAFAELIS, M.; SENUT, B.; PICKFORD, M.; MELICE, J.L. Neogene climate change and emergence of C4 grasses in the Namib, southwestern Africa, as reflected in ratite ^{13}C and ^{18}O . Earth and Planetary Science Letters, v. 244 (3-4), p. 725-734. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.12.012>

SHUSTER, D. L.; FARLEY, K. A.; SISTERTON, J. M.; BURNETT, D. S. Quantifying the diffusion kinetics and spatial distributions of radiogenic ^4He in minerals containing proton-induced ^3He . Earth and Planetary Science Letters, v. 217(1-2), p. 19-32, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00594-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00594-6)

SHUSTER, D. L.; VASCONCELOS, P. M.; HEIM, J. A.; FARLEY, K. A. Weathering geochronology by (U-Th)/He dating of goethite. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 69, n. 3, p. 659-673, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.028>

SHUSTER D. L.; FARLEY K. A.; VASCONCELOS P. M.; BALCO G.; MONTEIRO H. S.; WALTEBERG K.; STONE J. O. Cosmogenic ^3He in hematite and goethite from Brazilian "canga" duricrust demonstrates the extreme stability of these surfaces. Earth Planet. Sci. Lett. 329-330, 41-50, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.02.017>

SIQUEIRA-RIBEIRO, M. C.; MARIN, D. F. C.; HACKSPACHER, P. C.; STUART, F. M. The performance of the (U-Th)/He thermochronology laboratory at UNESP Rio Claro, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 91, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920170397>

SKIRYCZ, A.; CASTILHO, A.; CHAPARRO, C.; CARVALHO, N.; TZOTZOS, G.; SIQUEIRA, J.O. Canga biodiversity, a matter of mining. Frontiers in Plant Science, v. 5, 653, 9 p, 2014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00653>

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B. Aspectos regionais da estratigrafia da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste. Congr. Bras. Geologia 27, Aracaju, SBG. Anais, Aracaju, SBG, v.1, p. 243 - 56, 1973.

SOMBROEK, W.G.; CAMARGO, M.N. Groundwater laterite and ironstone soil in Brazil with example from the Amazonian region. Proceeding 2nd Seminar on laterization processes. A.J.Melfi and Carvalho, A., USP, São Paulo, Brazil, p. 541-552, 1983.

SOUSA, D. J. L.; VARAJÃO, A. F. D. C.; YVON, J.; COSTA, G. M. Mineralogical, micromorphological and geochemical evolution of the kaolin facies deposit from the Capim region (northern Brazil). Clay Minerals, v. 42, n. 1, p. 69–87, 9 mar. 2007.
<https://doi.org/10.1180/claymin.2007.042.1.06>

SPIER, C. A.; VASCONCELOS, P. M.; OLIVEIRA, 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, p. 79-104, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.04.006>

SQUISATO, E. 2008. A FORMAÇÃO SERRA GERAL NA PORÇÃO CENTRO - NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. Dissertação de Mestrado elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências - Área de Concentração em Geologia Regional, Rio Claro, 63p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/92875>

STANJEK, H.; SCHWERTMANN, U. The influence of aluminum on iron oxides. Part XVI: Hydroxyl and aluminum substitution in synthetic hematites. Clays and Clay Mineral, v. 40 (3), p. 347-354, 1992. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1992.0400316>

STOOPS, G.; MARCELINO, V. 15 - Lateritic and Bauxitic Materials. Editor(s): Georges Stoops, Vera Marcelino, Florias Mees, Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths, Elsevier, ISBN 9780444531568, p. 329-350, 2010.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53156-8.00015-5>

STRUTT, R. J. On the radio-active minerals. Proceedings. Royal Society of London, v. 76 (508), p. 88-101, 1905. <https://doi.org/10.1098/rspa.1905.0006>

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. Ambiente fluvial Curitiba: UFPR, 1979. 183 p. (Ambientes de Sedimentação e sua Interpretação e Importância).

TARDY, Y.; MELFI, A.J.; VALETON, I. Climats et paléoclimats tropicaux périanatlantiques. Rôle des facteurs climatiques et thermodynamiques: température et activité de l'eau sur la repartition et la composition mineralogique des bauxites et des cuirasses ferrugineuses au Brésil et en Afrique. C.R. Acad. Sci. Paris, v. 306 (2), p. 289-295, 1988a.

TARDY, Y.; MAZALTARIM, D.; BOEGLIN, J.L.; ROQUIN, C.; PION, J.C.; PAQUET, H.; MILLOT, G. Lithodependance et homogénéisation de la composition mineralogique et chimique des cuirasses ferrugineuses lateritiques. C. R. Acad. Sci., Paris, Ser. II, v. 307, p. 1765-1772, 1988b.

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, v. 12 (1-2), p. 283-295, 1991.
[https://doi.org/10.1016/0899-5362\(91\)90077-C](https://doi.org/10.1016/0899-5362(91)90077-C)

TARDY, Y. Chapter 15 - Diversity and terminology of lateritic profiles. Editor(s): I.P. Martini, W. Chesworth, *Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier, v. 2, p. 379-405, 1992. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89198-3.50020-9>

TARDY, Y., ROQUIN, C. Geochemistry and evolution of laterite landscapes. In: *Weathering, soil and paleosols*. I.P. Martini and W. Chestworth (Eds). Elsevier, Amsterdam, p. 407-443, 1992.

TARDY, Y., ROQUIN, C. Dérive des continents, paléoclimats et altérations tropicales: 473 p, Orléans, BRGM, ISBN: 2715908652, 1998. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6223780>

TARDY, Y., ROQUIN, C. Dérive des continents: paléoclimats et distribution des couvertures pédologiques tropicales (Continental drift: paleoclimates and distribution of the pedological tropical covers). *Bulletin de l'Association de géographes français*, v. 77 (4), p. 373-383, 2000. <https://doi.org/10.3406/bagf.2000.2185>

TAYLOR, S R; MCLENNAN, S M. The continental crust: Its composition and evolution. United States: N. p., 1985.

THÉVENIAUT, H.; FREYSSINET, PH. Timing of lateritization on the Guiana Shield: synthesis of paleomagnetic results from French Guiana and Suriname. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 178, p. 91-117, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(01\)00404-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00404-7)

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2007. EPA 6020a: Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry. Washington DC.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2014. EPA 6020b: Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry. Washington DC.

VALADÃO, R. C. Evolução de longo-termo do relevo do Brasil Oriental (desnudação, superfícies de aplanamento e soerguimentos crustais). Tese de doutorado não publicada, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, 1998. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22366.13120>

VALADÃO, R. C. Geodinâmica de superfícies de aplanamento, desnudação continental e tectônica ativa como condicionantes da megageomorfologia do Brasil orienta. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10(2), 2009. <https://doi.org/10.20502/rbg.v10i2.132>

VANHAECKE, F.; BALCAEN, L.; MALINOVSKY, D. Use of single-collector and multi-collector ICP-mass spectrometry for isotopic analysis. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, v. 24, p. 863-886, 2009. <https://doi.org/10.1039/B903887F>

VASCONCELOS, P. M.; BECKER, T. A.; RENNE, P. R.; BRIMHALL G. H. Direct dating of weathering phenomena by K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis of supergene K-Mn oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 58, p. 1635-1665, 1994a. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90565-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90565-7)

VASCONCELOS, P.M.; BRIMHALL, G. H.; BECKER, T.; RENNE, P. R. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis of supergene jarosite and alunite: Implications to the paleo wathering history of western US and West Africa. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 58, p. 401-420, 1994b. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90473-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90473-1)

VASCONCELOS P. M. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of supergene processes in ore deposits. In Application of Radiogenic Isotopes to Ore Deposit Research and Exploration. Reviews in Economic Geology (eds. D. Lambert David and J. Ruiz). Society of Economic Geologists, Boulder, CO, United States, p. 73-113, 1999. <https://doi.org/10.5382/Rev.12.04>

VASCONCELOS P. M.; KNESEL K. M.; COHEN B. E.; HEIM J. A. Geochronology of the Australian Cenozoic: a history of tectonic and igneous activity, weathering, erosion, and sedimentation. Aust. J. Earth Sci, v. 55, p. 865-914, 2008. <https://doi.org/10.1080/08120090802120120>

VASCONCELOS P. M.; HEIM, J. A.; FARLEY, K. A.; MONTEIRO, H.; WALTEBERG, K. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He - $^4\text{He}/^3\text{He}$ geochronology of landscape evolution and channel iron deposit genesis at Lynn Peak, Western Australia. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 117, p. 283-312, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2013.03.037>

VEIZER, J.; HOEFS, J. The nature of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ secular trends in sedimentary carbonate rocks: Geochimica Cosmochimica Acta, v. 47, p. 697-706, 1976. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(76\)90129-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(76)90129-0)

VERMEESCH, P. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. Geoscience Frontiers, v.9, p.1479-1493, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>

VOLKOFF, B. Organisations régionales de la couverture pédologique du Brésil. Chronologie des différenciations. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXI, no 4, p. 225-236, 1985.

WARREN, L.V.; ASSINE, M.L.; SIMÕES, M.G.; RICCOMINI, C.; ANELLI, L.E. A Formação Serra Alta, Permiano, no centro-leste do Estado de São Paulo, Bacia do Paraná, Brasil. Brazilian Journal of Geology, 45 (1), p.109-126, 2015. <https://doi.org/10.1590/23174889201500010008>

WEIS, D.; KIEFFER, B.; MAERSCHALK, C.; BARLING, J.; DE JONG, J.; WILLIAMS, G. A.; HANANO, D.; PRETORIUS, W.; MATTIELLI, N.; SCOATES, J. S.; GOOLAERTS, A.; FRIEDMAN, R. M.; MAHONEY, J. B. High-precision isotopic characterization of USGS reference materials by TIMS and MC-ICP-MS. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, v. 7 (8), 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GC001283>

WELLS, M.A.; DANIŠÍK, M.; MCINNES, B.I.A.; MORRIS, P.A. (U-Th)/He-dating of ferruginous duricrust: Insight into laterite formation at Boddington, WA, Chemical Geology, v. 522, p. 148-161, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.05.030>

WIDDOWSON, M. The geomorphological and geological importance of palaeosurfaces. In: Widdowson, M. (Ed.), Palaeosurfaces: Recognition, Reconstruction and Palaeoenvironmental Interpretation. Geological Society Special Publication, n 120, p. 1-12, 1997. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.197.120.01.01>

WIDDOWSON, M.; GUNNELL, Y. Lateritization, Geomorphology and Geodynamics of a Passive Continental Margin: The Konkan and Kanara Coastal Lowlands of Western Peninsular India. Spec. Pubs int. Ass. Sediment, v. 27, p. 245-274, 1999. <https://doi.org/10.1002/9781444304190.ch10>

WINTER, K.; HOLTUM, J.A.M. How Closely Do the ^{13}C Values of Crassulacean Acid Metabolism Plants Reflect the Proportion of CO_2 Fixed during Day and Night? Plant Physiology, v. 129, p. 1843 - 1851, 2002. <https://doi.org/10.1104/pp.002915>

WOLF, R. A.; FARLEY, K. A.; SILVER, L. T. Helium diffusion and low-temperature thermochronometry of apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 60 (21), p. 4231-4240, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00192-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00192-5)

WOODHEAD, J. D.; HERGT, J. M. Pb-Isotope Analyses of USGS Reference Materials. *Geostandards Newsletter - The Journal of Geostandards and Geoanalysis*, v. 24 (1), p. 33-38, 2000. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2000.tb00584.x>.

WU, F. T.; CHANG, C. Estudo mineralógico dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste de São Paulo. *Revista Instituto Geológico*, v. 13 (1), p. 58-68, 1992. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.19920004>

YAPP, C. J.; SHUSTER, D. L. Environmental memory and a possible seasonal bias in the stable isotope composition of (U-Th)/He-dated goethite from the Canadian Arctic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 75 (15), p. 4194-4215, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.04.029>

ZEITLER, P.K. U-Th/He Dating. In: Rink, W., Thompson, J. (eds) *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Springer, Dordrecht., p. 1-14, 2014. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6326-5_131-1