

# GEOLOGIA E QUIMIOESTRATIGRAFIA ISOTÓPICA DO GRUPO VAZANTE EM LAGAMAR (MG)

Carla Sofia Sousa Marques<sup>1</sup>; Alexandre Uhlein<sup>2</sup>; Gustavo Diniz Oliveira<sup>3</sup>; Gabriel Jubé Uhlein<sup>1</sup>;  
Alcides Nóbrega Sial<sup>4</sup>; Carlos José Souza de Alvarenga<sup>5</sup>

1- Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Av. Antônio Carlos 6627, CEP 31270-901. Belo Horizonte, MG, Brasil. smarques085@gmail.com; guhlein@gmail.com

2 - Instituto de Geociências, CPMTC e Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627. 31270-901. Belo Horizonte, MG, Brasil. auhlein@gmail.com;

3 - Votorantim Metais, Vazante, MG, Brasil. gustavo.oliveira.go1@vmetais.com.br

4 - NEG-LABISE, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, 50670-000, Recife, PE, Brasil. sial@ufpe.br

5 - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário, Asa Norte 70910-900 - Brasília, DF – Brasil. carlosjalvarenga@gmail.com

Recebido em 1 de junho de 2015; aceito em 30 de julho de 2015

**RESUMO:** Nos arredores da cidade de Lagamar, MG, foram mapeadas as formações Santo Antônio do Bonito, Rocinha, Lagamar, e Serra do Garrote no Grupo Vazante, e no Grupo Bambuí, as formações Serra da Saudade e Lagoa Formosa. Estas formações depositaram-se em ambientes de sedimentação costeira e marinho raso a profundo. Duas importantes falhas inversas estão inseridas dentro do polígono mapeado, aqui designadas como falha de Lagamar I e II. A falha de Lagamar I inverteu a estratigrafia, colocando as formações Serra do Garrote e Lagamar mais antigas sobre as formações Rocinha e Santo Antônio do Bonito, e a falha de Lagamar II colocou o Grupo Vazante sobre o Grupo Bambuí. A Formação Lagamar, a partir de amostras da Lavra Geraldo Américo, mostra valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -0,14 e 0,91‰ e de  $\delta^{18}\text{O}$  de -6,89 a -3,18‰. Em um testemunho de sondagem da antiga lavra da CALA os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  mostram-se bem constantes, variando entre -0,86 e 2,2‰, e os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  entre -9,82 e -3,54‰. Na Formação Rocinha, no furo CD05, valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -6,58 e -2,85‰ e  $\delta^{18}\text{O}$  entre -6,20 e -5,14‰ foram encontrados. No furo F230A tem-se valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -6,62 e 3,33‰ e de  $\delta^{18}\text{O}$  entre -10,25 e -7,54‰. Estes perfis podem evidenciar alterações diagenéticas, sobretudo no perfil da Antiga Lavra CALA, em que as curvas de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  apresentam alguma co-variância. Os valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  para amostras da Formação Lagamar são entre 0,70679 e 0,70788 e a para Formação Rocinha 0,70766.

**Palavras chave:** Meso-Neoproterozoico; Formação Lagamar; Formação Rocinha; Falha de Lagamar.

**ABSTRACT:** GEOLOGY AND ISOTOPE CHEMOSTRATIGRAPHY OF THE VAZANTE GROUP IN LAGAMAR (MG). In the geological mapping of the Lagamar (MG) region, the Santo Antônio do Bonito, Rocinha, Lagamar and Serra do Garrote Formations of the Vazante Group were identified, and the Serra da Saudade and Lagoa Formosa formations of the Bambuí Group were identified. These formations were deposited in coastal and shallow to deep marine environments. Two important inverse faults are included within the mapped polygon, designated here as Lagamar fault I and II. Lagamar fault I thrusts the older Serra do Garrote and Lagamar Formations upon the Rocinha and Santo Antônio do Bonito Formations, and Lagamar fault II thrusts the Vazante Group on top of the Bambuí Group. In the Lagamar Formation, in Lavra Geraldo Américo,  $\delta^{13}\text{C}$  show values between -0,14 and 0,91‰ and  $\delta^{18}\text{O}$  between -6,89 and -3,18‰. In Antiga Lavra CALA,  $\delta^{13}\text{C}$  are constant, between -0,86 and 2,2‰, and values of  $\delta^{18}\text{O}$  are from -9,82 to -3,54‰. In the Rocinha Formation, CD05 borehole samples  $\delta^{13}\text{C}$  values between -6,58 and -2,85‰ and,  $\delta^{18}\text{O}$  values between -6,20 and -5,14‰. In F230A, borehole samples  $\delta^{13}\text{C}$  values are -6,62 to 3,33‰, and  $\delta^{18}\text{O}$  values -10,25 to -7,54‰. These profiles may indicate diagenetic alteration, especially in Antiga Lavra CALA, because  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  show some co-variance in the chemostratigraphic profile. The values of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of the Lagamar Formation are from 0,70679 to 0,70788 and for the Rocinha Formation the value obtained for one sample is 0,70766.

**Keywords:** Meso-Neoproterozoic; Lagamar Formation; Rocinha Formation; Lagamar fault.

## 1. INTRODUÇÃO

Na porção ocidental da Bacia do São Francisco, junto a Faixa de Dobramentos Brasília, aflora o Grupo Vazante (Dardenne et al., 1998; Dardenne, 2000) numa faixa orientada N-S, com cerca de 250 Km de comprimento, abrangendo as cidades de Coromandel, Lagamar, Vazante, Paracatu e Unaí. Este grupo tem suscitado interesse de pesquisa devido aos importantes depósitos de zinco-chumbo e fosfato ali hospedados.

A idade do Grupo Vazante ainda não é bem compreendida, podendo ser mesoproterozoica, representando uma variação lateral do Grupo Paranoá, ou então neoproterozoica, representando uma variação lateral do Grupo Bambuí (Dardenne, 2000). As falhas de empurrão geradas pelo ciclo

brasiliano, que alteraram o empilhamento natural

das camadas, dificultam a interpretação estratigráfica das unidades da Faixa Brasília bem como toda a borda oeste da Bacia do São Francisco.

Através de mapeamento geológico, análises estratigráficas e sedimentológicas, petrografia (macro e microscópica) e um estudo quimioestratigráfico de isótopos de carbono, oxigênio e estrôncio em rochas carbonáticas, em especial das formações Lagamar e Rocinha, pretende-se no presente trabalho contribuir na resolução de problemas estratigráficos desta porção basal do Grupo Vazante.

A cidade de Lagamar fica na região noroeste do estado de Minas Gerais (Fig. 1), distando aproximadamente 480 km de Belo Horizonte, e 385 km de Brasília.

doi:10.18285/geonomos.v23i1.659

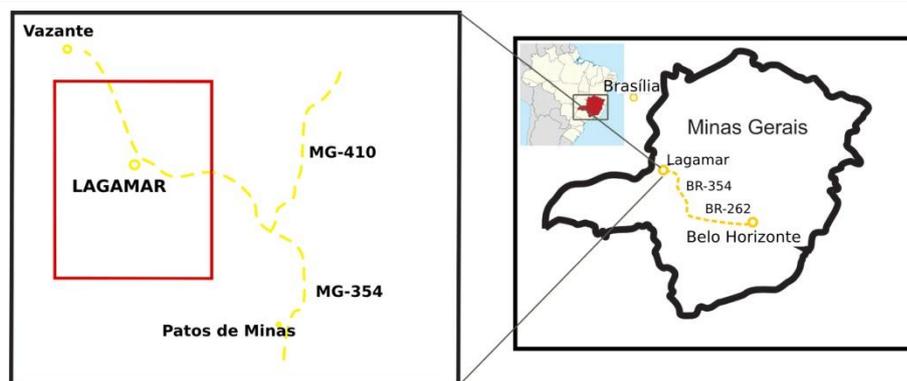


Figura 1. Mapa de localização da área de pesquisa no Estado de Minas Gerais.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Grupo Vazante aflora na interface entre o Cráton do São Francisco e a Faixa Brasília, inserindo-se no domínio externo da mesma (Fuck *et al.*, 1993; Fuck *et al.*, 2005; Dardenne, 2000, Valeriano *et al.*, 2004). A Bacia do São Francisco é composta por sucessões de rochas proterozoicas que recobrem o cráton homônimo (Almeida, 1977; Martins-Neto & Alkmim, 2001; Alkmim, 2004), e o Grupo Vazante depositou-se na porção oeste da bacia.

A sequência Vazante foi elevada a categoria de Grupo Vazante por Dardenne *et al.* (1998). O Grupo Vazante é uma sequência marinha pelito-carbonática, depositada numa plataforma marinha rasa durante um ciclo regressivo (Dardenne, 2000), começando com um ambiente costeiro, passando a um ambiente recifal e finalmente terminando com depósitos de planície de maré. Dardenne (2000, 2001) dividiu o Grupo Vazante em sete formações, da base para o topo: **Santo Antônio do Bonito** (metadiamicritos, quartzitos, xistos), **Rocinha** (pelitos e fosforitos), **Lagamar** (calcários e dolomitos estromatolíticos), **Serra do Garrote** (metapelitos, quartzitos finos), **Serra do Poço Verde** (dolomitos), **Morro do Calcário** (dolomitos recifais), e **Lapa** (filitos, metapelitos e lentes de dolomitos), totalizando cerca de 2500 m de espessura.

O **Grupo Bambuí** representa um espesso pacote de rochas pelítico-carbonáticas, e foi descrito primeiramente por Costa e Branco (1961) e Dardenne (1978), apresentando, da base para o topo: Formação Jequitaiá, (paraconglomerados), Formação Sete Lagoas (calcários e dolomitos), Formação Serra de Santa Helena, (siltitos, localmente arenitos e calcários), Formação Lagoa de Jacaré, calcários negros, fétidos, ricos em matéria orgânica, com bancos maciços oolíticos e pisolíticos e intercalações de siltitos, Formação Serra da Saudade (siltitos), Formação Três Marias, (arenitos arcossianos e siltitos). Uhlein *et al.* (2011) descrevem diferentes litofácies rudíticas e psamíticas, pelíticas e carbonáticas da região de Lagoa Formosa, integrando-as ao Grupo Bambuí, e propondo a designação de **Formação Lagoa Formosa**.

Quatro modelos geotectônicos principais apresentam-se para explicar o posicionamento estratigráfico regional do Grupo Vazante. O primeiro modelo relaciona o Grupo Vazante a uma bacia *foreland* neoproterozoica desenvolvida durante a colisão da Faixa Brasília com o Cráton do São Francisco (Dardenne, 2000), considerando uma passagem lateral entre os Grupos Vazante e Bambuí.

O segundo modelo geotectônico, baseado em dados isotópicos de neodímio e idades U-Pb em zircão detrítico, sugere que o Grupo Vazante teria sido depositado numa margem passiva mesoproterozoica-neoproterozoica correlata aos Grupos Paranoá e Canastra (Dardenne, 1979; Pimentel *et al.*, 2001, 2011). A cronoestratigrafia de estromatólitos *Conophyton* também apoia este modelo, apontando para idades num intervalo de tempo 1.35 a 0,9 Ga (Cloud & Dardenne, 1973). Pimentel *et al.* (2001, 2011) apresentam idades-modelo Sm-Nd ( $T_{DM}$ ) com valores entre 2.1 Ga e 1.7 Ga para rochas pelíticas do Grupo Vazante, colocando o Grupo Vazante com uma idade intermédia entre as idades obtidas por  $T_{DM}$  para o Grupo Paranoá (2.3-2.0 Ga) e para o Grupo Bambuí (1.9-1.3 Ga). Segundo Rodrigues *et al.* (2012), as idades  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  em zircão detrítico sugerem fontes similares (pré-neoproterozoicas) para as Formações Lagamar e Serra do Garrote (1.3 Ga). Os resultados Re-Os dos folhelhos orgânicos de Geboy *et al.* (2013) também corroboram esta idade mesoproterozoica, com valores na Formação Serra do Garrote em torno de ~1.3 Ga e nas Formações Serra do Poço Verde e Serra da Lapa em torno de 1.1 Ga. No entanto, Bertoni *et al.* (2014) com base em evidências petrológicas, sugerem que o fluxo de fluidos hidrotermais pode perturbar a sistemática Re-Os, colocando em dúvida a validade destes dados.

Um terceiro modelo para a estratigrafia do Neoproterozoico em Minas Gerais foi proposto recentemente por Alkmim & Martins Neto (2012), com o Grupo Vazante na base (Toniano) e Grupo Bambuí (Ediacariano) no topo. Estes autores colocam o Grupo Vazante dentro da Sequência

Macaúbas de idade Toniana a Criogeniana, considerando-o como correspondente estratigráfico do Grupo Macaúbas a oeste do Cráton do São Francisco.

O quarto modelo, proposto no trabalho de Misi *et al.* (2014), pressupõe uma nova organização estratigráfica para o Grupo Vazante, com uma importante inversão estratigráfica resultante de uma falha inversa próxima do topo da Formação Rocinha, que colocou rochas mais antigas (Formação Lagamar e porção superior do Grupo Vazante) em cima de rochas mais jovens (Formações Rocinha e Santo Antônio do Bonito). Devido às similaridades geológicas e quimioestratigráficas das formações basais Rocinha e Santo Antônio do Bonito, Misi *et al.* (2007) correlacionaram-nas às formações basais do Grupo Bambuí (Formações Serra de Santa Helena e Jequitai).

### 3. GEOLOGIA DO GRUPO VAZANTE EM LAGAMAR

#### 3.1. Estratigrafia

O mapeamento geológico escala 1:50.000 (Fig. 2) cobre uma área de 400 km<sup>2</sup> no município de Lagamar – MG. Na área afloram rochas do Grupo Vazante (formações Santo Antônio do Bonito, Rocinha, Lagamar e Serra do Garrote), e do Grupo Bambuí (formações Lagoa Formosa e Serra da Saudade). Duas importantes falhas inversas fazem a separação entre estes grupos, bem como a separação de formações dentro do Grupo Vazante.

O empilhamento estratigráfico das formações dos grupos Vazante e Bambuí está representado na Fig. 3, onde estão discriminadas 10 associações de fácies (AF) e os respectivos ambientes de sedimentação.

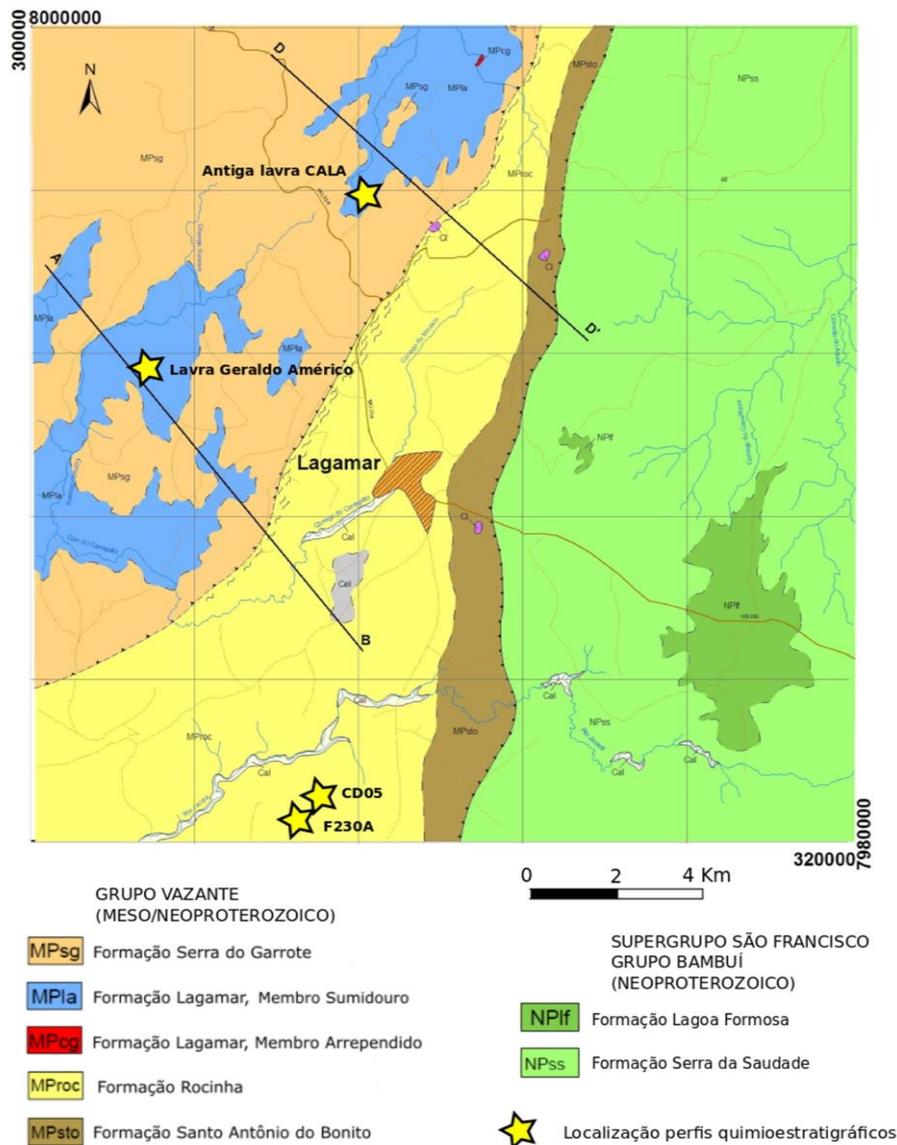
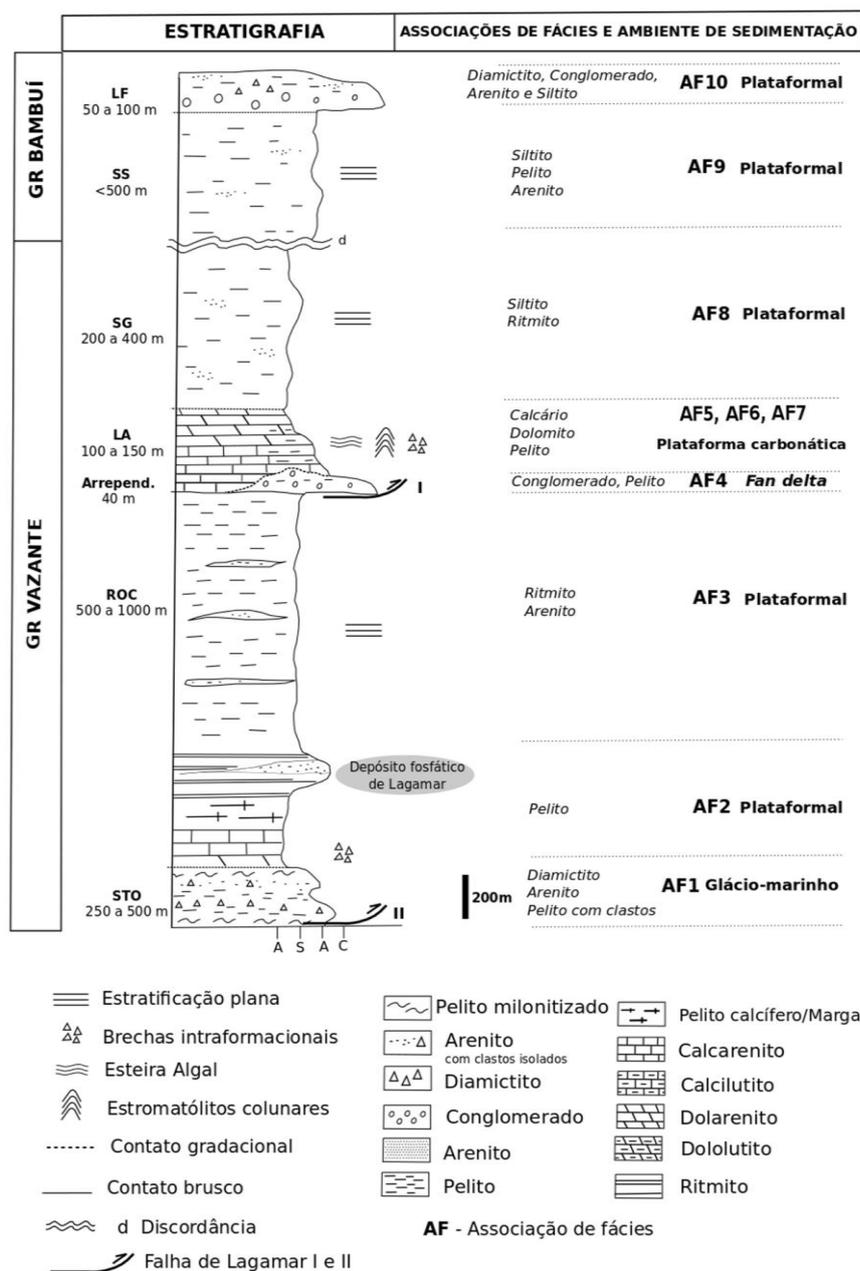


Figura 2. Mapa geológico simplificado, 1:50000 em Lagamar, segundo Marques (2015).

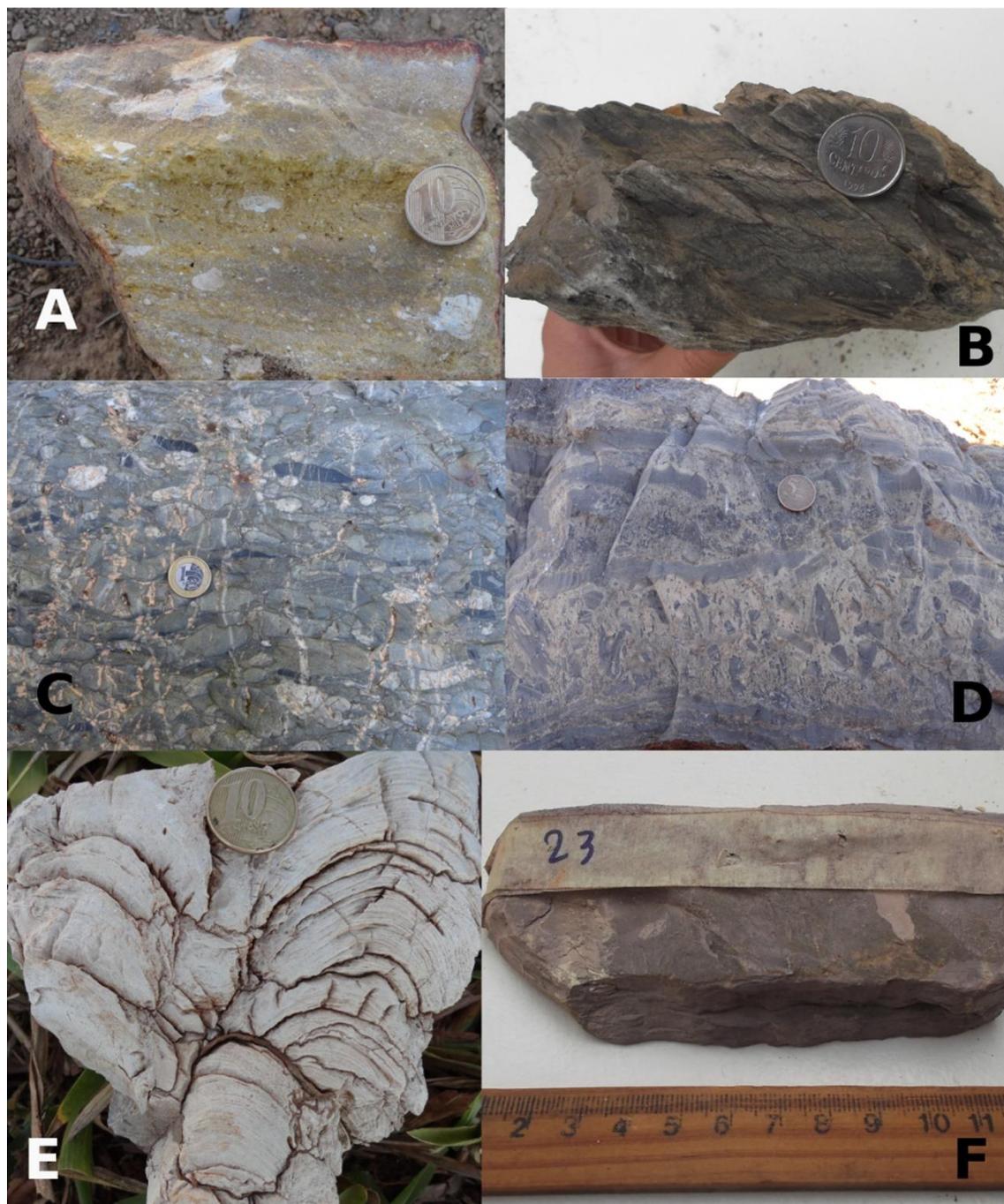


**Figura 3.** Coluna estratigráfica da região de Lagamar com suas associações de fácies e ambiente de sedimentação: STO – Formação Santo Antônio do Bonito; ROC – Formação Rocinha; Arrep. – Membro Arrependido, Formação Lagamar; LA – Membro Sumidouro, Formação Lagamar; SG – Formação Serra do Garrote; SS – Formação Serra da Saudade; LF – Formação Lagoa Formosa.

A **Formação Santo Antônio do Bonito** está alinhada aproximadamente N-S na porção central do mapa. Estas rochas representam cerca de 14% da área mapeada e estão geralmente muito intemperizadas. Esta formação está em contato gradacional com a Formação Rocinha a oeste e contato tectônico a leste (falha inversa), com o Grupo Bambuí. A sua espessura é 250 a 500 m. Faz-se representar por diamictitos com matriz arenosa, por vezes silto-argilosa, com cor rosa de intemperismo e clastos de quartzito branco (Fig. 4A). Por vezes, a matriz é pelítica, foliada e com clastos esparsos de granulometria matacão, calhau e seixos, de composição siltito e arenito. Estes diamictitos

apresentam-se intercalados com arenitos brancos impuros (micáceos) e pelitos.

A **Formação Rocinha** representa cerca de 10% da porção central do mapa. A espessura desta unidade na área varia entre 500 m mais a norte e mais a sul com 1000 m. A noroeste a Formação Rocinha está em contato tectônico (falha inversa) com a Formação Lagamar. A oeste o contato com a Formação Santo Antônio do Bonito é gradacional. Esta formação caracteriza-se por ritmitos arenito-siltosos e silto-argilosos, com laminação plano-paralela conspícua, às vezes enriquecidos em fosfato (Nogueira, 1993, Fig. 4B).



**Figura 4.** Algumas litofácies da área mapeada: A) Diamictito da Formação Santo Antônio do Bonito; B) Fosforito, ritmo (calcarenito/calculutito) da Formação Rocinha do Depósito fosfático em Lagamar. C) Ortoconglomerado do Membro Arrependido da Formação Lagamar; D) Brecha intraformacional do Membro Sumidouro da Formação Lagamar; E) Dolomito estromatolítico do Membro Sumidouro da Formação Lagamar; F) Siltito da Formação Serra do Garrote.

Os siltitos apresentam laminação plana, às vezes maciços, por vezes intercalados com lentes ou estratos de arenito com granulometria fina a média.

O **Membro Arrependido da Formação Lagamar** aflora como uma pequena lente no córrego Arrependido (40 m) a norte da área mapeada. São ortoconglomerados com matriz areno-siltosa, não calcítica, cor cinza escuro, com clastos predominantemente tamanho seixo (1-5 cm) e

localmente calhau (8 cm). Intercalados com pelitos cinza laminados não carbonáticos (Fig.4C).

O **Membro Sumidouro da Formação Lagamar** ocupa aproximadamente 10% na porção noroeste da área. Esta formação está em contato gradacional com a Formação Serra do Garrote. O Membro Sumidouro é observável nas baixadas entre morros da Formação Serra do Garrote, e caracteriza-se muitas vezes por uma morfologia de intemperismo tipo *lappie*, com vegetação mais alta. A sua espessura varia de 100 até 150 m.

Ocorrem calcarenitos e doloarenitos com granulometria fina a média e estratificação plana ou cruzada, calcilutitos cinza com laminação fina, brechas intraformacionais de cor cinza com clastos carbonáticos e matriz calcítica (Fig.4D), pelitos calcíticos e não calcíticos de cor cinza, dolomitos estromatolíticos cor cinza, com colunas coniformes (*Conophyton*) e subcilíndricos ramificados ou não (Fig.4E), dolomitos oncolíticos maciços, microbialitos (esteiras algais com laminação plana irregular). Dardenne *et al.* (2005) descrevem as características dos estromatólitos *Conophyton Metula* Kirichenko no Sumidouro do Córrego Carrapato. Os estromatólitos *Conophyton Metula* de Lagamar (MG) são semelhantes aos *Conophyton Metula* descritos no Grupo Paranoá na região de São Gabriel (GO) (Dardenne *et al.*, 1976).

A **Formação Serra do Garrote** cobre cerca de 14% da área na porção mais a NW da região estudada. Esta formação está bem marcada em imagem de *Geocover* devido à sua morfologia peculiar, morros dissecados por drenagens profundas. Dentro do limite da área mapeada, as espessuras variam de 200 a 400 m e está em contato gradacional com a Formação Lagamar. São essencialmente ritmitos e siltitos por vezes laminados, com cor de intemperismo de rosa a roxo, e cinza esverdeados quando frescos (Fig.4F). Dentro do limite da área mapeada, as espessuras são 200 a 400 m.

No Grupo Bambuí, foi identificada a **Formação Serra da Saudade**, que corresponde a cerca de 30%, da porção leste do mapa. As espessuras desta unidade chegam até 500 m. Está em contato tectônico com a Formação Santo Antônio do Bonito a oeste, e em contato gradacional com a Formação Lagoa Formosa. Esta formação apresenta siltitos maciços ou laminados, com predomínio de laminação plana, intercalados em siltitos argilosos. Apresenta também arenito com estratificação plana, granulometria fina a média, rico em micas detríticas.

A **Formação Lagoa Formosa** assenta-se por contato gradacional sobre a Formação Serra da Saudade. A sua espessura é aproximadamente de 50 a 100 m, e ocupa cerca de 8% da área mapeada. Esta unidade é constituída por diamictito com matriz pelítica foliada e clastos esparsos de granulometria seixo a matacão, de composição silito e arenito. Ocorrem também ortoconglomerados polimíticos, contendo clastos sub-arredondados tamanho seixo a matacão de arenitos arcoseanos e siltitos, imersos em matriz silto-argilosa, às vezes areno-silto-argilosa. Os níveis conglomeráticos intercalam-se com arenitos arcoseanos micáceos e siltitos.

Localmente ocorrem ainda diversas coberturas recentes, por vezes lateritizadas.

### 3.2. Associação de fácies e sedimentologia

Na área estudada foram identificadas diversas litofácies (Tab. 1) e individualizadas 10 associações de fácies (AF).

A AF1 corresponde à unidade litoestratigráfica da Formação Santo Antônio do Bonito. As litofácies são diamictito, arenito, pelito com seixos. As ocorrências de clastos isolados, tanto em quartzitos como em pelitos laminados, sugere influência glacial. Esta associação de fácies pode ser interpretada como produto de fluxos gravitacionais em ambiente glaciomarinho.

A unidade estratigráfica que se segue é a Formação Rocinha, correspondente às associações de fácies AF2 e AF3. A AF2 é constituída por pelito calcífero e não calcífero, calcarenito e calcilutito, margas, ritmitos onde está alojado o depósito fosfático de Lagamar. A associação de fácies AF3 é constituída por siltitos com lentes arenosas centimétricas a decamétricas. Estas associações indicam sedimentação marinha plataformal abaixo da influência de ondas, possivelmente com influência de correntes de turbidez. A fácies argilosa (AF2), lateralmente interdigitada com a fácies rítmica, representa o aprofundamento da bacia em direção ao oeste/sudoeste. A fácies rítmica (AF3) da Formação Rocinha representa ambiente plataformal de baixa energia, abaixo da zona de influência de ondas, cujos sedimentos areno-silto-argilosos traduzem provável instabilidade de uma área fonte distal em relação à bacia de sedimentação (Nogueira, 1993).

Por sua vez, a Formação Lagamar inicia com uma deposição de conglomerado e pelitos laminados intercalados. Esta AF4 corresponde ao Membro Arrependido. Estas litofácies sugerem sedimentação gravitacional por fluxo de detritos (*debris-flow*) em ambiente subaquoso do tipo *fan delta*. Quanto ao Membro Sumidouro da Formação Lagamar foi subdividida em três associações de fácies marinhas: associação de fácies (AF5) constituída por calcarenitos, calcilutitos com laminação fina, doloarenitos, dololutitos e com alguns níveis de brechas intraformacionais calcíferas e dolomíticas; Associação de fácies (AF6) constituída por dolomitos estromatolíticos; Associação de fácies (AF7) é constituída por laminitos algais, calcários escuros, doloarenitos oncolíticos e intraclásticos. Estas litofácies carbonáticas do Membro Sumidouro permitem interpretar uma sedimentação de plataforma carbonática com fácies de água rasa até lagunar (laminitos algais), estrutura recifal (fácies de

estromatólitos) e fácies de *fore reef*, ou seja, fácies de retrabalhamento por ondas nas estruturas recifais. Infere-se então três sub-ambientes de plataforma carbonática: fácies de retrabalhamento, possivelmente também de inframaré, com brechas intraformacionais, doloarenitos e calcarenitos (AF5); ambiente inframaré a intermaré - biohermas estromatolíticas (AF6); Fácies lagunar e planície de maré (intermaré) - com calcários negros, dolarenitos oncolíticos e intraclásticos e laminitos algais ou microbialitos (AF7).

Subindo na estratigrafia segue-se a Formação Serra do Garrote constituída por pelitos e ritmitos com laminação planar, que corresponde à AF8, um

ambiente plataformal abaixo da influência de ondas.

Em contato tectônico, ocorrem as Formações Serra da Saudade e Lagoa Formosa do Grupo Bambuí. A AF9 correspondente à Formação Serra da Saudade, na região constituída por siltitos e arenitos com estratificação planar, interpretada como ambiente plataformal. E por fim a Formação Lagoa Formosa é constituída por diamictitos, arenitos e pelitos. Infere-se uma sedimentação marinha profunda, possivelmente com fácies de turbiditos corresponde à AF10. Este é um ambiente de sedimentação marinha profunda, apontando os diamictitos como *debris flows*, depositados em meio à sequência areno-silto-argilosa em bacia *foreland* (Uhlein et al., 2011).

**Tabela 1.** Descrição e interpretação das principais litofácies identificadas na área pesquisada.

Formação	Litofácies	Descrição	Interpretação
<b>Santo Antônio do Bonito</b>	<i>Diamictito</i> <i>Arenito</i> <i>Pelito com</i> <i>clastos</i>	Diamictitos com matriz arenosa, por vezes silto-argilosa, com cor rosa de intemperismo e clastos de quartzo branco. Estes diamictitos apresentam-se intercalados com arenitos brancos impuros (micáceos) e pelitos, localmente com clastos isolados. Diamictito com matriz pelítica foliada e clastos esparsos de granulometria matacão, calhau e seixos, de composição silito e arenito.	Fácies sedimentares como produto de fluxos gravitacionais em ambiente marinho e/ou ambiente glaciomarinho (com clastos isolados tipo <i>dropstone</i> ).
<b>Rocinha</b>	<i>Ritmito</i> <i>Silito</i> <i>Arenito</i>	Ritmitos areno-siltosos e silto-argilosos, com laminação plano-parela conspícua, às vezes enriquecidos em fosfatos Siltitos com laminação plana, às vezes maciços, por vezes intercalados com lentes ou estratos de arenito com granulometria fina a média.	Sedimentação marinha plataformal, com correntes fracas, abaixo da influência de ondas.
<b>Membro Arrependido, Formação Lagamar</b>	<i>Conglomerado</i> <i>Pelito</i>	Ortoconglomerados com matriz areno-siltosa não calcítica, cor cinza escura, com clastos de silito não carbonático, de arenito laminado, de quartzo, e de ritmito. Clatos predominantemente tamanho seixo (1-5 cm) e localmente calhau (8 cm). Ocorrem intercalados com pelitos cinza laminados e não carbonáticos.	Sedimentação gravitacional por fluxo de detritos ( <i>debris-flow</i> ) em ambiente subaquoso.
<b>Membro Sumidouro, Formação Lagamar</b>	<i>Calcário</i> <i>Dolomito</i> <i>Pelito</i>	Calcarenitos e doloarenitos com granulometria fina a média e estratificação plana ou cruzada. Calcilitos cinza com laminação fina. Brechas intraformacionais de cor cinza com clastos carbonáticos e matriz calcítica. Pelitos calcíticos e não calcíticos de cor cinza. Dolomitos estromatolíticos cor cinza, com colunas coniformes ( <i>Conophyton</i> ) e subcilíndricos ramificados ou não. Dolomitos oncolíticos maciços. Microbialitos (esteiras algais com laminação plana irregular).	Sedimentação de plataforma carbonática com fácies de água rasa até lagunar (esteiras algais), estrutura recifal (fácies de estromatólitos) e fácies de <i>fore reef</i> (brechas intraformacionais e calcarenitos).
<b>Formação Serra do Garrote</b>	<i>Silito</i> <i>Ritmito</i>	Siltitos geralmente laminados com níveis de arenitos finos a muito finos, intercalados com ritmitos silto-argilosos.	Sedimentação silto-argilosa em ambiente marinho plataformal, transgressivo em relação à Formação Lagamar.
<b>Formação Serra da Saudade</b>	<i>Silito</i> <i>Arenito</i>	Silito maciço ou laminado, com predomínio de laminação plana. Frequentemente intercalado em siltitos argilosos. Arenito com estratificação plana, granulometria fina a média, rico em micas detríticas.	Sedimentação marinha plataformal, provavelmente abaixo da influência de ondas.
<b>Formação Lagoa Formosa</b>	<i>Diamictito</i> <i>Conglomerado</i> <i>Arenito</i> <i>Silito</i>	Diamictito com matriz pelítica foliada e clastos esparsos de granulometria matacão, calhau e seixos, de composição silito e arenito. Ortoconglomerados polimíticos, contendo clastos sub-arredondados tamanho seixo a matacão compostos de arenitos arcoseanos e siltitos, imersos em matriz silto-argilosa, às vezes areno-silto-argilosa. Os níveis conglomeráticos intercalam-se com arenitos arcoseanos micáceos e siltitos.	Sedimentação marinha profunda, associada com fluxos gravitacionais (avalanches e correntes de turbidez).

Subindo na estratigrafia segue-se a Formação Serra do Garrote constituída por pelitos e ritmitos com laminação planar, que corresponde à AF8, um ambiente plataformar abaixo da influência de ondas.

Em contato tectônico, ocorrem as Formações Serra da Saudade e Lagoa Formosa do Grupo Bambuí. A AF9 correspondente à Formação Serra da Saudade, na região constituída por siltitos e arenitos com estratificação planar, interpretada como ambiente plataformar. E por fim a Formação Lagoa Formosa é constituída por diamictitos, arenitos e pelitos. Infere-se uma sedimentação marinha profunda, possivelmente com fácies de turbiditos corresponde à AF10. Este é um ambiente de sedimentação marinha profunda, apontando os diamictitos como *debris flows*, depositados em meio à sequência areno-silto-argilosa em bacia *foreland* (Uhlein et al., 2011).

### 3.3. Geologia Estrutural

A área mapeada é atravessada por duas falhas principais. Uma bem marcada - aqui designada como falha de Lagamar I, foi identificada por Sanches (2012) e Misi et al. (2014). Esta falha é visível em fotointerpretação, marcada por lineamentos NE, e também por uma zona de milonitização em escala de afloramento. A Falha de Lagamar I está entre as

Formações Lagamar e Rocinha. A outra falha, aqui denominada como Falha de Lagamar II foi inicialmente identificada por Pinho & Dardenne (1994), e separa o Grupo Vazante do Grupo Bambuí. A falha de Lagamar II está orientada N-S a leste da cidade de Lagamar, e acompanha a diferença de relevo entre os morros da Formação Santo Antônio do Bonito (Grupo Vazante), e as regiões mais baixas e aplanadas do Grupo Bambuí. Na Fig. 5 estão ilustrados os perfis geológicos na área mapeada em Lagamar. Nela é possível verificar a posição destas duas falhas, bem como a disposição geral das camadas.

A Falha de Lagamar I, situada a oeste da cidade, é uma falha inversa provavelmente resultante de processo de inversão tectônica de uma antiga falha extensional. A sua localização é próxima da ocorrência dos conglomerados do Membro Arrependido, interpretados como cunha clástica adjacente a uma falha normal (Marques, 2015), e, além disto, a Falha Lagamar I mostra pequeno rejeito. A falha de Lagamar II, situada a leste da cidade homônima, também produziu inversão estratigráfica e mostra grande rejeito, possuindo semelhança com outras falhas inversas da Faixa Brasília e da transição para o Cráton.

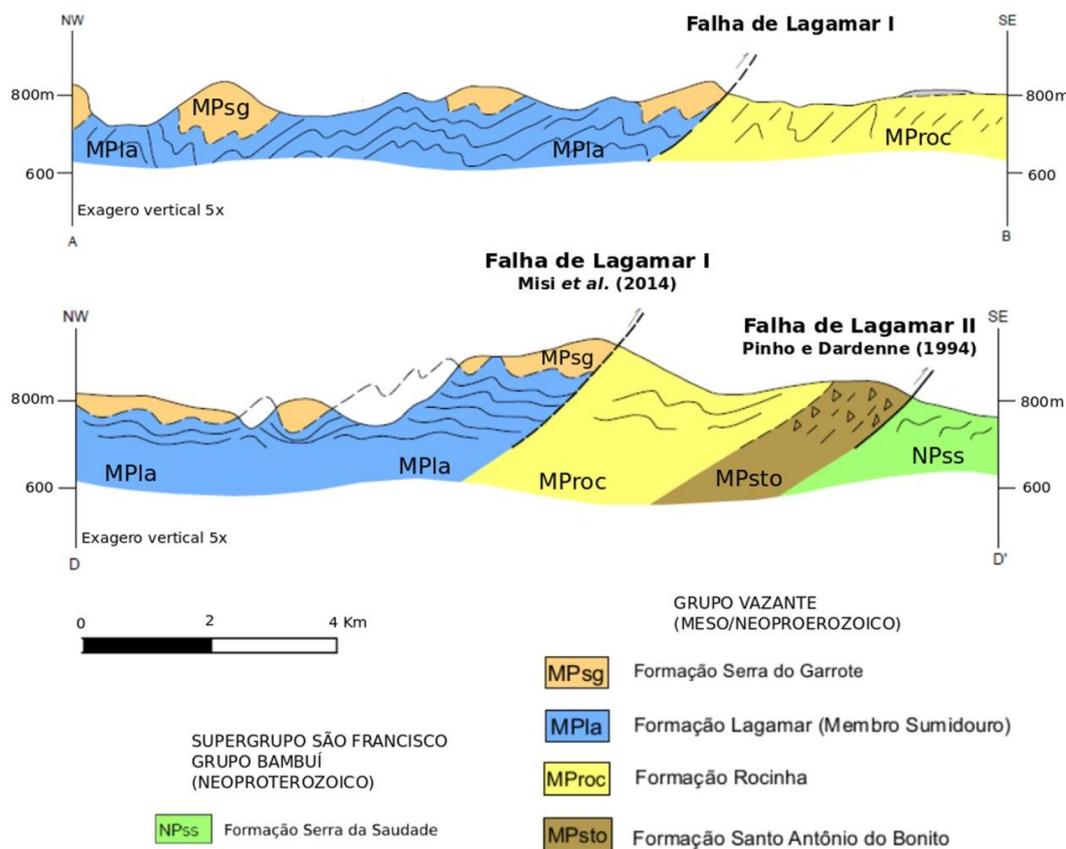
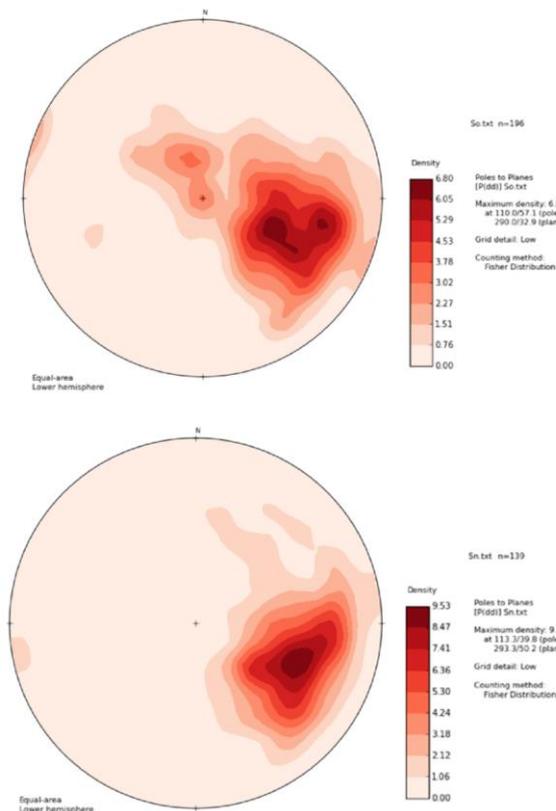


Figura 5. Perfis de campo orientados NW-SE. Ver localização dos perfis no mapa geológico da Fig.2.

Através de estereogramas de distribuição de polos observa-se que no geral o acamamento (S0) das camadas mergulha para NW (máximo modal 290/33). A foliação S<sub>n</sub> tem a mesma tendência mas com mergulhos maiores (máximo modal 293/50) (Fig. 6).



**Figura 6.** Estereogramas de densidade do acamamento (S0) e da foliação (S<sub>n</sub>) na região de Lagamar.

A deformação na área está relacionada com a orogenia brasileira. Inicialmente desenvolveram-se dobras assimétricas com vergência para leste, em direção ao Cráton do São Francisco. Estas dobras são mais apertadas nas rochas pelíticas, e mais abertas nos carbonatos, em função do contraste de competência das camadas. Com a continuidade da deformação formam-se falhas inversas.

#### 4. QUIMIOESTRATIGRAFIA ISOTÓPICA

A quimioestratigrafia estuda as variações químicas ao longo de uma coluna estratigráfica e sedimentar. Os isótopos estáveis de carbono, oxigênio e estrôncio fornecem indícios para as condições ambientais da época de sedimentação. Kaufman & Knoll (1995), Veizer et al. (1999), Jacobsen & Kaufman (1999), Walter et al. (2000), Halverson et al. (2005, 2007, 2010), apresentam propostas de curvas temporais que podem ser utilizadas para correlação entre as bacias carbonáticas. Quebras bruscas podem indicar importantes mudanças climáticas e/ou

geotectônicas, bem como as tendências de valores permitem correlacionar a resposta isotópica com as condições paleoambientais. A quimioestratigrafia associada a um estudo de litofácies, permite fazer correlações estratigráficas intra e inter-baciais (Halverson et al., 2005, 2010; Misi et al., 2007; Alvarenga et al., 2014).

Halverson et al. (2005) resumiram o comportamento isotópico do carbono no Neoproterozoico. Nas sequências carbonáticas que sucedem os eventos glaciais do Neoproterozoico, a curva isotópica de carbono mostra uma tendência constante de aumento nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$ , começando em torno de -5‰ ou -3‰ passando rapidamente para valores positivos em direção ao topo das seções (Kennedy et al., 1998; Hoffman & Schrag, 2002).

Em relação à curva de evolução da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  durante o Neoproterozoico, esta é calibrada em relação aos dados radiométricos e correlações de diferentes sucessões e mostra um aumento sistemático desta razão desde valores de 0.7055 até valores de 0.7085 (Halverson et al., 2007). Nessa compilação de valores da razão de estrôncio, observa-se um aumento constante, de longa duração, interrompido por declínios na base do 'Bitter Springs Stage' (Halverson et al., 2005) e antes da glaciação Sturtian. A glaciação Sturtian é limitada por valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  entre 0.7067 e 0.7069 e a glaciação Marinoan por valores entre 0.7071 e 0.7073. O período Ediacarano é caracterizado por um expressivo aumento na razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  passando de 0.7072 há ca. 635 Ma para 0.7085 há ca. 542 Ma (Kaufman et al., 1993). Os valores mais baixos de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  no Neoproterozoico coincidem com o estágio final de formação do supercontinente Rodínia (Meert & Torsvik, 2003). Por outro lado, o substancial aumento na razão de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  no Neoproterozoico Médio provavelmente coincide com a fase inicial de quebra do supercontinente Rodínia, enquanto as variações de escala menor na razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ocorridas são atribuídas a eventos biogeoquímicos e/ou climáticos (Halverson et al., 2007).

Nas sucessões de carbonatos depositados sobre o Cráton de São Francisco, as incursões negativas de  $\delta^{13}\text{C}$  ocorrem em carbonatos de capa depositados como sequências pós-glaciais dos eventos Marinoano (~640Ma) e Sturtiano (~730Ma) (Martins & Lemos, 2007).

Oliveira (2013) elaborou o estudo quimioestratigráfico da Formação Serra do Poço Verde e base da Formação Morro do Calcário na

região de Vazante. A curva do  $\delta^{13}\text{C}$  apresenta valores entre -4,12‰ e +3,35‰, sendo 80% das amostras de valores positivos com 55% concentrados entre 0,00‰ a 1,50‰. O comportamento do  $\delta^{18}\text{O}$  ao longo do perfil é instável com valores entre -8,60‰ a +0,06‰ sendo o limite máximo o único valor positivo da curva. Os valores estão concentrados 82% dos valores estão concentrados entre -4,00‰ a -2,50‰, com dois picos de maior frequência em -4,50‰ e -2,50‰ ( $_{\text{PDB}}$ ). Sanches (2012) estudou as razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  obtidas para os fosfatos dos depósitos de Lagamar e Rocinha inseridos na Formação Rocinha do Grupo Vazante. Estes valores variam em torno de 0,70760 e 0,70791, ou seja, dentro da faixa esperada para o intervalo próximo a 650 Ma (Criogeniano superior) na curva de variação da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  durante o Neoproterozoico e Cambriano (Halverson *et al.*, 2007). Estes valores aproximam-se de valores Ediacarianos do Grupo Bambuí, cujos valores de razão de Sr para a Formação Sete Lagoas é 0,70739 (Misi *et al.*, 2007). Alvarenga *et al.* (2014) comparam valores da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  do Grupo Paranoá com valores do Grupo Bambuí na Serra de São Domingos (MG). Os carbonatos do Grupo Paranoá superior (Mesoproterozoico) mostram razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variando entre 0,7056 e 0,7068, enquanto que nos carbonatos do Grupo Bambuí possuem valores ligeiramente mais elevados entre 0,7074 e 0,7080 (Ediacarano – Neoproterozoico).

#### 4.1. Coleta de amostras e procedimentos analíticos

Foram descritos 2 furos de sondagem das empresa Galvani – Unidade de Lagamar e uma lavra e um furo de sondagem da CALA (Calcários de Lagamar). Os furos de sondagem da Galvani estão em 45º com a superfície e perpendiculares às camadas rochosas. Foram coletadas 23 amostras: 11 do furo F230A, e 4 do CD05. Na empresa CALA, foram descritos 1 furo de sondagem de uma antiga lavra e uma bancada da atual lavra Geraldo Américo. O furo de sondagem da CALA é vertical e perpendicular às camadas da rocha. Deste furo foram coletadas 30 amostras de calcário. Na bancada da atual lavra, a descrição foi elaborada na vertical, e foram coletadas 10 amostras. Na Fig. 7 está um mapa de localização dos perfis quimioestratigráficos e descrição de litotipos amostrados.

Para as análises isotópicas de carbono e oxigênio, as amostras foram pulverizadas utilizando uma furadeira com uma broca de ponta diamantada em porções de rocha pura, carbonática, homogênea, e sem veios, para evitar a contaminação das análises, e aproximadamente 1 g do pó resultante foi coletado. As amostras foram analisadas no LABISE - Laboratório de Isótopos Estáveis da Universidade Federal de Pernambuco. Após a amostra pulverizada ter reagido com o ácido ortofosfórico a 25°C por um dia (3 dias quando na presença de dolomita), o gás  $\text{CO}_2$  liberado foi analisado depois de uma limpeza criogênica em um espectrometro de massa *Thermo Finnigan Delta V Advantage*. Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  são apresentados em per mil (‰) com base no padrão *Vienna Pee Dee Belemnite* ( $_{\text{VPDB}}$ ). A precisão das análises é de 0,1 ‰ para o carbono e 0,2 ‰ para o oxigênio, com base em múltiplas análises de um padrão interno do laboratório (BSC).

Seis amostras de calcário com 13 g cada foram utilizadas para analisar os isótopos de estrôncio no Laboratório de Isótopos Estáveis da Universidade de Brasília. Para a análise de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , 50 mg de amostra pulverizada foram digeridas por ácido acético 0,5N. Após segundo ataque ácido com HCl 2,5N o Sr foi separado em colunas orgânicas primárias grandes. A razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  das amostras foi determinada pelo espectrômetro de massa de ionização termal, marca *Finnigan MAT 262*.

As amostras de litoquímica foram analisadas no laboratório da ALS *Chemex*, Vespasiano MG. No processo de preparação, estas amostras são pesadas, secas e britadas até atingirem 70% do material passante em malha de 2 mm. Uma fração de até 250g é retirada e pulverizada para mais de 85% passante em malha de 75 microns. Este método é apropriado para amostras de rocha ou de testemunho de sondagem. A decomposição das amostras é realizada com digestão por tetra-ácido ( $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF-HCl}$ ) e lixiviação por HCl. A fração de 0,25g da amostra preparada é atacada com digestão por tetra-ácido ( $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF-HCl}$ ). O resíduo é completado com ácido clorídrico diluído e a solução resultante é analisada por ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy*). A composição química das amostras foi usada para avaliar os efeitos dos processos diagenéticos, considerando as razões Mn/Sr e a quantidade de Sr preservado.

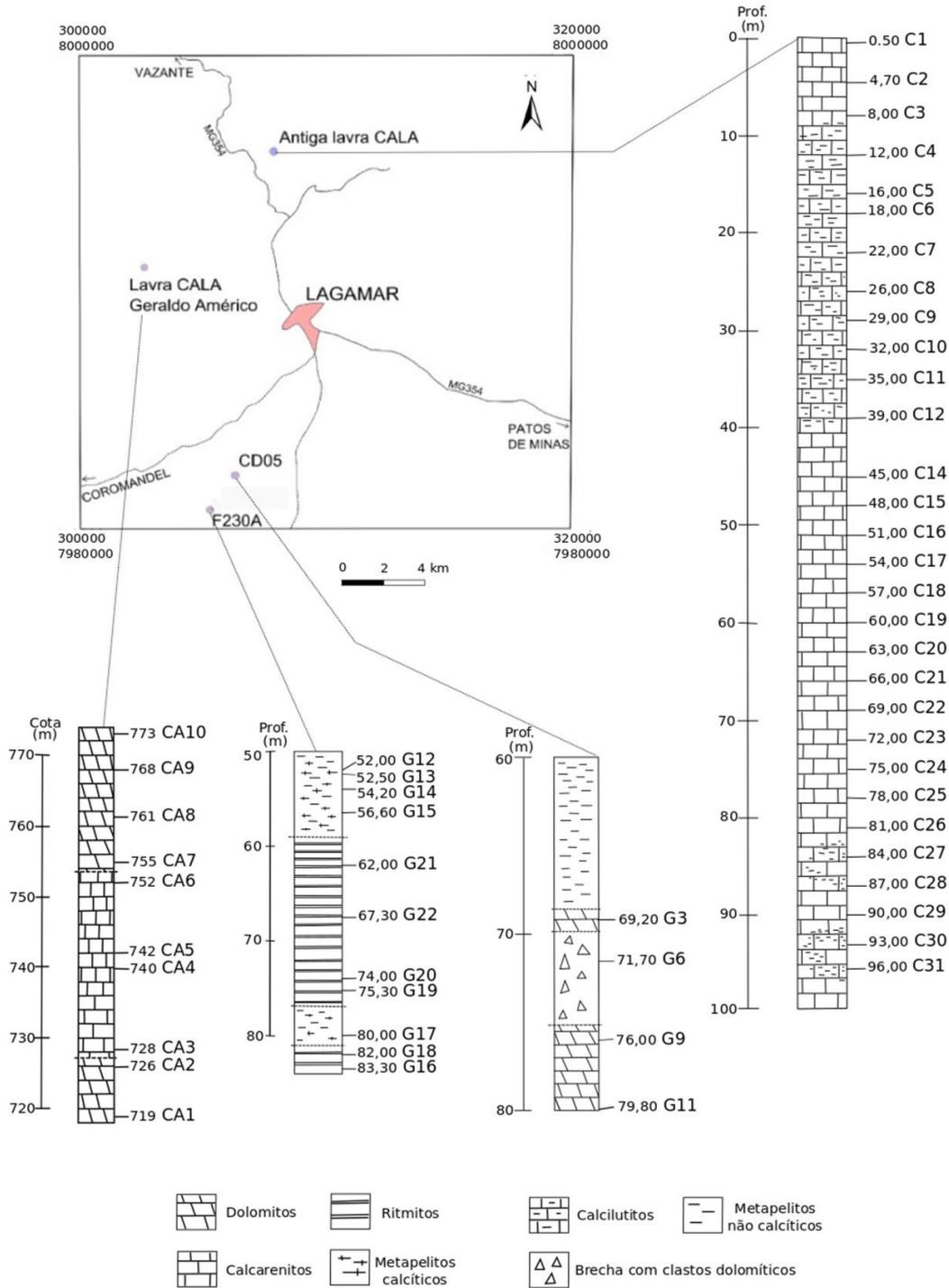


Figura 7. Mapa de localização dos furos de sondagem e bancada da lavra da amostrados para estudo isotópico e descrição de litotipos. Coordenadas UTM: Antiga Lavra CALA – 307529, 7995535; Lavra CALA Geraldo Américo – 302336, 7990985; F230A – 305208, 7980567; CD05 – 306990, 7983640.

#### 4.2. Resultados das análises de isótopos estáveis de carbono, oxigênio e estrôncio

Diagramas  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  são apresentados na Fig. 8 e os dados usados para elaboração dos perfis quimioestratigráficos estão na Tab. 2. Os 4 perfis quimioestratigráficos com as curvas de  $\delta^{13}\text{C}$  (VPDB) e  $\delta^{18}\text{O}$  (VPDB) estudados na região de Lagamar estão compilados na Fig. 9. Ao longo dessa perfilagem estão plotados também valores da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

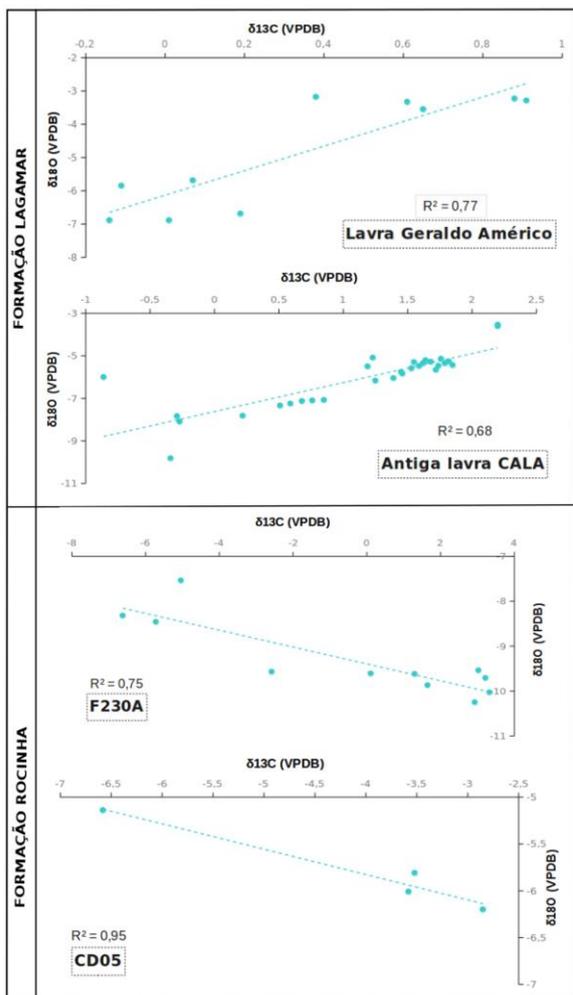


Figura 8. Diagramas  $\delta^{13}\text{C}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  de seções amostradas na Formação Rocinha e Lagamar.

Os diagramas da Fig. 8 mostram uma certa covariação dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  através do cálculo estatístico de  $R^2$ . Os valores de  $R^2$  mostram uma covariância de média a alta ( $R^2 = 0,77; 0,68; 0,95; 0,75$ ). Perfis pouco espessos e amostragem diminuta mostram maiores covariações, o que pode indicar somente uma questão estatística, como se verifica no CD05 com  $R^2 = 0,95$ , embora o mesmo não se verifique nas curvas do seu perfil quimioestratigráfico. No caso do furo na Antiga lava CALA, as curvas de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  têm a mesma tendência sobretudo no nível da amostra C6 e C23, sugerindo um certo grau de modificação isotópica diagenética (Fig. 9).

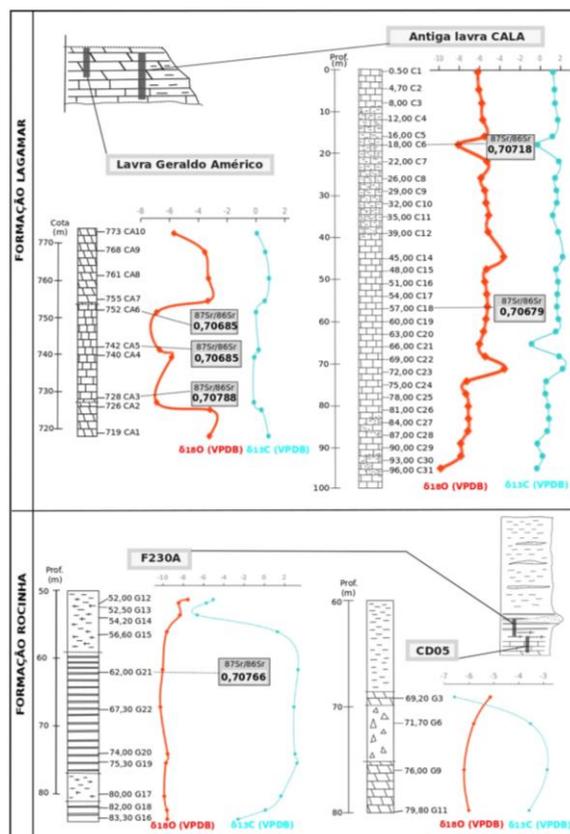


Figura 9. Perfis quimioestratigráficos nas formações Rocinha e Lagamar na região de Lagamar. Perfis elaborados em testemunhos de furos de sondagem e em lava, com sua posição aproximada na coluna estratigráfica local.

A Formação Lagamar, a partir das amostras da lava Geraldo Américo, mostra valores de entre -0,14 e 0,91‰ e de  $\delta^{18}\text{O}$  de -6,89 a -3,18‰. No furo da antiga lava da CALA os valores de carbono mostram-se bem constantes, variando entre -0,86 e 2,2‰, e os valores de oxigênio entre -9,82 e -3,54‰. Na lava Geraldo Américo observa-se uma variação no padrão da curva de carbono, que acompanha a mudança de litotipo entre calcários e dolomitos, sendo os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  ligeiramente menores nos calcários. A curva de oxigênio acompanha parcialmente esta variação. Ou seja, para as amostras da lava Geraldo Américo, parece existir um controle mais litológico do que paleoambiental nos valores isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , provavelmente devido a uma alteração pós-deposicional.

Na Formação Rocinha, no furo CD05, temos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -6,58 e -2,85‰ e  $\delta^{18}\text{O}$  entre -6,20 e -5,14‰. No furo F230A os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  ficam entre -6,62 e 3,33‰ e os de  $\delta^{18}\text{O}$  entre -10,25 e -7,54‰. Os valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  do furo F230A devem-se ao depósito fosfático. Esta curva negativa é particularmente visível no nível das amostras G12, G13 e G14. Os fosforitos sedimentares depositam-se em níveis de mar alto em áreas de *upwelling*.

**Tabela 2.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , e litoquímica de Mn e Sr para amostras de bancada e furos de sondagem das formações Lagamar e Rocinha na região de Lagamar.

Lavra Geraldo Américo – Formação Lagamar							
AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ <sub>V-PDB</sub> )	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ <sub>V-PDB</sub> )	Altura (m)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Mn/Sr
CA1	0.88	-3.23	719	-	-	-	-
CA2	0.38	-3.18	726	-	-	-	-
CA3	-0.14	-6.89	728	0,70788 + /-1	5,60	720,0	0,008
CA4	-0.11	-5.85	740	-	-	-	-
CA5	0.19	-6.69	742	0,70685 + /-1	8,7	980,0	0,009
CA6	0.01	-6.89	752	0,70685 + /-1	2,8	980,0	0,003
CA7	0.61	-3.33	755	-	-	-	-
CA8	0.91	-3.29	761	-	-	-	-
CA9	0.65	-3.55	768	-	-	-	-
CA10	0.07	-5.69	773	-	-	-	-
Antiga Lavra CALA – Formação Lagamar							
AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ <sub>V-PDB</sub> )	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ <sub>V-PDB</sub> )	Prof. (m)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Mn/Sr
C1	1.25	-6.17	0,50	-	-	-	-
C2	1.39	-6.05	4,70	-	-	-	-
C3	1.45	-5.76	8,00	-	-	-	-
C4	1.72	-5.66	12,00	-	-	-	-
C5	1.19	-5.50	16,00	-	-	-	-
C6	-0.27	-8.09	18,00	0,70718 + /-1	3,8	1490,0	0,003
C7	1.82	-5.27	22,00	-	-	-	-
C8	1.46	-5.84	26,00	-	-	-	-
C9	1.59	-5.48	29,00	-	-	-	-
C10	1.62	-5.35	32,00	-	-	-	-
C11	1.23	-5.09	35,00	-	-	-	-
C12	1.76	-5.14	39,00	-	-	-	-
C14	2.20	-3.61	45,00	-	-	-	-
C15	1.55	-5.30	48,00	-	-	-	-
C16	1.74	-5.47	51,00	-	-	-	-
C17	1.68	-5.28	54,00	-	-	-	-
C18	1.64	-5.21	57,00	0,70679 + /-1	2,5	2630,0	0,001
C19	1.79	-5.35	60,00	-	-	-	-
C20	1.53	-5.59	63,00	-	-	-	-
C21	-0.86	-6.00	66,00	-	-	-	-
C22	1.85	-5.44	69,00	-	-	-	-
C23	2.20	-3.54	72,00	-	-	-	-
C24	0.59	-7.25	75,00	-	-	-	-
C25	0.51	-7.34	78,00	-	-	-	-
C26	0.76	-7.10	81,00	-	-	-	-
C27	0.85	-7.08	84,00	-	-	-	-
C28	0.68	-7.13	87,00	-	-	-	-
C29	-0.29	-7.84	90,00	-	-	-	-
C30	0.22	-7.82	93,00	-	-	-	-
C31	-0.34	-9.82	96,00	-	-	-	-
F230A – Formação Rocinha							
AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ <sub>V-PDB</sub> )	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ <sub>V-PDB</sub> )	Prof. (m)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Mn/Sr
G12	-5.04	-7.54	52,00	-	-	-	-
G13	-5.72	-8.46	52,50	-	-	-	-
G14	-6.62	-8.32	54,20	-	-	-	-
G15	1.30	-9.62	56,60	-	-	-	-
G21	3.33	-10.03	62,00	0,70766 + /-1	10,0	6140,0	0,002
G22	2.93	-10.25	67,30	-	-	-	-
G20	3.03	-9.54	74,00	-	-	-	-
G19	3.22	-9.71	75,30	-	-	-	-
G17	1.65	-9.87	80,00	-	-	-	-
G18	0.11	-9.61	82,00	-	-	-	-
G16	-2.58	-9.57	83,30	-	-	-	-
CD05 – Formação Rocinha							
AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ <sub>V-PDB</sub> )	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ <sub>V-PDB</sub> )	Prof. (m)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Mn/Sr
G3	-6.58	-5.14	69,20	-	-	-	-
G6	-3.52	-5.81	71,70	-	-	-	-
G9	-2.85	-6.20	76,00	-	-	-	-
G11	-3.58	-6.01	79,80	-	-	-	-

O fósforo deposita-se no fundo do mar misturado com detritos orgânicos e é enterrado com os sedimentos (Boggs, 2006). A produção de matéria orgânica é o principal mecanismo responsável pelo fracionamento isotópico do carbono estável, que ocorre fundamentalmente por meio da fotossíntese. Neste processo é utilizado preferencialmente o  $^{12}\text{C}$ , acarretando num enriquecimento relativo do meio (água do mar) em  $^{13}\text{C}$  e, portanto, uma elevação dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  em precipitados químicos (Schidlowski *et al.* 1983). Esta acumulação de matéria orgânica nos fosforitos causa um enriquecimento em  $^{12}\text{C}$  (carbono orgânico) e consequentemente os valores da razão  $\delta^{13}\text{C}$  diminuem (Vieira, 2007). No perfil do furo F230A verifica-se ainda que há uma ausência de co-variância entre carbono e oxigênio nos níveis fosfáticos.

A razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  da Formação Lagamar apresenta três amostras com valores de 0,70679 e 0,70685, e outras duas com razões um pouco mais elevadas (0,70718 e 0,70788). Esses valores podem indicar idades Neoproterozoicas, do Toniano ao Criogineano, na curva de Halverson *et al.* (2010). Porém, esses valores mais baixos e mais frequentes também são encontrados em carbonatos do Grupo Paranoá, interpretados como representativos de uma bacia de margem passiva do final do Mesoproterozoico (Alvarenga *et al.*, 2007, 2014).

Uma amostra da Formação Rocinha apresenta razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de 0,70766. Razões acima de 0,707 são geralmente interpretadas como de idade do final do Neoproterozoico, mais jovem do que 700Ma (Halverson *et al.*, 2010). Valores iguais também são encontrados em rochas carbonáticas do Grupo Bambuí por todo o Cráton do São Francisco (Babinski *et al.*, 2007; Misi *et al.*, 2007; Caxito *et al.*, 2012; Alvarenga *et al.*, 2014). Assim, provavelmente, as rochas da Formação Rocinha possuem idades do final do Neoproterozoico, na passagem do Criogeniano para o Ediacarano.

## 5. CONCLUSÕES

Na região da cidade de Lagamar foram mapeadas as formações Santo Antônio do Bonito, Rocinha, Lagamar e Serra do Garrote no Grupo Vazante, e no Grupo Bambuí as formações Serra da Saudade e Lagoa Formosa.

Estas formações formam sequências marinhas costeiras, e foram individualizadas em 10 associações de fácies (AF). A AF1 foi interpretada como um ambiente glacio-marinho correspondente à unidade litoestratigráfica Santo Antônio do Bonito. A Formação Rocinha divide-se em duas associações de fácies de ambiente plataformal, onde a AF2 representa uma porção mais profunda e abaixo do

nível de ondas do que a AF3. A AF4 é uma deposição do tipo *fan delta* e o início da deposição da Formação Lagamar (Membro Arrependido). As AF5, AF6, e AF7 correspondem a sub-ambientes dentro de uma plataforma carbonática influenciada por ondas e marés, correspondente ao Membro Sumidouro da Formação Lagamar. Estes sub-ambientes são respectivamente inframaré, inframaré a intermaré (*patch reef*), e intermaré (laguna). A Formação Serra do Garrote está representada pela AF8, com características plataformais. A AF9 e AF10 correspondem respectivamente às Formações Serra da Saudade e Lagoa Formosa. Ambas representam ambiente plataformal, mas no caso da AF10 um ambiente plataformal com fluxo de detritos.

Duas importantes falhas inversas foram identificadas, e designadas como falha de Lagamar I e II. A falha de Lagamar I colocou as formações Serra do Garrote e Lagamar mais antigas, sobre as formações Rocinha e Santo Antônio do Bonito. A falha de Lagamar II inverteu as formações do Grupo Vazante (Rocinha e Santo Antônio do Bonito) sobre as formações do Grupo Bambuí (Serra da Saudade e Lagoa Formosa).

Os perfis quimioestratigráficos nas formações Rocinha e Lagamar do Grupo Vazante mostram que os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  ficam negativos nos níveis fosfáticos, onde a quantidade de matéria orgânica é maior.

Os valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  podem indicar idade mesoproterozoica a neoproterozoica (Toniano/Criogeniano) para a Formação Lagamar, e idade neoproterozoica (Criogeniano/Ediacarano) para a Formação Rocinha. Estes dados de estrôncio para a Formação Rocinha, se comprovados, poderiam indicar uma correlação quimioestratigráfica com o Grupo Bambuí, e corroboram com a geologia estrutural local, ou seja, a falha de Lagamar I inverteu a estratigrafia, colocando a Formação Lagamar mais antiga em cima da Formação Rocinha mais jovem.

## 6. AGRADECIMENTOS

À CAPES - Coord. de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior, pela bolsa de pesquisa de Pós-graduação. À CPRM - Serviço Geológico do Brasil (Belo Horizonte), equipe de Projeto Vazante-Paracatu I, em especial ao Dr. Claiton P. Pinto e Dr. Marcos C. Baptista pela troca de informações cartográficas e geológicas da região. À empresa Votorantim Metais – Vazante pelo financiamento dos trabalhos de campo. Às empresas Galvani – Unidade de Lagamar e CALA (Calcários de Lagamar) pelo acesso das amostras dos furos de sondagem. Ao pessoal técnico do LABISE – Universidade Federal

de Pernambuco (UFPE) e ao Laboratório Isótopos Estáveis da Universidade de Brasília (UnB), pela realização das análises de isótopos. Os projetos CNPq nº 447449/2014-1 e FAPEMIG – CRA – APQ 01711-14 apoiaram a fase final de produção do artigo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F.F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V. et al. (ed.) *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, p. 17-34, São Paulo, Beca, 647p.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco carton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33: 127-139.
- Almeida F.F.M., 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7 (4): 349-364.
- Alvarenga, C.J.S., Della Giustina, M.E.S., Silva, M.G.C., Santos, R.V., Gioia, S.M.C., Guimarães, E.M., Dardenne, M.A., Sial, A.N., Ferreira, V.P., 2007. Variações dos isótopos de C e Sr em carbonatos pré e pós-glaciação Jequitaiá (Esturtiano) na região de Bezerra-Formosa, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências* 37, 147–155.
- Alvarenga, C.J.S.; Santos, R.V.; Vieira, L.C.; Lima, B.A.F.; Mancini, L.H. 2014. Meso-Neoproterozoic isotope stratigraphy on carbonates platforms in the Brasília Belt of Brazil. *Precambrian Research*, v. 251, p. 164-180.
- Babinski, M., Vieira, L.C., Trindade, R.I.F., 2007. Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambu Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. *Terra Nova* 19, 401–406.
- Bertoni, M.E.; Rooney, A.D.; Selby, D.; Alkmim, F.F.; Le Heron, D.P. 2014. Neoproterozoic Re–Os systematics of organic-rich rocks in the São Francisco Basin, Brazil and implications for hydrocarbon exploration. *Precambrian Research* 255: 355–366.
- Boggs, Jr.S. 2006. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy* (4<sup>th</sup> ed.) Pearson Prentice Hall.
- Caxito F.A., Halverson G.P., Uhlein A., Stevenson R., Dias T.G., Uhlein G.J. 2012. Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Research*, 200-203: 38-58.
- Cloud, P.E. & Dardenne, M.A. 1973. Proterozoic age of the Bambuí Group in Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 84:1673-1676.
- Costa, M.T. da & Branco, J.J.R., 1961. Série Bambuí – Roteiro para excursão Belo Horizonte – Brasília. In: Congr. Bras. de Geologia, 14, Belo Horizonte, Publicação 15, UFMG.
- Dardenne, M.A. & Campos Neto, M.C. 1976. Geologia da região de Lagamar, Minas Gerais. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Anais, p.17.
- Dardenne M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30 (2): 597-610.
- Dardenne, M.A., 1979. Les minéralisations de plomb, zinc, flúor du Proterozoïque Supérieur dans Le Brésil Central, University of Paris VI, Doctorate thesis 251p.
- Dardenne M. A., Freitas-Silva F. H., Souza J. C. F., Campos J. E. G. 1998. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. In: SBG, XXXX Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, Resumos, p. 26.
- Dardenne, M.A., 2000. The Brasília fold belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.) *Tectonic Evolution of South América*, 231-264.
- Dardenne M.A., 2001. Lithostratigraphic sedimentary sequences of the Vazante Group. In: A. Misi & J.B.G. Teixeira (eds.) *Proterozoic Base Metal Deposits of Africa and South America*, IGCP 450 1st Field Workshop, Belo Horizonte and Paracatu, Brazil, p. 48-50.
- Dardenne, M.A.; Campos, J.E.G.; Campos Neto, M.C. 2005. Estromatólitos colunares no Sumidouro do Córrego Carrapato, Lagamar (MG) - Registro de construções dolomíticas cilindro-cônicas por ciano-bactérias no Proterozóico do Brasil. In: Winge,M.; Schobbenhaus,C.; Berbert-Born,M.; Queiroz,E.T.; Campos,D.A.; Souza,C.R.G. (Edit.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*.
- Fuck R.A., Jardim de Sá E.F., Pimentel M.M., Dardenne M.A. & Pedrosa-Soares A.C. 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese do conhecimento. In: Dominguez J.M.L. & Misi A. (eds). *O Cráton do São Francisco*. SBG/SGM/CNPq, Salvador, 121-146.
- Fuck, R.A., Pimentel, M.M., Soares J.E., Dantas, E. L. 2005. Compartimentação da Faixa Brasília. In: *Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, 9, Anais, p.26-27.
- Geboy, N.J.; Kaufman, A.J.; Walker, R.J.; Misi, A.; Oliveira, T.F.; Miller, K.E.; Azmy, K.; Kendal, B.; Poulon, S.W. 2013. Re–Os age constraints and new observations for Proterozoic glacial deposits in the Vazante Group, Brazil. *Precambrian Research*, 238: 199–213.
- Halverson G.P., Hoffman P.F., Schrag D.P., Maloof A.C. 2005. Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record. *Geological Society of America*, 117(9): 1181-1207.
- Halverson G.P., Dudás F.O., Maloof A.C., Bowring S.A. 2007. Evolution of the <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr composition of Neoproterozoic seawater. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 256: 103–129
- Halverson G.P., Wade, B.P., Hurtgen M.T. & Barovich, K. M. 2010. Neoproterozoic chemostratigraphy. *Precambrian Research*, 182: 337–350.
- Hoffman, P.F. & Schrag, D.P., 2002. The Snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, 14(3): 129-155.
- Jacobsen S. & Kaufman A. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of the Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology*, 161:37-57.
- Kaufman, A., Jacobsen, S., Knoll, A., 1993. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate. *Earth and Planetary Science Letters*, 120: 409–430.
- Kaufman A.J. & Knoll A.H. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic compositional of seawater: stratigrafic and biogeochemical implications. *Precambrian Research*, 73: 27-49.
- Kennedy, M.J., Runnegar, B., Prave, A.R., Hoffmann, K.H., Arthur, M. 1998. Two or four Neoproterozoic glaciations?. *Geology* 26, 1059-1063.
- Marques, C.S.S. 2015. Geologia e quimioestratigrafia do Grupo Vazante em Lagamar, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 134p.
- Martins-Neto, M.A., Alkmim, F.F., 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: registro da quebra da Rodínia e colagem de Gondwana. In: Pinto C.P., Martins-Neto M.A.

- (Eds.), Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais, SBG/MG, pp.9-30.
- Martins M. & Lemos V.B. 2007. Análise estratigráfica das seqüências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4-suplemento):156-167.
- Meert, J.G. & Torsvik, T.H. 2003. The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited. *Tectonophysics*, 375: 261-288
- Misi, A.; Kaufman, A.J.; Veizer, J.; Powis, K.; Azmy, K.; Boggiani, P.C.; Gaucher, C.; Teixeira, J.B.G.; Sanches, A.L.; Lyver, S.S.S. 2007. Chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic Successions in South America. *Chem. Geol.* 237: 161-185.
- Misi, A.; Azmy, K.; Kaufman, A.J.; Oliveira, T.F.; Sanches, A.L.; Oliveira, G.D. 2014. Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brazil: Implications to metallogenic and phosphogenic models. *Ore Geology Reviews*, 63: 76-90.
- Nogueira, G.M.S., 1993. Enquadramento litoestratigráfico, sedimentologia e evolução geoquímica do Depósito Fosfático de Lagamar, MG - Formação Vazante – Proterozóico Médio. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 134p.
- Oliveira, G. D., 2013. Reconstrução Paleoambiental e Químioestratigrafia dos Carbonatos Hospedeiros do depósito de zinco silicatado de Vazante, MG. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 95p.
- Pimentel, M.M., Dardenne, M.A., Fuck, R.A., Viana, M.G., Junges, S.L., Fischel, D.P., Seer, H., Dantas, E.L. 2001. Nd Isotopes and the provenance of detrital sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil. *Jour. South American Earth Science*, 14(6): 571-585.
- Pimentel, M. M.; Rodrigues, J. B.; Della Giustina, M. E. S; Junges, S; Matteini M. e Armstrong R. 2011. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS UePb sedimentary provenance data: A review. *Journal of South American Earth Sciences* 31, p. 345 a 357.
- Pinho, J.M.M. & Dardenne, M.A., 1994. Caracterização da falha de Lagamar, NW de Minas Gerais. 46º Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, SC. Anais de resumos expandidos. p. 246-247.
- Rodrigues, J.B., Pimentel, M.M., Buhn B., Matteini M., Dardenne, M.A. Alvarenga, C.J.S. & Armstrong. R.A. 2012. Provenance of the Vazante Group: New U–Pb, Sm–Nd, Lu–Hf isotopic data and implications for the tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt. *Gondwana Research* 21: 439–450.
- Sanches, A.L. 2012. Fosforitos Neoproterozóicos dos Grupos Vazante (MG) e Una (BA): origem, idades e correlações. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, 158p.
- Schidlowski M., Hayes J.M., Kaplan I.R. 1983. Isotopic inference of ancient biochemistries: carbon, sulfur, hydrogen and nitrogen. In: Schopf, J.M. (ed.), *Earth's Earliest Biosphere, its origin and evolution*. Princeton University Press, p.149-186.
- Uhlein, A.; Baptista, M.C.; Seer, H.J.; Caxito, F.A.; Uhlein, G.J.; Dardenne, M.A. 2011. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): sistema deposicional de leque submarino em bacia de ante-país. *Geonomos* 19(2): 163-172.
- Veizer, J.; Ala, D.; Azmy, K.; Bruckschen, P., Bruhn, F; Buhl, D. Carden, G.; Diener, A.; Ebneth, S.; Goddiss, Y., Jasper, T.; Korte, C.; Pawellek, F.; Podlaha, O; Strauss, H., 1999.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161: 59-88.
- Valeriano C.M., Dardenne M.A., Fonseca M.A., Simões L.S.A., Seer, H.J. 2004. A evolução tectônica da Faixa Brasília. In: V. Mantesso Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (eds), *Geologia do continente Sul-Americano – Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, p. 575-592.
- Vieira, L.C. 2007. A Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí) e as variações paleoambientais no final do Proterozóico. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 190 pp.
- Walter M.R., Veevers J.J., Calver C.R., Gorgan P., Hill A.C. 2000. Dating the 840-544 Ma Neoproterozoic interval by isotopes of strontium, carbon, and sulfur in seawater, and some interpretative models. *Precambrian Research*, 100: 371-433.