

# RESSALVA

Atendendo solicitação da  
autora, o texto completo desta tese  
será disponibilizado somente a partir  
de 19/09/2021.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

Câmpus de Rio Claro



Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

**EVOLUÇÃO SEDIMENTAR E PALEOAMBIENTAL DA FORMAÇÃO SETE LAGOAS (GRUPO BAMBUÍ, NORTE DE MINAS GERAIS) NO CONTEXTO DAS BACIAS SEDIMENTARES DO PERÍODO EDIACARANO TERMINAL**

**JULIANA OKUBO**

Orientador: Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

**EVOLUÇÃO SEDIMENTAR E PALEOAMBIENTAL  
DA FORMAÇÃO SETE LAGOAS (GRUPO BAMBUÍ,  
NORTE DE MINAS GERAIS) NO CONTEXTO DAS  
BACIAS SEDIMENTARES DO PERÍODO  
EDIACARANO TERMINAL**

JULIANA OKUBO

Orientador: Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro - SP  
2019

O41e	<p>Okubo, Juliana</p> <p>Evolução sedimentar e paleoambiental da Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí, norte de Minas Gerais) no contexto das bacias sedimentares do Período Ediacarano terminal / Juliana Okubo. -- Rio Claro, 2019</p> <p>190 p. : il., tabs., fotos</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren</p> <p>1. Fm. Sete Lagoas. 2. Grupo Bambuí. 3. capa carbonática. 4. sedimentologia. 5. estratigrafia. I. Título.</p>
------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

## ERRATA

OKUBO, J. **Evolução sedimentar e paleoambiental da Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí, norte de Minas Gerais) no contexto das bacias sedimentares do Período Ediacarano terminal.** 2019, 190p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, campus Rio Claro, Rio Claro, 2019.

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
Agradecimentos	1	À Universidade Estadual Paulista (UNESP) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP processos 2015/07391-0 e BEPE 2017/19023-1) pelo apoio logístico e financeiro.	À Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus Rio Claro, pelo apoio institucional. Ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP processos 2015/07391-0 e BEPE 2017/19023-1), pela concessão de bolsa de doutorado. Além disso, o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**EVOLUÇÃO SEDIMENTAR E PALEOAMBIENTAL DA FORMAÇÃO  
SETE LAGOAS (GRUPO BAMBUÍ, NORTE DE MINAS GERAIS) NO  
CONTEXTO DAS BACIAS SEDIMENTARES DO PERÍODO  
EDIACARANO TERMINAL**

**JULIANA OKUBO**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus 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

Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren – orientador (IGCE/UNESP)

Prof. Dra. Lucía Gomez-Peral (UNLP – Argentina)

Prof. Dr. Alexandre Uhlein (IGC/UFMG)

Prof. Dr. Claudio Riccomini (IEE/USP)

Prof. Dr. Ricardo Ivan Ferreira da Trindade (IAG/USP)

Conceito: Aprovado

Rio Claro/SP, 19 de setembro de 2019

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus Rio Claro, pelo apoio institucional.

Ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP processos 2015/07391-0 e BEPE 2017/19023-1), pela concessão de bolsa de doutorado. Além disso, o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Lucas V. Warren por ter me apresentado o mundo Ediacarano e incentivado a ir ao campo na Namíbia, o qual me permitiu visualizar os melhores caminhos a serem traçados durante esta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Shuhai Xiao, por me receber em meu doutorado sanduíche e compartilhar seu vasto conhecimento sobre paleontologia e geoquímica do Ediacarano. Agradeço também ao Dr. Drew Muscente, pelas discussões iniciais sobre isótopos de enxofre que inspiraram esse trabalho.

Agradeço também aos Profs. Drs. Benjamin Gill e Robert J. Bodnar, também da Virginia Tech, pelos aprendizados sobre os isótopos de enxofre e inclusões fluidas, respectivamente, bem como pelo uso das instalações de seus laboratórios.

Aos Profs. Drs. Alexandre Uhlein, Ricardo I. F. Trindade, Lucía Gomez-Peral e Claudio Riccomini, pelas valiosas contribuições durante a defesa. Agradeço também ao Prof. Dr. Mario L. Assine, pelas enriquecedoras discussões a respeito da estratigrafia e das paleocorrentes e ao amigo e Prof. Dr. Gabriel Uhlein, pelas discussões sobre o Grupo Bambuí.

Aos Profs. Drs. Leonardo Fadel Cury e Anelise Bahniuk e toda equipe do laboratório LAMIR (UFPR) pelas análises isotópicas de carbono e oxigênio.

Ao pessoal da Pós-Graduação da UNESP, Lucas Inglez, Regiane, Fer Menin, Rodox, Marcela, Juninho, Antonio, Silvia e também o pessoal do LESTE (Michele, Patricia, Filipe, Milena e Fernanda Quaglio) pela amizade, momentos compartilhados e pelas ótimas discussões filosóficas e geológicas.

Ao pessoal da Virginia Tech (Dr. Qing Tang, Morrison Nolan, Dana Korneisel, Maxwell Schwid e Fanfan Kong), pela amizade, momentos compartilhados e discussões enriquecedoras durante nossas reuniões semanais durante a minha estadia em Blacksburg.

Ao amigo Hamilton Sales dos Reis por toda a assistência durante os trabalhos de campo.

À MF, Adriano, Victor e Desi, em especial, Joca e Lulu. por me apoiarem e estarem sempre comigo. Aos novos amigos Brit, Khanh, Matt, Renatha, Léo, Wallace e Najla que tornaram minha vida muito mais leve e prazerosa durante o período que passei em Blacksburg.

Encerro agradecendo a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

Drásticas mudanças climáticas, tectônicas, geoquímicas e bioevolutivas ocorreram ao final da Era Neoproterozoica e seu registro pode ser encontrado em diversas sucessões sedimentares ao redor do mundo. Uma dessas sucessões é a Formação Sete Lagoas, unidade carbonática basal do Grupo Bambuí, aflorante tanto na porção central e sul do Cráton do São Francisco. Considerando a extensa área de afloramento e grande continuidade estratigráfica desta unidade na região de Januária (norte de MG), este trabalho teve como objetivo definir a evolução sedimentar e paleoambiental da Formação Sete Lagoas a partir de uma abordagem sedimentológica, estratigráfica e geoquímica integrada, buscando compreender, por exemplo, variações nas condições *redox*, modificações no ciclo do carbono, temperatura da água e produtividade orgânica primária. Na área estudada, cinco associações de fácies foram definidas, da base para o topo: capa dolomítica (AF1), associação de carbonatos de perimará (AF2), rampa carbonática influenciada por sismos (AF3), cordão oolítico litorâneo (AF4) e planície de maré dominada por microbialitos (AF5). Devido sua singularidade e importância no registro, duas sucessões distintas foram estudadas detalhadamente: os precipitados de fundo oceânico pertencente à capa dolomítica e a brecha intraformacional (*flat-pebble breccia*) nas porções basal e intermediária da unidade, respectivamente. Os precipitados de fundo oceânico são representados por leques carbonáticos (pseudomorfos de aragonita), barita e cimentos apatíticos autigênicos, estes últimos ineditamente descritos em contexto de capa carbonática. Devido à importância dos leques de barita na definição de idade (Marinoana) para os carbonatos de capa estudados, deu-se especial atenção ao estudo da origem (diagenética, hidrotermal ou metanogênica) deste mineral. A precipitação da capa carbonática com os leques de fundo oceânico (AF1) foi sucedida pela deposição de fácies de água rasa (AF2), compondo um ambiente no qual proliferaram os metazoários *Cloudina* e *Corumbella* associados à trombólitos e esteiras microbianas. Estes depósitos de perimará foram sucedidos por brechas intraformacionais, interpretadas como *flat-pebble breccia*, formada por eventos de sismicidade que atingiram e modificaram substancialmente a arquitetura da plataforma carbonática (AF3). Dados de direção dos clastos alongados de AF3 e de paleocorrentes da AF4 indicam que a linha de costa original estava posicionada na direção NE-SW, com abertura oceânica para SE. Extensos depósitos de cordões oolíticos e estromatólitos dômicos (AF4) sucedidos por planícies de maré de clima árido com microbialitos (AF5) representam a última etapa de deposição da sucessão da Formação Sete Lagoas, precedendo o afogamento da plataforma carbonática representado pela deposição de pelitos da Formação Serra de Santa Helena. As associações de fácies interpretadas foram organizadas em três sequências deposicionais distintas, com expressivo espessamento de seção na direção E-NE, possivelmente relacionado a um aumento na taxa de subsidência nesta porção da bacia. Ao longo da sucessão carbonática, os valores isotópicos de  $C_{carb}$  e  $O_{carb}$  mostram uma excursão negativa na base passando para valores progressivamente mais positivos em direção ao topo. Os valores isotópicos de  $^{34}S_{CAS}$  mostram co-variância com os valores de  $^{13}C_{carb}$ , indicando que a pirita e o carbono orgânico foram oxidados e soterrados a uma mesma taxa. As concentrações de sulfato contido no carbonato (CAS – sigla em inglês) medidas mostram um pico de oxigenação na porção basal da unidade seguida por condições anóxicas, semelhante às estimativas anteriores do reservatório de sulfato em outras unidades do final do Ediacarano.

Palavras-chave: Neoproterozoico, Grupo Bambuí, Formação Sete Lagoas, estratigrafia, sedimentologia, geoquímica



## ***ABSTRACT***

Major climatic, tectonic, biogeochemical and evolutionary changes occurred during Late Neoproterozoic are recorded in several sedimentary successions around the world. One of these successions is the Sete Lagoas Formation, the basal unit of the Bambuí Group, present both in the southern and central part of São Francisco Craton. Because of excellent exposure and great stratigraphic continuity of this unit, this study focused on the sedimentary and paleoenvironmental evolution of the Sete Lagoas Formation near Januária area– MG in the central São Francisco Craton, based on a sedimentological, stratigraphic and geochemical approaches. Five facies associations were defined in the studied area: cap dolostone (FA1), peritidal carbonates (FA2), seismic-influenced carbonate ramp (FA3), oolitic belt (FA4) and tidal flat dominated by microbialites (FA5). Due to their importance in the rock record, two distinct intervals were studied in detail: the seafloor precipitates and the flat-pebble breccia from the lower and middle part of the unit, respectively. The seafloor precipitates are represented by carbonate fans (aragonite pseudomorphs), barite and authigenic apatitic cements. The latter was described here for the first time in a cap carbonate context, and this mineralogical association is interpreted as the result of iron reduction of sediments in conjunction with high alkalinity of the seawater. Since barite fans have been used to infer the Marinoan age of this cap carbonate, it is important to test whether its origin relates to early diagenetic or hydrothermal processes. The FA1 was succeeded by the deposition of peritidal carbonates (FA2), marked by the presence of thrombolites and laminated microbialites, which provided environmental conditions for the proliferation of the *Cloudina* and *Corumbella* metazoans. These shallow-water deposits are overlaid by intraformational breccias, interpreted as flat-pebble breccia, formed by seismic events (FA3). Clast measurements of the paleocurrent data from FA4 indicate a NE-SW coastline with ocean opening for SE. Extensive ooid shoals (FA4) succeeded by tidal flats dominated by microbialites (FA5), represent the last deposition cycle of the Sete Lagoas Formation, preceding the drowning of the carbonate platform represented by pelitic rocks from the Serra de Santa Helena Formation. The Sete Lagoas carbonate platform deposits are arranged into three depositional sequences with thickening towards E-NE, possibly related to an increase of subsidence rate in this part of the basin. Throughout the entire carbonate succession, C and O isotopic values show a large negative excursion in the base, increasing to positive values upward. The  $^{34}\text{S}_{\text{CAS}}$  isotopic values covary with  $^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ , indicating that pyrite and organic carbon were oxidized and buried at the same rate. Measured carbonate-associated sulfate (CAS) concentrations show an oxygenation peak in the lower part of the unit, followed by anoxic conditions, similar to previous estimates of sulfate reservoir in other late Ediacaran carbonate units.

Keywords: Neoproterozoic, Bambuí Group, Sete Lagoas Formation, stratigraphy, sedimentology, geochemistry

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1. OBJETIVOS .....	14
1.2. LOCALIZAÇÃO E ACESSOS .....	15
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS</b> .....	<b>16</b>
<b>3 ASPECTOS GEOQUÍMICOS, PALEONTOLÓGICOS, PALEOCLIMÁTICOS E GEOTECTÔNICOS DO PERÍODO EDIACARANO</b> .....	<b>23</b>
3.1 GLACIAÇÕES GLOBAIS NEOPROTEROZOICAS .....	23
3.2 CAPAS CARBONÁTICAS .....	24
3.3 ASSINATURAS ISOTÓPICAS E CONDIÇÕES DE OXIGENAÇÃO NOS OCEANOS DURANTE O EDIACARANO .....	27
3.4 INOVAÇÕES PALEOBIOLOGICAS, PALEOECOLÓGICAS E EVOLUTIVAS NO EDIACARANO .....	29
<b>4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL</b> .....	<b>30</b>
4.1 FORMAÇÃO SETE LAGOAS .....	34
4.1.1 <i>Idade dos depósitos carbonáticos</i> .....	38
<b>5. “SEDIMENTARY EVOLUTION AND INTEGRATED HIGH-RESOLUTION GEOCHEMISTRY (C, O AND S) OF THE SETE LAGOAS FORMATION, BAMBUÍ GROUP (NORTHERN MINAS GERAIS STATE, BRAZIL)”, A SER SUBMETIDO PARA O PERIÓDICO <i>PRECAMBRIAN RESEARCH</i></b> .....	<b>40</b>
5.1 INTRODUCTION .....	42
5.2 GEOLOGICAL SETTING .....	43
5.3 MATERIAL AND METHODS .....	48
5.4 RESULTS .....	50
5.4.1 <i>Facies and facies association of the Sete Lagoas Formation</i> .....	50
5.4.2 <i>Sequence stratigraphy framework</i> .....	57
5.4.3 <i>Stable isotope geochemistry and evaluation of diagenetic alteration</i> .....	62
5.5 DISCUSSIONS .....	64
5.5.1 <i>Interpreting the sulfur and carbon signatures</i> .....	64
5.5.2 <i>Paleoenvironmental implications for the Sete Lagoas Formation: the marine sulfate reservoir</i> .....	65
5.6 CONCLUSIONS.....	68
<b>6. “PHOSPHOGENESIS, ARAGONITE FAN FORMATION, AND SEAFLOOR ENVIRONMENTS FOLLOWING THE MARINOAN GLACIATION”, PUBLICADO NA REVISTA <i>PRECAMBRIAN RESEARCH</i> (2018, 311: 24-36)</b> .....	<b>74</b>
6.1 INTRODUCTION .....	75
6.2 GEOLOGICAL SETTING .....	76
6.3 MATERIAL AND METHODS .....	78
6.4 RESULTS .....	78
6.5 DISCUSSIONS .....	78
6.6 CONCLUSIONS.....	85

<b>7.</b>	<b>“HYDROTHERMAL INFLUENCE ON BARITE PRECIPITATES IN THE BASAL EDIACARAN SETE LAGOAS CAP CARBONATE, SÃO FRANCISCO CRATON, CENTRAL BRAZIL”, ARTIGO SUBMETIDO A UM VOLUME ESPECIAL DA REVISTA PRECAMBRIAN RESEARCH .....</b>	<b>88</b>
<b>7.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>90</b>
<b>7.2</b>	<b>GEOLOGICAL SETTING .....</b>	<b>92</b>
<b>7.3</b>	<b>METHODS.....</b>	<b>94</b>
<b>7.4</b>	<b>RESULTS .....</b>	<b>96</b>
	<i>7.4.1 Petrography, microCT, and sulfur isotope data.....</i>	<i>96</i>
	<i>7.4.2 Raman spectroscopy and fluid inclusions .....</i>	<i>98</i>
<b>7.5</b>	<b>DISCUSSIONS .....</b>	<b>103</b>
<b>7.6</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>107</b>
<b>8.</b>	<b>“THE ENIGMATIC FLAT-PEBBLE BRECCIA OF THE SETE LAGOAS FORMATION (BAMBUÍ GROUP, BRAZIL): EVIDENCES OF SEISMIC-INDUCED DEFORMATION IN AN EDIACARAN CARBONATE PLATFORM”, SUBMETIDO PARA O PERIÓDICO JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES</b>	<b>113</b>
<b>8.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>115</b>
<b>8.2</b>	<b>GEOLOGICAL SETTING .....</b>	<b>116</b>
<b>8.3</b>	<b>MATERIAL AND METHODS.....</b>	<b>118</b>
<b>8.4</b>	<b>RESULTS .....</b>	<b>118</b>
	<i>8.4.1 Facies associations of the Sete Lagoas Formation .....</i>	<i>118</i>
	<i>8.4.1.1 Peritidal facies association.....</i>	<i>119</i>
	<i>8.4.1.2 Flat-pebble breccias facies association.....</i>	<i>119</i>
	<i>8.4.1.3 Subtidal facies association .....</i>	<i>121</i>
	<i>8.4.2 SEDIMENTARY CHARACTERISTICS OF THE SETE LAGOAS FLAT-PEBBLE BRECCIA DEPOSITS .....</i>	<i>122</i>
<b>8.5</b>	<b>DISCUSSIONS .....</b>	<b>129</b>
	<i>8.5.1 The flat-pebble breccia problem: distinct triggers, processes and products .....</i>	<i>129</i>
	<i>8.5.2 Flat pebble carbonate breccia as evidence of syndepositional tectonic activity.....</i>	<i>131</i>
<b>8.6</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>134</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>140</b>
<b>10.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>143</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: A) Localização da área de estudo, destacando as principais vias de acesso. B) Localização das seções estudadas na área de Januária e Montalvânia-MG. ....	16
Figura 3.1: Síntese dos principais eventos tectônicos, bioevolutivos e paleoclimáticos ocorridos no final do Neoproterozoico e início do Cambriano, extraído de Spence et al. (2016). As linhas vermelhas correspondem às anomalias negativas de isótopos de carbono. Baseado em Nogueira (2003) e Warren (2011), com compilações de Canfield et al. (2008), Lenton et al. (2014), Spence et al. (2016). ....	25
Figura 3.2: Mapa da localização do Cráton do São Francisco e das faixas móveis Brasília e Araçuaí. Fonte: Alkmim and Martins-Neto (2001). ....	30
Figura 3.3: Mapa geológico simplificado do cráton São Francisco. Compilado do banco de dados da CPRM (Geobank). ....	31
Figura 3.4: Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí (baseado em Dardenne, 1978). Espessuras compiladas por Lima (2005) e os ciclos de sedimentação segundo Dardenne (1978), Martins (1999) e Martins-Neto e Alkmim (2001). ....	33
Figura 3.5: A) Mapa esquemático da bacia Bambuí mostrando a distribuição de altos e baixos do embasamento. (Fonte: Alkmim & Martins-Neto, 2001). O retângulo representa a localização da área estudada. ....	36
Figure 5.1: A) Simplified geological map of the São Francisco Craton, showing the glaciogenic units and the Bambuí Group. B) Outcrop area of the Sete Lagoas Formation at Januária area and location of the studied sections ....	45
Figure 5.2: Lithostratigraphy of the Bambuí Group ....	46
Figure 5.3: Facies associations of the Sete Lagoas Formation at Januária region.....	52
Figure 5.4: Facies associations of the Sete Lagoas Formation at Januária region.....	54
Figure 5.5: Paleocurrents of the oolitic belt facies association of the Sete Lagoas Formation in the study area and rose diagrams of azimuthal orientation of elongate clasts in flat-pebble breccia near Barreiro section ....	57
Figure 5.6: Sequence stratigraphic framework of the Sete Lagoas Formation.....	59
Figure 5.7: Paleocurrent data, stratigraphic surfaces, columnar sections and respective $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ (‰, VPDB) and $\delta^{44}\text{S}_{\text{CAS}}$ (‰, VPDB) profiles of the Sete Lagoas Formation.....	61
Figure 5.8: Composite stratigraphic column, geochemical data ( $\text{C}_{\text{carb}}$ , $\text{O}_{\text{carb}}$ and $\text{S}_{\text{CAS}}$ isotopes), CAS concentration, carbonate content and Sr/Ca and Mn/Sr ratios for the Sete Lagoas Formation at Januária area.....	62
Figure 5.9: Isotope and elemental cross-plots for the Sete Lagoas Formation.....	64
Figure 5.10: Sensitivity of the marine sulfate reservoir size to deposition rate, calculated using Kah et al. (2004) approach. ....	67
Figure 6.1: Location of the São Francisco Craton and the Bambuí Group in the Januária region. B) Geologic map of the Sete Lagoas Formation and stratigraphic section.....	77
Figure 6.2: Measured stratigraphic sections of the lower Sete Lagoas Formation.....	79
Figure 6.3: Photographs and photomicrographs of barite- and aragonite-bearing layers of the lower Sete Lagoas Formation.....	80
Figure 6.4: BSE-SEM images of aragonite fan crystals and encrusting apatitic cements.....	81
Figure 6.5: BSE-SEM images and EDS spectra of the aragonite and barite fans.....	82
Figure 6.6: BSE-SEM images and WDS elemental maps of the contact between the barite fans and the underlying microbialite.....	83
Figure 6.7: BSE-SEM image and WDS elemental maps of barite associated with iron oxide pseudomorph of pyrite in microbialites.....	83
Figure 6.8: BSE-SEM image and WDS elemental maps of aragonite fans, showing barite inclusions with carbonate fan crystals.....	84

Figure 6.9: Sedimentary model for aragonite crystal fan formation and phosphogenesis in the Sete Lagoas Formation.....	84
Figure 7.1: Simplified geological map, generalized schematic stratigraphic columns of the carbonate units of the São Francisco Craton and composite section of the Sete Lagoas Formation at Januária area .....	93
Figure 7.2: Mesoscopic and microscopic features of the barite layer.....	97
Figure 7.3: X-ray CT three-dimensional reconstruction of a Sete Lagoas sample that contains a layer of void-filling barite crystals and a layer of the host rock.....	98
Figure 7.4: Carbonaceous material (CM) Raman spectra and CM Raman temperatures.....	100
Figure 7.5: Fluid inclusions in barite crystals, showing secondary trails and some primary fluid inclusions. ....	100
Figure 7.6: Methane-bearing fluid inclusions.....	102
Figure 7.7: Representative Raman spectrum of fluid inclusions in barite crystals of the Sete Lagoas Formation and calibration Raman spectra showing Raman O-H stretching bands for water with known salinities .....	102
Figure 7.8: Sulfur isotope data of sulfides and sulfates from Sete Lagoas Formation and other supposedly correlative units (Salitre Formation and Vazante Group) of the São Francisco Craton .....	105
Figure 8.1: Location of the São Francisco Craton and the Bambuí Group in the Minas Gerais State, central Brazil, geological map of Ediacaran Sete Lagoas Formation in the vicinity of the town of Januária-MG and location of the columnar sections, and lithostratigraphic column of the Bambuí Group in the study area .....	117
Figure 8.2: Representative sedimentary facies of the Sete Lagoas Formation in the studied area. ....	120
Figure 8.3: Different types of breccia deposits present in the Sete Lagoas Formation succession in the studied area .....	122
Figure 8.4: Correlation of stratigraphic columnar sections showing the flat-pebble breccia of the Sete Lagoas Formation in the Januária region.....	123
Figure 8.5: Outcrop photograph of flat-pebble breccia beds at Barreiro section and representative sketch of A showing the arrange of the clasts.....	124
Figure 8.6: Sedimentary features of the flat-pebble breccia and their relationship with underlying and overlying layers.....	125
Figure 8.7: Representative sketch of flat-pebble breccia beds at the Barreiro section .....	125
Figure 8.8: Size measurements of clasts in the lower breccia interval at the Barreiro section.....	126
Figure 8.9: Thin section microphotographs and compositional EDS maps of the flat-pebble breccia at the Barreiro section. ....	127
Figure 8.10: Deformation features of the flat-pebble beds.....	128
Figure 8.11: Paleocurrents of the subtidal facies association positioned stratigraphically above the flat-pebble breccia interval and rose diagrams of azimuthal orientation of elongate clasts in flat-pebble breccia near Barreiro section.....	129
Figure 8.12: Magnetometric map of Januária region.....	134
Figure 8.13: Schematic model for the seismic origin of flat-pebble breccia from Sete Lagoas Formation in the Januária region. ....	134

## LISTA DE APÊNDICES

<b>Apêndice A:</b> Dados isotópicos e geoquímicos referentes às amostras estudadas .....	155
<b>Apêndice B:</b> Co-autoria em artigos científicos relacionados ao tópico da tese: Inglez et al. (2019) “Discs and discord: The paleontological record of Ediacaran discoidal structures in the South American continent”. <i>Journal of South America Earth Sciences</i> , 89: 319-336. ....	158
<b>Apêndice C:</b> Co-autoria em artigos científicos relacionados ao tópico da tese: Uhlein et al. (2019). “Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonatesiliciclastic Bambuí Basin, Brazil”, <i>Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology</i> , 517: 39-51. ....	177

## Apresentação

A presente tese está estruturada em dez capítulos. O Capítulo 1 apresenta a problemática tratada nesta tese. Nos capítulos seguintes, são apresentados os métodos e técnicas analíticas utilizados nesta pesquisa (Cap. 2), uma contextualização dos principais eventos geotectônicos e bioevolutivos ocorridos ao final do Ediacarano (Cap. 3) e os aspectos geológicos regionais da área de estudo (Cap. 4).

Os resultados estão apresentados na forma de quatro artigos científicos (Cap. 5 a 8). O Capítulo 5 corresponde ao manuscrito em preparação intitulado “*Sedimentary evolution and integrated high-resolution geochemistry (C, O and S) of the Sete Lagoas Formation, Bambuí Group (northern Minas Gerais State, Brazil)*”, que será submetido à revista *Precambrian Research*. Este trabalho busca apresentar um quadro estratigráfico, paleoambiental e quimioestratigráfico completo para a Formação Sete Lagoas na região de Januária-MG. O Capítulo 6 corresponde ao artigo publicado no periódico *Precambrian Research*, intitulado “*Phosphogenesis, aragonite fan formation and seafloor environments following the Marinoan glaciation*”. Este trabalho aborda a relação dos leques de aragonita e de barita com o processo de fosfatização no contexto de capa carbonática que ocorre na base da Formação Sete Lagoas. O Capítulo 7, intitulado “*Hydrothermal influence on barite precipitates in the basal Ediacaran Sete Lagoas cap carbonate, São Francisco Craton, central Brazil*”, corresponde ao manuscrito em preparação, que será submetido a um volume especial da revista *Precambrian Research*. Neste trabalho, discute-se a origem e a história termal da barita presente na capa carbonática, discutindo sua relação com eventos hidrotermais vigentes no cráton São Francisco durante o final do Período Ediacarano. O último artigo (Capítulo 8) apresenta o manuscrito em revisão no periódico *Journal of South American Earth Sciences*, cujo título é “*The enigmatic flat-pebble breccias of the Sete Lagoas Formation (Bambuí Group, Brazil): evidences of seismic-induced deformation in an Ediacaran carbonate platform*”. Este artigo trata da análise sedimentológica e estratigráfica das brechas carbonáticas (*flat pebble breccia*) incomuns que ocorrem na porção intermediária da Formação Sete Lagoas, destacando a sismicidade como o principal mecanismo de formação destes depósitos particulares.

O Capítulo 9 apresenta as conclusões obtidas ao longo da pesquisa e por fim as respectivas referências bibliográficas utilizadas no presente trabalho (Cap. 10). Ao final deste volume, estão apresentados uma tabela (Apêndice A) integrando todos os dados geoquímicos (isótopos de  $C_{carb}$ ,  $O_{carb}$  e  $S_{CAS}$ , elementos maiores, menores e traço), bem como dois artigos científicos em que a autora da presente tese de doutoramento participou como co-autora (Apêndices B e C).

## 1. Introdução

Várias unidades ediacaranas têm sido estudadas em todo o mundo sob diversos aspectos geológicos ao longo das últimas décadas. O reaparecimento de formações ferríferas após um hiato de 1 Ga no registro geológico representa uma importante mudança sedimentológica e geoquímica ocorrida ao final do Neoproterozoico (Hoffman e Schrag, 2002). Estas formações ferríferas estão intimamente relacionadas a diamictitos glaciais criogenianos depositados em latitudes equatoriais (Cox et al., 2016, 2013), indicando que estas glaciações foram as mais severas da história da Terra (Evans, 2000; Trindade e Macouin, 2007; Williams, 1975). As assinaturas geoquímicas e isotópicas preservadas nas rochas são anômalas em relação ao restante do registro geológico, especialmente durante o Ediacarano, revelando profundas mudanças na composição química dos oceanos e do ciclo biogeoquímico do carbono (Kaufman et al., 1997, 1991; Knoll et al., 1986). Associado a este contexto de importantes mudanças paleoclimáticas e em um oceano quimicamente diferente do atual, surgem os primeiros organismos macroscópicos complexos entre 575 e 565 Ma, seguidos pelas inovações biológicas como mobilidade (>555 Ma), calcificação (550 Ma) e predação (<549 Ma) (Narbonne, 2005).

Apesar do crescente volume de dados obtidos em sucessões ediacaranas ao redor do globo, diversas questões ainda são motivo de intenso debate na literatura (Spence et al., 2016; Xiao et al., 2016), incluindo o sincronismo dos supostos eventos glaciais globais, sua distribuição latitudinal, o significado de diversas estruturas sedimentares anômalas e o significado das importantes excursões isotópicas de C, O e S, observadas nas capas carbonáticas (Hoffman e Schrag, 2002).

Na América do Sul, uma das unidades neoproterozoicas mais estudadas é a Formação Sete Lagoas, base do Grupo Bambuí, devido à sua extensa exposição sobre o Cráton do São Francisco (CSF). Alguns autores dividem o cráton em três compartimentos (Alkmim et al., 1996, 1993; Alkmim e Martins-Neto, 2001; Coelho et al., 2008): (i) compartimento oeste, que corresponde à porção externa da Faixa Brasília; (ii) porção central, cujas unidades neoproterozoicas do Grupo Bambuí encontram-se praticamente indeformadas, e (iii) compartimento leste, que corresponde à porção externa da Faixa Araçuai.

As áreas de afloramento da Formação Sete Lagoas sem deformação tectônica ocorrem principalmente nas regiões de Januária, Arcos e Sete Lagoas nas bordas leste e sul do cráton, respectivamente. Tais áreas apresentam excelentes exposições para estudos sedimentológicos e estratigráficos, ainda que surpreendentemente pese a ausência de trabalhos de detalhe na porção norte do CSF. Devido à descoberta do fóssil-guia *Cloudina* na região de Januária (Warren et



al., 2014) e ao fato das outras regiões (Arcos e Sete Lagoas) terem sido amplamente estudadas ao longo das últimas décadas por vários autores (Cruz e Nobre-Lopes, 1992; Hidalgo, 2007; Kuchenbecker, 2011; Nobre-Lopes, 1995; Paula-Santos, 2012; Vieira, 2007), o presente trabalho procurou concentrar seus estudos na região de Januária (municípios de Januária, Itacarambi e Montalvânia, MG), buscando um melhor entendimento da sucessão sedimentar da Formação Sete Lagoas nesta porção da Bacia Bambuí.

A Formação Sete Lagoas apresenta características sedimentológicas distintas nas suas ocorrências nas porções sul (região de Sete Lagoas, área-tipo da unidade) e central do CSF (região de Januária, área de estudo). Fácies de águas profundas, como os ritmitos de calcilito cinza e pelitos (Vieira et al., 2007a), não são, à título de exemplo, encontradas na região de Januária. Por outro lado, as brechas intraformacionais (*flat-pebble breccias*) que ocorrem extensivamente na região de estudo parecem não ocorrer em outras porções do Grupo Bambuí. Porém, similaridades também ocorrem, como a presença de estruturas sedimentares anômalas na base da Formação Sete Lagoas, tais como pseudomorfos de aragonita e megamarcas onduladas, similares àquelas reconhecidas globalmente para as capas carbonáticas neoproterozoicas (Vieira et al., 2007a, 2015). Além disso, as brechas hidrotermais ricas em Pb e Zn, descritas no topo da unidade em Januária por Nobre-Lopes (2002), apresentam características semelhantes e se correlacionam com outras unidades proterozoicas da bacia, como a Formação Salitre na Bacia Irecê e parte do Grupo Vazante (ver Misi et al., 2005, 2014).

Considerando o panorama acima exposto, este trabalho almejou o estudo integrado (estratigráfico, sedimentológico e geoquímico) da sucessão sedimentar da Formação Sete Lagoas na porção central do Cráton do São Francisco (região de Januária-MG), buscando traçar sua evolução sedimentar e paleoambiental e, portanto, preencher importante lacuna no conhecimento geológico do Neoproterozoico brasileiro.

### **1.1. Objetivos**

A presente tese de doutoramento teve como objetivo principal a realização de estudo sedimentológico, estratigráfico e geoquímico de detalhe da Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí) dentro do contexto evolutivo das sucessões neoproterozoicas desenvolvidas nas paleomargens do Cráton São Francisco. Como objetivos específicos, buscou-se:

- Descrever as associações de fácies e definir os sistemas deposicionais vigentes durante a sedimentação da Formação Sete Lagoas. Adicionalmente, detalhou-se os processos

formadores de brechas incomuns presentes na porção intermediária da sucessão estudada;

- Definir padrões arquiteturais e de empilhamento das sucessões, bem como caracterizar superfícies estratigráficas a fim de compor o quadro estratigráfico adequado para a Formação Sete Lagoas na região de Januária, MG;
- Caracterizar em detalhe os precipitados de fundo oceânico presentes na capa carbonática da porção inferior da unidade;
- Identificar variações nos padrões isotópicos de carbono e oxigênio visando auxiliar a correlação da unidade com outras porções da bacia;
- Estabelecer uma inédita curva isotópica de enxofre para a unidade, cujo significado está intimamente relacionado com a composição da água do mar e a oxigenação dos oceanos no Período Ediacarano.

## **1.2. Localização e acessos**

A área de estudo está localizada na porção norte do estado de Minas Gerais (Figura 1.1A), na margem esquerda do Vale do São Francisco, nos arredores do município de Januária (595 km a norte da capital do estado, Belo Horizonte). Nesta região, afloram rochas do Grupo Bambuí, compreendendo uma cobertura cratônica extensa em contato erosivo com rochas arqueanas e paleoproterozoicas do embasamento do Cráton São Francisco. Localmente, a unidade apresenta espessura total da ordem de 700-1000 m (Misi et al., 2007) e compreende calcários e dolomitos da Formação Sete Lagoas na base que gradam em direção ao topo para folhelhos e siltitos da Formação Serra de Santa Helena, seguidos por margas, siltitos, calcários e arenitos das formações Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias.

As seções estudadas podem ser acessadas, a partir de Belo Horizonte, pelas rodovias BR 040 e BR-135 até a cidade de Montes Claros, totalizando 425 km de percurso. Rodovias estaduais e federais irradiam dessa cidade e servem de ligação com outros municípios da área investigada. Destacam-se a BR-135 para Januária, Manga e Montalvânia. Destaca-se também a presença na área de estudo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu (municípios de Januária, Itacarambi e São João das Missões), no qual ocorrem inúmeras cavernas que expõem de maneira espetacular as rochas da sucessão basal e intermediária da Formação Sete Lagoas.

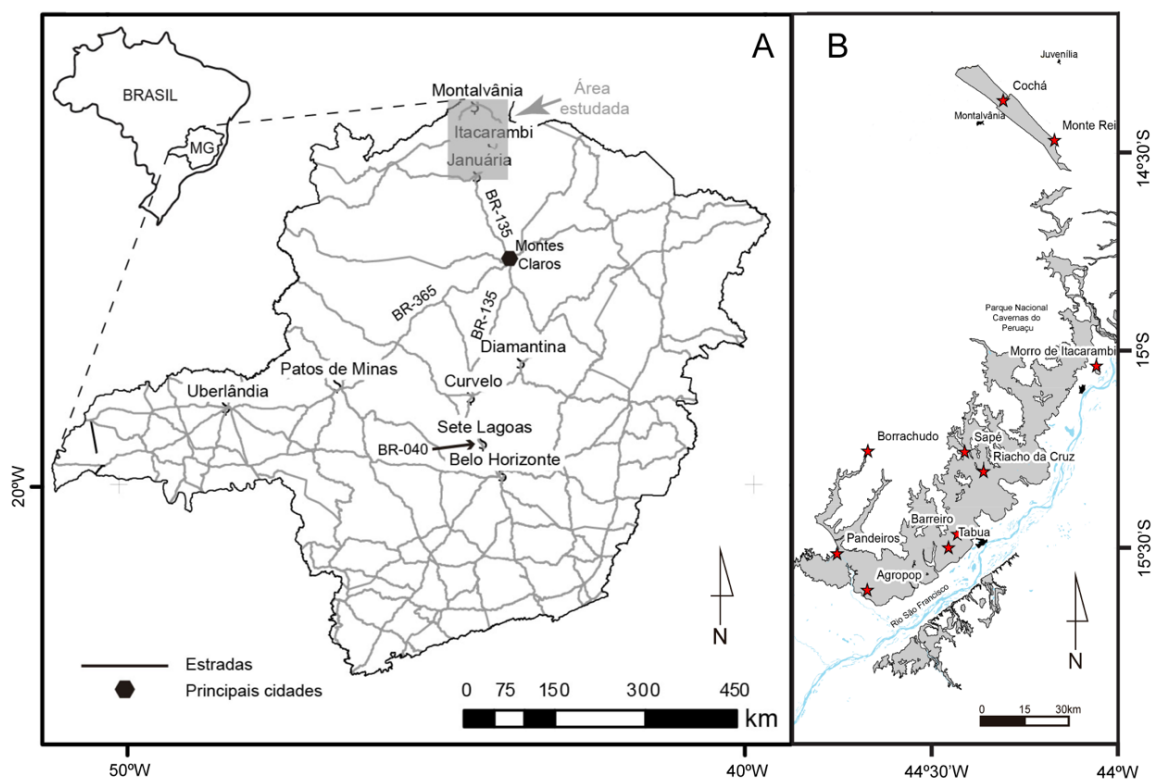


Figura 1.1: A) Localização da área de estudo, destacando as principais vias de acesso. B) Localização das seções estudadas na área de Januária e Montalvânia-MG.

## 9. Conclusões

Na presente pesquisa, materializada em artigos científicos e na presente tese de doutoramento, buscou-se compreender de forma integrada como se deu a evolução sedimentar da Formação Sete Lagoas e a variação paleoambiental durante sua deposição. Para isso, teve-se como principais objetivos: i) descrever as associações de fácies e definir os sistemas deposicionais da Formação Sete Lagoas. Adicionalmente, buscou-se detalhar os processos formadores de facies e sucessões de fácies incomuns, tais como a capa carbonática da base da unidade e brechas presentes na porção intermediária da sucessão; ii) definir padrões arquiteturais e de empilhamento das sucessões estudadas, bem como caracterizar superfícies estratigráficas chave a fim de compor um quadro estratigráfico adequado para a Formação Sete Lagoas na região de Januária, MG; iii) caracterizar em detalhe os aspectos sedimentares e geoquímicos dos precipitados de fundo oceânico presentes na capa carbonática da porção inferior da unidade iv) identificar variações nos padrões isotópicos de carbono e oxigênio visando detalhar aspectos paleoambientais, identificar mudanças de padrão associadas a variação de fácies e superfícies estratigráficas e auxiliar na correlação da unidade com outras porções da bacia e unidades coevas ao redor do mundo; e finalmente, v) estabelecer uma inédita curva isotópica de enxofre para a unidade, cujo significado está intimamente relacionado com a composição da água do mar e a oxigenação dos oceanos no Período Ediacarano.

Na área estudada, a Formação Sete Lagoas apresenta espessura total de 130 metros e é composta por três sequências deposicionais distintas (S1, S2 e S3). Da base para o topo, foram definidas cinco associações de fácies: i) capa dolomítica (AF1), ii) carbonatos de perimare (AF2), iii) rampa carbonática influenciada por sismos (AF3), iv) cordão oolítico (AF4) e v) planície de maré com microbialitos (AF5).

A sequência basal S1 se inicia com a deposição da capa dolomítica com valores de  $^{13}\text{C}$  em torno de  $-5\text{‰ PDB}$ , contendo precipitados de fundo oceânico incomuns, como leques de aragonita e barita. O limite inferior desta sequência corresponde à discordância erosiva regional entre o embasamento Paleoproterozoico e a Formação Sete Lagoas, e o limite superior corresponde a discordância local que marca o topo da sucessão de rampa carbonática influenciada por sismos.

Precipitados de fundo oceânico sobrepondo estromatólitos dômicos da AF1 constituem um empilhamento retrogradacional, representando a migração do onlap costeiro devido à deglaciação e transgressão pós-Marinoana. Estes depósitos de carbonatos de capa foram interpretados como representativos dos estágios iniciais do trato de sistema transgressivo

(TST1), similar às capas carbonáticas na Namíbia, Canadá e China. A superfície de máxima inundação (MFS1) foi posicionada na camada que contém os precipitados de fundo oceânico devido ao fato de os leques estarem preservados e, por isso, terem sido formados abaixo do nível de ondas de tempo bom e tempestade.

Minerais autigênicos como por aragonita e barita já haviam sido descritos anteriormente por outros autores. No entanto, a identificação e descrição destes leques de aragonita e barita junto à cimentos apatíticos permitiu uma melhor compreensão dos seus mecanismos de formação no contexto da capa carbonática da Formação Sete Lagoas. Outros minerais diagenéticos também foram interpretados, como pirita e calcita. Ressalta-se aqui que a fosfatização em capas carbonáticas é descrita pela primeira vez neste trabalho (Capítulo 6, artigo “Phosphogenesis, aragonite fan formation and seafloor environments following the Marinoan glaciation”), bem como o processo que controla a precipitação de aragonita e apatita por ferro-redução na interface sedimento-água, permitindo a coexistência destas duas fases minerais.

O outro mineral que compõe os precipitados de fundo oceânico típicos de capa carbonática é a barita e, devido a sua importância na definição da idade Marinoana para os carbonatos de capa estudados, considerou-se discutir a origem e a história termal deste mineral (Capítulo 7, artigo “Hydrothermal influence on barite precipitates in the basal Ediacaran Sete Lagoas cap carbonate, São Francisco Craton, central Brazil”). Com base na análise de isótopos de enxofre no carbonato e na barita, espectroscopia Raman e análise de inclusões fluidas, foi constatado que a barita ainda preserva o sinal isotópico da água do mar, mesmo registrando temperaturas e salinidades condizentes com eventos de percolação de fluidos (e.g. hidrotermalismo). Desta forma, ainda que este mineral preserve o sinal isotópico original, é preciso cuidado analítico ao utilizar a barita da Fm. Sete Lagoas (e de outras unidades de mesma idade) para aferir condições geoquímicas e paleoambientais da água do mar.

Na seção Borrachudo, localizada no alto estrutural de Januária, não foram reconhecidas as associações de fácies AF2, AF3 e AF4, o que nos leva a interpretar um expressivo espessamento de seção na direção E-NE, possivelmente relacionado a um aumento expressivo na taxa de subsidência nesta porção da bacia (depocentro).

Fácies de perimará (AF2) formadas principalmente por microbialitos laminados, trombólitos e grainstones finos laminados, correspondem a uma sucessão típica de trato de mar alto (HST1) nesta porção da bacia. Neste ambiente de águas rasas, proliferaram-se os metazoários *Cloudina* e *Corumbella* associados à trombólitos e esteiras microbianas. Estes

depósitos de perimará são recobertos por brechas intraformacionais, interpretadas como flat-pebble breccia. Tal depósito é clasto-suportado, apresenta clastos angulosos e alongados ou oblatos. Não há evidências de deformação dúctil, o que sugere que estes clastos foram depositados como objetos rígidos praticamente na mesma posição em que originalmente se formaram. A presença de clastos em posição vertical, deformação aumentando para o topo, continuidade lateral das camadas brechadas e alternância de camadas deformadas e não-deformadas com contato abrupto sugerem fragmentação *in situ* de camadas de microbialitos previamente litificados devido ao impacto de ondas de choque relacionadas à atividade sísmica concomitante à sedimentação. Dados de direção dos clastos alongados da flat-pebble breccia da AF3 e de paleocorrentes dos grainstones oolíticos da AF4 indicam que a linha de costa original estava posicionada na direção NE-SW, com abertura oceânica para SE (quadrante E).

Barras e dunas oolíticas do cordão oolítico (AF4) recobrem a flat-pebble breccia e as fácies de perimará, configurando um padrão retrogradacional representativo dos estágios iniciais do segundo trato transgressivo (TST2). Embora a sucessão contendo grainstones oolíticos apresente 20-30 metros de espessura nas áreas de Arcos e Januária, tal sucessão pode alcançar centenas de metros na região de Montalvânia, sugerindo que a bacia era progressivamente mais profunda na direção E-NE (quadrante E). Este intervalo provavelmente reflete a produção carbonática máxima relacionada com o crescente aumento no espaço de acomodação no depocentro.

No topo da Formação Sete Lagoas, a fácies de brecha estromatolítica representa a exposição subaérea de microbialitos e corresponde ao limite inferior da sequência S3. Este intervalo é marcado pelo decréscimo na produção carbonática, desenvolvimento de uma superfície regional paleocárstica, seguida por um aumento de input terrígeno associado a uma transgressão representativa do início da sedimentação dos siltitos e margas da Fm. Serra de Santa Helena.

As amostras da Fm. Sete Lagoas submetidas às análises de isótopos de C e O tiveram seus valores originais aferidos a partir da relação  $^{13}\text{C}$  vs.  $^{18}\text{O}$  e razões Mn/Sr, sendo que a grande maioria delas foi considerada não alterada. As curvas isotópicas de  $^{13}\text{C}$  variam de -4.33 até 4.77 ‰ PDB, condizentes com valores previamente obtidos por outros autores, exceto pelos valores fortemente positivos do topo da unidade, que não foram encontrados no presente trabalho.

Por fim, uma das principais contribuições deste trabalho consiste na obtenção e interpretação de uma inédita curva isotópica de enxofre ( $S_{\text{CAS}}$ ) para a Formação Sete Lagoas, a qual associada com dados isotópicos de C e O obtidos para as mesmas seções, permitiram

delinear algumas condições paleoambientais. Na seção composta estudada, os valores isotópicos de  $^{34}\text{S}_{\text{CAS}}$  mostram co-variância com os valores de  $^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ , indicando que a pirita e o carbono orgânico foram oxidados e soterrados a uma mesma taxa. Este padrão é comumente encontrado em rochas do início do Fanerozoico. Além disso, as concentrações de CAS medidas mostram um pico de oxigenação na porção basal da unidade seguida por condições anóxicas, semelhante às estimativas anteriores do reservatório de sulfato em outras unidades do final do Ediacarano. Este pico de oxigenação precede estratigraficamente (local) e temporalmente (global) o surgimento dos organismos pertencentes à assembleia de Nama (*Cloudina*, *Namacalathus*, *Corumbella*, entre outros), considerada o último grande evento evolutivo antes da grande explosão de vida Cambriana.

## 10. Referências bibliográficas

- Abreu Lima, S.A., 1997. Fácies, ambiente deposicional e aspectos diagenéticos da Formação Sete Lagoas na região norte de Minas Gerais, Bacia do São Francisco. UFOP.
- Alkmim, F.F., Brito Neves, B.B., Castro Alves, J.A., 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco - Uma revisão, in: Dominguez, J.M.L., Misi, A. (Eds.), O Cráton São Francisco. SBG/Núcleo BA/SE, pp. 45–62.
- Alkmim, F.F., Chemale Jr, F., Endo, I., 1996. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco e o seu significado tectônico. Rev. Esc. Minas 49, 22–38.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., Pedrosa-Soares, A.C., Peres, G.G., Cruz, S.C.P., Whittington, A., 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. Precambrian Res. 149, 43–64.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. Mar. Pet. Geol. 33, 127–139.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos, in: Pinto, C.P., Martins-Neto, M.A. (Eds.), Bacia Do São Francisco: Geologia e Recursos Minerais. SBG/MG, Belo Horizonte-MG, pp. 9–30.
- Allen, P.A., Hoffman, P.F., 2005. Extreme winds and waves in the aftermath of a Neoproterozoic glaciation. Nature 433, 123–127.
- Allen, P.A., Leather, J., Brasier, M.D., 2004. The Neoproterozoic Fiq glaciation and its aftermath, Huqf supergroup of Oman. Basin Res. 16, 507–534.
- Alvarenga, C.J.S., Dardenne, M.A., Vieira, L.C., Martinho, C.T., Guimarães, E.M., Santos, R.V., Santana, R.O., 2012. Estratigrafia da borda ocidental da Bacia do São Francisco. Bol. Geociências Petrobrás 20, 145–164.
- Babinski, M., Pedrosa-Soares, A.C., Trindade, R.I.F., Martins, M., Noce, C.M., Liu, D., 2012. Neoproterozoic glacial deposits from the Araçuaí orogen, Brazil: age, provenance and correlations with the São Francisco craton and West Congo belt. Gondwana Res. 21, 451–465.
- Babinski, M., Vieira, L.C., Trindade, R.I.F., 2007. Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambuí Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. Terra Nov. 19, 401–406.
- Banner, J.A.Y.L., Hanson, G.N., 1990. Calculation of simultaneous isotopic and trace element

- variations during water-rock interaction with applications to carbonate diagenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 3123–3137.
- Bengtson, S., Morris, S.C., 1992. Early Radiation of Biomineralizing Phyla 447–481.
- Buatois, L.A., Mángano, M.G., 2018. The other biodiversity record: Innovations in animal-substrate interactions through geologic time. *GSA Today* 28, 4–10.
- Burdett, J.W., Arthur, M.A., Richardson, M., 1989. A Neogene seawater sulfur isotope age curve from calcareous pelagic microfossils. *Earth Planet. Sci. Lett.* 94, 189–198.
- Caetano-Filho, S., Macedo Paula-Santos, G., Guacaneme, C., Babinski, M., Bedoya-Rueda, C., Peloso, M., Amorim, K., Afonso, J., Kuchenbecker, M., Reis, H., Trindade, R.I.F., 2019. Sequence stratigraphy and chemostratigraphy of an Ediacaran-Cambrian foreland-related carbonate ramp (BambuÍ Group, Brazil). *Precambrian Res.* 331, 105365.
- Canfield, D.E., Poulton, S.W., Knol, A.H., Narbonne, G.M., Ross, G., Goldberg, T., Strauss, H., 2008. Ferruginous conditions dominated later neoproterozoic deep-water chemistry. *Science* (80- ). 321, 949–952.
- Canfield, D.E., Poulton, S.W., Narbonne, G.M., 2007a. Late-Neoproterozoic Deep-Ocean Oxygenation and the Rise of Animal Life. *Science* (80- ). 315, 92–95.
- Canfield, D.E., Poulton, S.W., Narbonne, G.M., Science, S., Series, N., Jan, N., Canfield, E., Narbonne, G.M., 2007b. Late-Neoproterozoic oxygenation and the rise of animal life. *Science* (80- ). 315, 92–95.
- Castro, A., Dardenne, M., 2000. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southwestern domain of the São Francisco Craton, Brazil. *Rev. Bras. Geociências* 30, 439–441.
- Castro, P.T.A., 1997. Os conglomerados associados ao Grupo Bambuí na porção sudoeste do Cráton do São Francisco: sedimentologia, estratigrafia e implicações tectônicas. Universidade de Brasília.
- Catuneanu, O., 2006. Principles of Sequence Stratigraphy, Changes.
- Caxito, F. de A., Halverson, G.P., Uhlein, A., Stevenson, R., Gonçalves Dias, T., Uhlein, G.J., 2012. Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Res.* 200–203, 38–58.
- Chang, H.K., Miranda, F.P., Magalhães, L., Alkmim, F.F., 1988. Considerações sobre a evolução tectônica da bacia do São Francisco, in: Proceedings of the 35th Congresso Brasileiro de Geologia, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Belém. pp. 2076–2090.
- Chiavegatto, J.R.S., 1992. Análise estratigráfica das sequências tempestíticas da Fm. Três Marias (Proterozoico Superior) na porção meridional da bacia do São Francisco.
- Chiavegatto, J.R.S., Gomes, N.S., Dardenne, M.A., Delgado, C.E.R., 2003. Estratigrafia do Grupo Bambuí nas regiões do norte de Minas Gerais: uma nova unidade estratigráfica em um contexto de inversão de bacia, in: XXII Simpósio de Geologia de Minas Gerais. SBG, Ouro Preto-MG.
- Clapham, M.E., Narbonne, G.M., 2002. Ediacaran epifaunal tiering. *Geology* 30, 627–630.
- Clapham, M.E., Narbonne, G.M., Gehling, J.G., 2003. Paleoecology of the oldest known animal communities: Ediacaran assemblages at Mistaken Point, Newfoundland. *Paleobiology* 29, 527–544.
- Coelho, J.C.C., Martins-Neto, M.A., Marinho, M.S., 2008. Estilos estruturais e evolução tectônica da porção mineira da bacia proterozóica do São Francisco. *Rev. Bras. Geociências* 38, 149–165.
- Corsetti, F.A., Lorentz, N.J., 2006. On Neoproterozoic Cap Carbonates as Chronostratigraphic Markers, in: Xiao, S., Kaufman, A.J. (Eds.), Neoproterozoic Geobiology and Paleobiology. pp. 273–294.
- Corsetti, F.A., Lorentz, N.J., Pruss, S.B., 2004. Formerly-Aragonite Seafloor Fans from Neoproterozoic Strata, Death Valley and Southeastern Idaho, United States: Implications



- for “Cap Carbonate” Formation and Snowball Earth. *Extrem. Proterozoic Geol. Geochemistry, Clim.* 33–44.
- Corsetti, F.A., Olcott, A.N., Bakermans, C., 2006. The biotic response to Neoproterozoic snowball earth. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 232, 114–130.
- Costa, M.T., Branco, J.J.R., 1961. Roteiro para a excursão Belo Horizonte-Brasília, in: *Congresso Brasileiro de Geologia*. pp. 15–25.
- Cox, G.M., Halverson, G.P., Minarik, W.G., Le, D.P., Macdonald, F.A., Bellefroid, E.J., Strauss, J. V, 2013. Neoproterozoic iron formation: An evaluation of its temporal, environmental and tectonic significance. *Chem. Geol.* 362, 232–249.
- Cox, G.M., Halverson, G.P., Poirier, A., Le, D., Strauss, J. V, Stevenson, R., 2016. A model for Cryogenian iron formation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 433, 280–292.
- Crockford, P.W., Hodgskiss, M.S.W., Uhlein, G.J., Caxito, F., Hayles, J.A., Halverson, G.P., 2017. Linking paleocontinents through triple oxygen isotope anomalies. *Geology* 46, 179–182.
- Cruz, N.M.C., Nobre-Lopes, J., 1992. Microfósseis do Grupo Bambuí na região de Arcos, Minas Gerais. *An. Acad. Bras. Cienc.* 64, 420.
- D’Agrella-Filho, M.S., Babinski, M., Trindade, R.I.F., Van Schmus, W.R., Ernesto, M., 2000. Simultaneous remagnetization and U-Pb isotope resetting in Neoproterozoic carbonates of the Sao Francisco craton, Brazil. *Precambrian Res.* 99, 179–196.
- da Silva, L.C., Pedrosa-Soares, A.C., Armstrong, R., Noce, C.M., 2011. Determinando a duração do período colisional do Orógeno Araçuaí com base em geocronologia U-Pb de alta resolução em zircão : uma contribuição para a história da amalgamação do Gondwana Ocidental. *Geonomos* 19, 180–197.
- Dardenne, M.A., 2000. The Brasília Fold Belt, in: Cordani, U.G., Milani, A.J., Thomaz-Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, Brazil, pp. 231–264.
- Dardenne, M.A., 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central, in: *Anais Do XXX Congresso Brasileiro de Geologia*. Recife, pp. 597–610.
- Derry, L.A., 2010. A burial diagenesis origin for the Ediacaran Shuram-Wonoka carbon isotope anomaly. *Earth Planet. Sci. Lett.* 294, 152–162.
- Deynoux, M., 1985. Terrestrial or waterlain glacial diamictites? Three case studies from the Late Precambrian and Late Ordovician glacial drifts in West Africa. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 51, 97–141.
- Drummond, J.B.R., Pufahl, P.K., Porto, C.G., Carvalho, M., 2015. Neoproterozoic peritidal phosphorite from the Sete Lagoas Formation (Brazil) and the Precambrian phosphorus cycle. *Sedimentology* 62, 1978–2008.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional textures 108–121.
- Embry, A.F., Klován, J.E., 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bull. Can. Pet. Geol.* 19, 730–781.
- Evans, D.A.D., 2000. Stratigraphic, geochronological and paleomagnetic constraints upon the Neoproterozoic climatic paradox. *Am. J. Sci.* 347–433.
- Evans, D.A.D., Raub, T.D., 2011. Neoproterozoic glacial palaeolatitudes: a global update, in: *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*. pp. 93–112.
- Eyles, N., Januszczak, N., 2004. “Zipper-rift”: A tectonic model for Neoproterozoic glaciations during the breakup of Rodinia after 750 Ma. *Earth-Science Rev.* 65, 1–73.
- Fairchild, I.J., Kennedy, M.J., 2007. Neoproterozoic glaciation in the Earth System. *J. Geol. Soc. London* 164, 895–921.
- Fairchild, T.R., Schopf, J.W., Shen-Miller, J., Guimarães, E.M., Edwards, M.D., Lagstein, A.,

- Xiao, L., Pabst, M., Melo-Filho, L.S., 1996. Recent discoveries of Proterozoic microfossils in south-central Brazil. *Precambrian Res.* 80, 125–152.
- Fairchild, T.R., Subacius, S.M.R., 1986. Microfossils associated with silicified *Stratifera undata* Komar 1966 from the Late Proterozoic Bambuí Group, south-central Brazil. *Precambrian Res.* 33, 323–339.
- Fanning, C.M., Link, P.K., 2004. U-Pb SHRIMP ages of Neoproterozoic (Sturtian) glaciogenic Pocatello Formation, southeastern Idaho. *Geology* 32, 881–884.
- Fike, D.A., Grotzinger, J.P., Pratt, L.M., Summons, R.E., 2006. Oxidation of the Ediacaran ocean. *Nature* 444, 744–747.
- Frei, R., Gaucher, C., Poulton, S.W., Canfield, D.E., 2009. Fluctuations in Precambrian atmospheric oxygenation recorded by chromium isotopes. *Nature* 461, 250–253.
- Frimmel, H.E., Fo, P.G., 2002. Chemostratigraphic correlation of carbonate successions in the Gariiep and Saldania Belts, Namibia and South Africa. *Basin Res.*
- Gehling, J.G., Rigby, J.K., 1996. Long expected sponges from the Neoproterozoic Ediacara Fauna of South Australia. *J. Paleontol.* 70, 185–195.
- Gellatly, A.M., Lyons, T.W., 2005. Trace sulfate in mid-Proterozoic carbonates and the sulfur isotope record of biospheric evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 3813–3829.
- Germis, G.J.B., 1972. New shelly fossils from Nama Group, South West Africa. *Am. J. Sci.* 272, 752–761.
- Glenn, C.R., Föllmi, K.B., Grimm, K.A., Sadaqah, R.M.Y., Schidlowski, M., Sheldon, R.E., Siegmund, H., 1994. Phosphorus and Phosphorites: Sedimentology and Environments of Formation. *Eclogae Geol. Helv.* 87, 747–788.
- Grant, S.W., 1992. Carbon isotopic vital effect and organic diagenesis, Lower Cambrian Forteau Formation, northwest Newfoundland: Implications for  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy. *Geology* 20, 243–246.
- Grant, S.W., 1990. Shell structure and distribution of Cloudina, a potential index fossil for the terminal Proterozoic. *Am. J. Sci.* 290-A, 261–294.
- Grazhdankin, D., Seilacher, A., 2005. A re-examination of the Nama-type Vendian organism *Rangaea schneiderhoehni*. *Geol. Mag.* 142, 571.
- Grazhdankin, D., Seilacher, A., 2002. Underground Vendobionta from Namibia. *Palaeontology* 45, 57–78.
- Grotzinger, J.P., Knoll, A.H., 1995. Anomalous carbonate precipitates: Is the Precambrian the key to the Permian? *Palaios* 10, 578–596.
- Grotzinger, J.P., Watters, W.A., Knoll, A.H., 2000. Calcified metazoans in thrombolite-stromatolite reefs of the terminal Proterozoic Nama Group, Namibia. *Paleobiology* 26, 334–359.
- Guimarães, E.M., 1997. Estudos de proveniência e diagênese, com ênfase na caracterização dos filossilicatos dos grupos Paranoá e Bambuí, na região de Bezerra e Cabeceiras-GO. Universidade de Brasília.
- Halverson, G.P., Hoffman, P.F., Schrag, D.P., Maloof, A.C., Rice, A.H.N., 2005. Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record. *Bull. Geol. Soc. Am.* 117, 1181–1207.
- Halverson, G.P., Wade, B.P., Hurtgen, M.T., Barovich, K.M., 2010. Neoproterozoic chemostratigraphy. *Precambrian Res.* 182, 337–350.
- Hemming, N.G., Meyers, W.J., Grams, J.C., 1989. Cathodoluminescence in diagenetic calcites: the roles of Fe and Mn as deduced from electron probe and spectrophotometric measurements. *J. Sediment. Res.* 59, 404–411.
- Hidalgo, R., 2007. Vida após glaciações globais neoproterozóicas: um estudo microfossilífero de capas carbonáticas dos crátons do São Francisco e Amazônico.
- Higgins, J.A., Schrag, D.P., 2003. Aftermath of a snowball Earth. *Geochemistry, Geophys.*

- Geosystems 4, 1–20.
- Hoffman, P.F., 1999. The break-up of Rodinia, birth of Gondwana, true polar wander and the snowball Earth. *J. African Earth Sci.* 28, 17–33.
- Hoffman, P.F., Halverson, G.P., 2011. Chapter 36 Neoproterozoic glacial record in the Mackenzie Mountains, northern Canadian Cordillera. *Geol. Soc. London, Mem.* 36, 397–412.
- Hoffman, P.F., Halverson, G.P., Domack, E.W., Husson, J.M., Higgins, J.A., Schrag, D.P., 2007. Are basal Ediacaran (635 Ma) post-glacial “cap dolostones” diachronous? *Earth Planet. Sci. Lett.* 258, 114–131.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P., Schrag, D.P., 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science* (80-. ). 281, 1342–1346.
- Hoffman, P.F., Li, Z.X., 2009. A palaeogeographic context for Neoproterozoic glaciation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 277, 158–172.
- Hoffman, P.F., Macdonald, F. a., Halverson, G.P., 2011. Chemical sediments associated with Neoproterozoic glaciation: iron formation, cap carbonate, barite and phosphorite. *Geol. Soc. London, Mem.* 36, 67–80.
- Hoffman, P.F., Schrag, D.P., 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nov.* 14, 129–155.
- Hoffmann, K.H., Condon, D.J., Bowring, S.A., Crowley, J.L., 2004. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation Namibia: Constraints on Marinoan glaciation. *Geology* 32, 817–820.
- Huang, J., Chu, X., Lyons, T.W., Sun, T., Feng, L., Zhang, Q., Chang, H., 2013. The sulfur isotope signatures of Marinoan deglaciation captured in Neoproterozoic shallow-to-deep cap carbonate from South China. *Precambrian Res.* 238, 42–51.
- James, N.P., Narbonne, G.M., Kyser, T.K., 2001. Late Neoproterozoic cap carbonates: Mackenzie Mountains, northwestern Canada: precipitation and global glacial meltdown. *Can. J. Earth Sci.* 38, 1229–1262.
- Jensen, S., 2006. The Proterozoic and Earliest Cambrian Trace Fossil Record; Patterns, Problems and Perspectives. *Integr. Comp. Biol.* 43, 219–228.
- Jensen, S., Droser, M.L., Gehling, J.G., 2006. A critical look at Ediacaran trace fossil record, in: *Neoproterozoic Geobiology and Paleobiology*. pp. 115–157.
- Jiang, G., Kaufman, A.J., Christie-Blick, N., Zhang, S., Wu, H., 2007. Carbon isotope variability across the Ediacaran Yangtze platform in South China: Implications for a large surface-to-deep ocean  $\delta^{13}\text{C}$  gradient. *Earth Planet. Sci. Lett.* 261, 303–320.
- Jiang, G., Kennedy, M.J., Christie-Blick, N., 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature* 426, 822–826.
- Jiang, G., Kennedy, M.J., Christie-Blick, N., Wu, H., Zhang, S., 2006. Stratigraphy, Sedimentary Structures, and Textures of the Late Neoproterozoic Doushantuo Cap Carbonate in South China. *J. Sediment. Res.* 76, 978–995.
- Johnston, D.T., Poulton, S.W., Tosca, N.J., O’Brien, T., Halverson, G.P., Schrag, D.P., Macdonald, F.A., 2013. Searching for an oxygenation event in the fossiliferous Ediacaran of northwestern Canada. *Chem. Geol.* 362, 273–286.
- Kaufman, A.J., Hayes, J.M., Knoll, A.H., Germs, G.J.B., 1991. Isotopic compositions of carbonates and organic carbon from upper Proterozoic successions in Namibia: stratigraphic variation and the effects of diagenesis and metamorphism. *Precambrian Res.* 49, 301–327.
- Kaufman, A.J., Jacobsen, S.B., Knoll, A.H., 1993. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate. *Earth Planet. Sci. Lett.* 120, 409–430.

- Kaufman, A.J., Knoll, A.H., 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Res.* 73, 27–49.
- Kaufman, A.J., Knoll, A.H., Narbonne, G.M., 1997. Isotopes, ice ages, and terminal Proterozoic earth history. *Geology* 94, 6600–6605.
- Kennedy, M.J., 1996. Stratigraphy, sedimentology, and isotopic geochemistry of Australian Neoproterozoic postglacial cap dolostones; deglaciation, delta 13 C excursions, and carbonate precipitation. *J. Sediment. Res.* 66, 1050–1064.
- Kennedy, M.J., Christie-Blick, N., Sohl, L.E., 2001. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest intervals? *Geology* 29, 443–446.
- Kennedy, M.J., Runnegar, B., Prave, A.R., Hoffman, K.-H., Arthur, M.A., 1998. Two or four Neoproterozoic glaciations? *Geology* 26, 1059–1063.
- Kerans, C., Tinker, S.W., 1997. Sequence stratigraphy and characterization of carbonate reservoirs, in: *SEPM Short Course Notes*. p. 10p.
- Kirschvink, J.L., 1992. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the snowball Earth. *Proterozoic Biosph.* 52, 51–52.
- Knoll, A.H., Hayes, J.M., Kaufman, A.J., Swett, K., Lambert, I.B., 1986. Secular variation in carbon isotope ratios from Upper Proterozoic successions of Svalbard and East Greenland. *Nature* 321, 832–838.
- Kontorovich, A.E., Varlamov, A.I., Grazhdankin, D. V., Karlova, G.A., Klets, A.G., Kontorovich, V.A., Saraev, S. V., Terleev, A.A., Belyaev, S.Y., Varaksina, I. V., Efimov, A.S., Kochnev, B.B., Nagovitsin, K.E., Postnikov, A.A., Filippov, Y.F., 2008. A section of Vendian in the east of West Siberian Plate (based on data from the Borehole Vostok 3). *Russ. Geol. Geophys.* 49, 932–939.
- Kruse, P.D., Zhuravlev, A.Y., James, N.P., 1995. Primordial metazoan-calcimicrobial reefs: Tommotian (Early Cambrian) of the Siberian Platform. *Palaios* 10, 291–321.
- Kuchenbecker, M., 2011. Quimioestratigrafia e proveniência sedimentar da porção basal do Grupo Bambuí em Arcos (MG).
- Kuchenbecker, M., Atman, D., Da Costa, R.D., Pedrosa-Soares, A.C., Babinski, M., 2016a. A Formação Gorutuba: Sedimentação litorânea a continental na margem leste da Bacia Bambuí (MG). *Geol. USP - Ser. Cient.* 16, 67–81.
- Kuchenbecker, M., Pedrosa-Soares, A.C., Lopes-Silva, L., Babinski, M., Pimenta, F., 2016b. Chemostratigraphy of the lower Bambuí Group, southwestern São Francisco Craton, Brazil: insights on Gondwana paleoenvironments. *Brazilian J. Geol.* 46, 145–162.
- Lamb, M.P., Fischer, W.W., Raub, T.D., Taylor Perron, J., Myrow, P.M., 2012. Origin of giant wave ripples in snowball earth cap carbonate. *Geology* 40, 827–830.
- Le Heron, D.P., Cox, G., Trundle, A., Collins, A.S., 2011. Two Cryogenian glacial successions compared: Aspects of the Sturt and Elatina sediment records of South Australia. *Precambrian Res.* 186, 147–168.
- Li, C., Love, G.D., Lyons, T.W., Fike, D.A., Sessions, A.L., Chu, X., 2010. A stratified redox model for the Ediacaran ocean. *Science* (80-. ). 328, 80–83.
- Lima, O.N.B., 2005. Grupo Bambuí: estratigrafia regional no Alto Rio São Francisco e geologia dos depósitos fosfáticos da Serra da Saudade. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Ling, H.F., Chen, X., Li, D., Wang, D., Shields-Zhou, G.A., Zhu, M., 2013. Cerium anomaly variations in Ediacaran-earliest Cambrian carbonates from the Yangtze Gorges area, South China: Implications for oxygenation of coeval shallow seawater. *Precambrian Res.* 225, 110–127.
- Linnemann, U., Ovtcharova, M., Schaltegger, U., Gärtner, A., Hautmann, M., Geyer, G., Vickers-Rich, P., Rich, T., Plessen, B., Hofmann, M., Zieger, J., Krause, R., Kriesfeld, L.,

- Smith, J., 2019. New high-resolution age data from the Ediacaran–Cambrian boundary indicate rapid, ecologically driven onset of the Cambrian explosion. *Terra Nov.* 31, 49–58.
- Lorentz, N.J., Corsetti, F.A., Link, P.K., 2004. Seafloor precipitates and C-isotope stratigraphy from the Neoproterozoic Scout Mountain Member of the Pocatello Formation, southeast Idaho: Implications for Neoproterozoic earth system behavior. *Precambrian Res.* 130, 57–70.
- Macdonald, F.A., Strauss, J. V., Sperling, E.A., Halverson, G.P., Narbonne, G.M., Johnston, D.T., Kunzmann, M., Schrag, D.P., Higgins, J.A., 2013. The stratigraphic relationship between the Shuram carbon isotope excursion, the oxygenation of Neoproterozoic oceans, and the first appearance of the Ediacara biota and bilaterian trace fossils in northwestern Canada. *Chem. Geol.* 362, 250–272.
- Marchese, H.G., 1974. Estromatólitos “Gymnosolenideos” em el lado oriental de Minas Gerais, Brasil. *Rev. Bras. Geociências* 4, 257–271.
- Marshak, S., Alkmim, F.F., 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics* 8, 555–571.
- Martins-Neto, M.A., 2009. Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Mar. Pet. Geol.* 26, 163–176.
- Martins, M., 1999. Análise estratigráfica das seqüências mesoproterozóicas (borda oeste) e neoproterozóicas da Bacia do São Francisco. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Martins, M., Lemos, V., 2007. Análise estratigráfica das seqüências neoproterozóicas da Bacia do São Francisco. *Brazilian J. Geol.* 37, 156–167.
- McFadden, K. A., Huang, J., Chu, X., Jiang, G., Kaufman, A.J., Zhou, C., Yuan, X., Xiao, S., 2008. Pulsed oxidation and biological evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 3197–3202.
- McFadden, Kathleen A., Huang, J., Chu, X., Jiang, G., Kaufman, A.J., Zhou, C., Yuan, X., Xiao, S., 2008. Pulsed oxidation and biological evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 3197–3202.
- McMechan, M.E., 2000. Vreeland Diamictites - Neoproterozoic glaciogenic slope deposits, Rocky Mountains, northeast British Columbia. *Bull. Can. Pet. Geol.* 48, 246–261.
- Misi, A., Teixeira, J.B.G., Azmy, K., Veizer, J., Boggiani, P.C., Iyer, S.S.S., Gaucher, C., Kaufman, A.J., Powis, K., Sanches, A.L., 2007. Chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic successions in South America. *Chem. Geol.* 237, 143–167.
- Mitchum, R.M., Van Wagoner, J.C., 1991. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles. *Sediment. Geol.* 70, 1–2.
- Morris, S.C., Mattes, B.W., Chen Menge, 1990. The early skeletal organism *Cloudina*: new occurrences from Oman and possibly China. *Am. J. Sci.* 290 A, 245–260.
- Myrow, P.M., Kaufman, A.J., 2012. A newly discovered cap carbonate above Varanger-age glacial deposits in Newfoundland, Canada. *J. Sediment. Res.* 69, 784–793.
- Narbonne, G.M., 2005. The Ediacara Biota: Neoproterozoic origin of animals and their ecosystems. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 33, 421–442.
- Narbonne, G.M., Gehling, J.G., 2003. Life after snowball: The oldest complex Ediacaran fossils. *Geology* 31, 27–30.
- Narbonne, G.M., Saylor, B.Z., Grotzinger, J.P., 1997. The youngest Ediacaran fossils from Southern Africa. *J. Paleontol.* 71, 953–967.
- Nelson, G.J., Pufahl, P.K., Hiatt, E.E., 2010. Paleooceanographic constraints on Precambrian phosphorite accumulation, Baraga Group, Michigan, USA. *Sediment. Geol.* 226, 9–21.
- Nobre-Lopes, J., 2002. Diagenesis of the dolomites hosting Zn/Ag mineral deposits in the

- Bambuú Group at Januária region (MG). Unpublished PhD thesis, University of Campinas, Campinas-SP, Brazil. 229p.
- Nobre-Lopes, J., 1995. Faciologia e gênese dos carbonatos do Grupo Bambuí na região de Arcos, estado de Minas Gerais.
- Nobre-Lopes, J., Coimbra, A.M., 2000. Microfitólitos associados a construções estromatolíticas do Grupo Bambuí, Proterozóico Superior, na região de Arcos - MG. *Rev. Bras. Geociências* 30, 589–592.
- Nogueira, A.C.R., 2003. A plataforma carbonática Araras no sudoeste do cráton Amazônico, Mato Grosso: estratigrafia, contexto paleoambiental e correlação com os eventos glaciais do Neoproterozóico.
- Nogueira, A.C.R., Riccomini, C., Nóbrega Sial, A., Veloso Moura, C.A., Fairchild, T.R., 2003. Soft-sediment deformation at the base of the Neoproterozoic Puga cap carbonate (southwestern Amazon craton, Brazil): Confirmation of rapid icehouse to greenhouse transition in snowball Earth. *Geology* 31, 613–616.
- Och, L.M., Shields-Zhou, G.A., 2012. The Neoproterozoic oxygenation event: Environmental perturbations and biogeochemical cycling. *Earth-Science Rev.* 110, 26–57.
- Papineau, D., 2010. Global Biogeochemical Changes at Both Ends of the Proterozoic: Insights from Phosphorites. *Astrobiology* 10, 165–181.
- Paula-Santos, G.M., 2012. Químioestratigrafia isotópica (C, O, Sr) e geocronologia (U-Pb, Sm-Nd) das rochas da Formação Sete Lagoas, Grupo Bambuí.
- Paula-Santos, G.M., Babinski, M., Kuchenbecker, M., Caetano-Filho, S., Trindade, R.I., Pedrosa-Soares, A.C., 2015. New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U-Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Res.* 28, 702–720.
- Peryt, T.M., Hoppe, a, Bechstädt, T., Koster, J., Pierre, C., Richter, D.K., 1990. Late Proterozoic aragonitic cement crusts, Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil. *Sedimentology* 37, 279–286.
- Pimentel, M.M., Rodrigues, J.B., DellaGiustina, M.E.S., Junges, S., Matteini, M., Armstrong, R., 2011. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U-Pb sedimentary provenance data: A review. *J. South Am. Earth Sci.* 31, 345–357.
- Posamentier, H.W., Jervey, M.T., Vail, P.R., 1988. Eustatic controls on clastic deposition I - Conceptual framework, in: Wilgus, C.K., Hastings, B.J., Posamentier, H.W., Van Wagoner, J.C., Ross, C.A., Kendall, C.G. (Eds.), *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publications 42, pp. 109–124.
- Potter, P.E., Pettijohn, F.J., 1977. *Paleocurrents and basin analysis*, 2nd ed. ed. Springer-Verlag, New York.
- Poulton, S.W., Butterfield, N.J., Shields-Zhou, G.A., Lenton, T.M., Boyle, R.A., 2014. Co-evolution of eukaryotes and ocean oxygenation in the Neoproterozoic era. *Nat. Geosci.* 7, 257–265.
- Pruss, S.B., Corsetti, F.A., Fischer, W.W., 2008. Seafloor-precipitated carbonate fans in the Neoproterozoic Rainstorm Member, Johnnie Formation, Death Valley Region, USA. *Sediment. Geol.* 207, 34–40.
- Pu, J.P., Bowring, S.A., Ramezani, J., Myrow, P., Raub, T.D., Landing, E., Mills, A., Hodgkin, E., Macdonald, F.A., 2016. Dodging snowballs: Geochronology of the Gaskiers glaciation and the first appearance of the Ediacaran biota. *Geology* 44, 955–958.
- Ridgwell, A.J., Kennedy, M.J., Caldeira, K., 2003. Carbonate Deposition, Climate Stability, and Neoproterozoic Ice Ages. *Science* (80-. ). 302, 859–862.

- Rodrigues, J.B., 2008. Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí – Um estudo de zircões detríticos e Idades Modelo Sm-Nd. Universidade de Brasília.
- Romeiro-Silva, P.C., Zalán, P.V., 2005. Contribuição da sísmica de reflexão na determinação do limite oeste do cráton São Francisco, in: *Simpósio Sobre o Cráton Do São Francisco*. pp. 44–47.
- Rothman, D.H., Hayes, J.M., Summons, R.E., 2003. Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 100, 8124–8129.
- Sahoo, S.K., Planavsky, N.J., Jiang, G., Kendall, B., Owens, J.D., Wang, X., Shi, X., Anbar, A.D., Lyons, T.W., 2016. Oceanic oxygenation events in the anoxic Ediacaran ocean. *Geobiology* 14, 457–468.
- Sanchez, E.A.M., 2014. Microbialitos e microfósseis da Formação Sete Lagoas, Neoproterozoico, Brasil: implicações geomicrobiológicas em um contexto de mudanças climáticas e evolutivas. Universidade de São Paulo.
- Schöll, W.U., 1976. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco, in: *Congresso Brasileiro de Geologia*, v.29, Anais. pp. 207–231.
- Seer, H.J., Moraes, L.C., Fogaça, A.C.C., 1987. Faciologia e estruturação tectônica dos metassedimentos com diamictitos e jaspilitos da região de Lagoa Formosa, MG (Grupo Bambuí?), in: *Simpósio de Geologia de Minas Gerais*. SBG/Núcleo Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, pp. 199–213.
- Shen, B., Xiao, S., Kaufman, A.J., Bao, H., Zhou, C., Wang, H., 2008. Stratification and mixing of a post-glacial Neoproterozoic ocean: Evidence from carbon and sulfur isotopes in a cap dolostone from northwest China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 265, 209–228.
- Shields, G.A., Deynoux, M., Strauss, H., Paquet, H., Nahon, D., 2007. Barite-bearing cap dolostones of the Taoudéni Basin, northwest Africa: Sedimentary and isotopic evidence for methane seepage after a Neoproterozoic glaciation. *Precambrian Res.* 153, 209–235.
- Sial, A.N., Gaucher, C., Misi, A., Boggiani, P.C., Alvarenga, C.J.S. de, Ferreira, V.P., Pimentel, M.M., Pedreira, J.A., Warren, L.V., Fernández-Ramírez, R., Geraldés, M., Pereira, N.S., Chiglino, L., Cezario, W. dos S., 2016. Correlations of some Neoproterozoic carbonate-dominated successions in South America based on high-resolution chemostratigraphy, *Brazilian Journal of Geology*.
- Simonetti, C., Fairchild, T.R., 1989. Paleobiologia de uma nova microflórula silicificada do Grupo Bambuí (Proterozoico Superior) da região de Unaí, MG, in: *Boletim IG-USP*. pp. 1–25.
- Sommer, F.W., 1982. Mais oncólitos do Calcário Bambuí de Minas Gerais. *An. Acad. Bras. Cienc.* 54, 343–349.
- Sommer, F.W., 1981. Oncólitos do Calcário Bambuí de Minas Gerais. *An. Acad. Bras. Cienc.* 53, 785–791.
- Sommer, F.W., 1971. Microfósseis do Calcário Bambuí, de Pedro Leopoldo, Estado de Minas Gerais. *An. Acad. Bras. Cienc.* 43, 135–139.
- Spence, G.H., Heron, D. Le, Fairchild, I., 2016. Sedimentological perspectives on climatic, atmospheric and environmental change in the Neoproterozoic Era. *Sedimentology* 63, 253–306.
- Sumner, D.Y., Grotzinger, J.P., 2004. Implications for Neoproterozoic ocean chemistry from primary carbonate mineralogy of the Campbell-Malmani Platform, South Africa. *Sedimentology* 51, 1–27.
- Tostevin, R., Clarkson, M.O., Gangl, S., Shields, G.A., Wood, R.A., Bowyer, F., Penny, A.M., Stirling, C.H., 2019. Uranium isotope evidence for an expansion of anoxia in terminal Ediacaran oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.* 506, 104–112.

- Tostevin, R., He, T., Turchyn, A. V., Wood, R.A., Penny, A.M., Bowyer, F., Antler, G., Shields, G.A., 2017. Constraints on the late Ediacaran sulfur cycle from carbonate associated sulfate. *Precambrian Res.* 290, 113–125.
- Trindade, R.I.F., Macouin, M., 2007. Palaeolatitude of glacial deposits and palaeogeography of Neoproterozoic ice ages. *Comptes Rendus - Geosci.* 339, 200–211.
- Uchio, Y., Isozaki, Y., Buslov, M.M., Maruyama, S., 2008. Occurrence of phosphatic microfossils in an Ediacaran-Cambrian mid-oceanic paleo-atoll limestone of southern Siberia. *Gondwana Res.* 14, 183–192.
- Uhlein, A., Alvarenga, C.J.S., Dardenne, M.A., Trompette, R., 2011a. The glaciogenic Jequitáí Formation, southeastern Brazil, in: Arnaud, E., Halverson, G.P., Shields-Zhou, G. (Eds.), *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*. Geological Society of London Memoir 36, London, pp. 51–66.
- Uhlein, A., Alvarenga, C.J.S., Trompette, R., Dupont, H.S.J.B., Egydio-Silva, M., Cukrov, N., Lima, O.N.B., 2004. Glaciação neoproterozóica sobre o Cráton do São Francisco e faixas dobradas adjacentes, in: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito Neves, B.B. (Eds.), *Geologia Do Continente Sul-Americano*. Editora Beca, pp. 539–553.
- Uhlein, A., Baptista, M.C., Seer, H.J., Caxito, F. de A., Uhlein, G.J., Dardenne, M.A., 2011b. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): sistema deposicional de leque submarino em bacia de antepaís. *Geonomos* 19, 163–172.
- Uhlein, A., Baptista, M.C., Seer, H.J., Caxito, F.D.A., Uhlein, G.J., Dardenne, M.A., 2011c. A Formação Lagoa Formosa , Grupo Bambuí (MG): sistema deposicional de leque submarino em bacia de antepaís. *Geonomos* 19, 163–172.
- Uhlein, G.J., Uhlein, A., Pereira, E., Caxito, F.A., Okubo, J., Warren, L.V., Sial, A.N., 2019. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate-siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 517, 39–51.
- Uhlein, G.J., Uhlein, A., Stevenson, R., Halverson, G.P., Caxito, F.A., Cox, G.M., 2017. Early to late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Res.* 299, 101–116.
- Vail, P.R., Audemard, F., Bowman, S.A., Eisner, P.N., Perez-Cruz, G., 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentation: an overview, in: Einsele, G., Riken, W., Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, pp. 617–659.
- Vail, P.R., Mitchum, R.M., Thompson, S., 1977. Seismic stratigraphy and global changes in sea level, in: Payton, C.E. (Ed.), *Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir 26, pp. 63–97.
- Valeriano, C.M., 1992. Evolução tectônica da extremidade meridional da Faixa Brasília, região da Represa de Furnas, sudoeste de Minas Gerais. Universidade de São Paulo.
- Valeriano, C.M., Teixeira, W., Heilbron, M., Simões, L.S.A., 2000. Southern Brasília belt (SE Brazil): tectonic discontinuities , K-Ar data and evolution during the Neoproterozoic Brasiliano orogeny. *Rev. Bras. Geociências* 30, 195–199.
- van Loon, A.J., 2008. Could “Snowball Earth” have left thick glaciomarine deposits? *Gondwana Res.* 14, 73–81.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutitt, T.S., Handerbo, J., 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions, in: Wilgus, C.K., Hastings, B.J., Posamentier, H.W., Van Wagoner, J.C., Ross, C.A., Kendall, C.G. (Eds.), *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publications 42, pp. 30–45.
- Vieira, L.C., 2007. A Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí) e as variações paleoambientais no final do Proterozóico. Universidade de São Paulo.
- Vieira, L.C., Almeida, R.P., Trindade, R.I.F., 2007a. A Formação Sete Lagoas em sua área-



- tipo: fácies, estratigrafia e sistemas deposicionais. *Brazilian J. Geol.* 37, 1–14.
- Vieira, L.C., Nédélec, A., Fabre, S., Trindade, R.I.F., Almeida, R.P.D.E., 2015. Aragonite Crystal Fans in Neoproterozoic Cap Carbonates: a Case Study From Brazil and Implications for the Post – Snowball Earth Coastal Environment. *J. Sediment. Res.* 85, 285–300.
- Vieira, L.C., Trindade, R.I.F., Nogueira, A.C.R., Ader, M., 2007b. Identification of a Sturtian cap carbonate in the Neoproterozoic Sete Lagoas carbonate platform, Bambuí Group, Brazil. *Comptes Rendus - Geosci.* 339, 240–258.
- Walker, R.G., 2006. Facies models revisited: Introduction, in: Posamentier, H.W., Walker, R.G. (Eds.), *Facies Models Revisited*. Society of Sedimentary Geology, pp. 1–18.
- Walker, R.G., 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts, in: Walker, R.G., James, N.P. (Eds.), *Facies Models - Response to Sea Level Change*. Geological Association of Canada, pp. 1–14.
- Warren, L.V., 2011. Tectônica e sedimentação do Grupo Itapucumi (Neoproterozoico, Paraguai Setentrional). Universidade de São Paulo.
- Warren, L. V., Fairchild, T.R., Gaucher, C., Boggiani, P.C., Poiré, D.G., Anelli, L.E., Inchausti, J.C.G., 2011. Corumbella and in situ Cloudina in association with thrombolites in the Ediacaran Itapucumi Group, Paraguay. *Terra Nov.* 23, 382–389.
- Warren, L. V., Quaglio, F., Riccomini, C., Simões, M.G., Poiré, D.G., Strikis, N.M., Anelli, L.E., Strikis, P.C., 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil Cloudina reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology* 42, 391–394.
- Wei, H., Wang, X., Shi, X., Jiang, G., Tang, D., Wang, L., An, Z., 2019. Iodine content of the carbonates from the Doushantuo Formation and shallow ocean redox change on the Ediacaran Yangtze Platform, South China. *Precambrian Res.* 322, 160–169.
- Williams, G.E., 1975. Late Precambrian glacial climate and the Earth's obliquity. *Geol. Mag.* 112, 441–465.
- Williams, G.E., Gostin, V.A., McKirdy, D.M., Preiss, W. V., 2008. The Elatina glaciation, late Cryogenian (Marinoan Epoch), South Australia: Sedimentary facies and palaeoenvironments. *Precambrian Res.* 163, 307–331.
- Wood, R.A., 2011. Paleocology of the earliest skeletal metazoan communities: Implications for early biomineralization. *Earth-Science Rev.* 106, 184–190.
- Wood, R.A., Grotzinger, J.P., Dickson, J.A.D., 2002. Proterozoic modular biomineralized metazoan from the Nama Group, Namibia. *Science* (80- ). 296, 2383–2386.
- Xiao, S., Knoll, A.H., 1999. Fossil preservation in the Neoproterozoic Doushantuo phosphorite Lagerstätte, South China. *Lethaia* 32, 219–240.
- Xiao, S., Laflamme, M., 2009. On the eve of animal radiation: phylogeny, ecology and evolution of the Ediacara biota. *Trends Ecol. Evol.* 24, 31–40.
- Xiao, S., Narbonne, G.M., Zhou, C., Laflamme, M., Grazhdankin, D. V., Moczydlowska-Vidal, M., Cui, H., 2016. Towards an Ediacaran Time Scale: Problems, Protocols, and Prospects. *Episodes* 39, 540.
- Xiao, S., Zhang, Y., Knoll, A.H., 1998. Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in a neoproterozoic phosphorite. *Nature* 391, 553–558.
- Xiao, S., Zhou, C., Liu, P., Wang, D., Yuan, X., 2014. Phosphatized Acanthomorphic Acritarchs and Related Microfossils from the Ediacaran Doushantuo Formation at Weng'an (South China) and their Implications for Biostratigraphic Correlation. *J. Paleontol.* 88, 1–67.
- Yuan, X., Xiao, S., Zhang, L., Hua, H., Chen, Z., 2005. Skeletogenesis and asexual reproduction in the earliest biomineralizing animal Cloudina. *Geology* 33, 277.
- Zhang, F., Xiao, S., Kendall, B., Romaniello, S.J., Meyer, M., Cui, H., Gilleaudeau, G.J.,

- Kaufman, A.J., Anbar, A.D., 2018. Extensive marine anoxia during the terminal Ediacaran Period. *Sci. Adv.* 4, ean8983.
- Zhang, S., Jiang, G., Han, Y., 2008. The age of the Nantuo formation and Nantuo glaciation in South China. *Terra Nov.* 20, 289–294.
- Zhou, C., Yuan, X., Xiao, S., 2002. Phosphatized biotas from the Neoproterozoic Doushantuo Formation on the Yangtze Platform. *Chinese Sci. Bull.* 47, 1918–1924.
- Zhuravlev, A.Y., Liñán, E., Vintaned, J.A.G., Debrenne, F., Fedorov, A.B., 2011. New Finds of Skeletal Fossils in the Terminal Neoproterozoic of the Siberian Platform and Spain. *Acta Palaeontol. Pol.* 57, 205–224.