

Geoquímica e condições paleoambientais de deposição das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, MG

Luisa Costa Martins Vieira^{1*}
Tânia Mara Dussin²
Leila Nunes Menegasse Velásquez²

¹Programa de Pós-Graduação em Geologia
Instituto de Geociências
Universidade Federal de Minas Gerais
Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627
Pampulha
Belo Horizonte, MG, Brasil.
CEP 31270-901

²Instituto de Geociências
Universidade Federal de Minas Gerais
Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627
Pampulha
Belo Horizonte, MG, Brasil.
CEP 31270-901

luisacmvieira@gmail.com
tdussin@gmail.com
menegasse@yahoo.com.br

* Autora Correspondente

RESUMO

Elementos maiores e traços de rochas carbonáticas neoproterozóicas da Formação Sete Lagoas aflorantes na região englobando a Área de Proteção Ambiental do Carste Lagoa Santa, a norte de Belo Horizonte, foram analisados para obter informações sobre as condições paleoambientais de deposição. A base Formação Sete Lagoas é representada pelo Membro Pedro Leopoldo de composição pelito-carbonática, caracterizado por teores variados de Ca (14,6-39,4%) e Si (0,23-20,12%) e baixo conteúdo de Mg (0,05-1,98%) e Al (0,08-3,9%). Os teores de Th, U e Zr são elevados e os padrões de ETR+Y são caracterizados por leve enriquecimento de ETR pesados, anomalias positivas de La e negativas de Ce. O Membro Pedro Leopoldo é sobreposto pelas rochas carbonáticas mais puras e escuras do Lagoa Santa. Estes mármore mostram altas concentrações de Ca (38,6 a 40,5%) e mais baixos teores de Si (0,02-1%), de Mg (0,08-0,23%) e de Al (0,01-0,27%). São caracterizados por concentrações mais baixas de Th, U e Zr relativamente à sequência inferior, anomalias negativas de La e positivas de Ce e Y, e por ampla variação do fracionamento de ETR leves e pesados. As características petrográficas e geoquímicas sugerem que a sedimentação começou em ambiente marinho, sob águas profundas, anóxicas e com marcada contribuição terrígena. As características químicas do Membro Lagoa Santa indicam que neste período o ambiente de deposição mudou, evoluindo para mais proximal e óxico.

Palavras-Chave: Formação Sete Lagoas, Geoquímica, Calcários, Ambiente deposicional.

ABSTRACT

Major and trace elements in Neoproterozoic carbonate rocks of Sete Lagoas Formation outcrop in region including Environmental Protection Area of Lagoa Santa Karst, north of Belo Horizonte, were analyzed for obtain depositional and paleo-environmental conditions information. Pedro Leopoldo is the basal member of Sete Lagoas Formation, with pelitic-carbonate composition, characterized by variable contents of Ca (14,6-39,4%) and Si (0,23-20,12%) and low content of Mg (0,05-1,98%) e Al (0,08-3,9%). Th, U and Zr contents are high and their PAAS-normalized (Post Archean Australian Shale) REE+Y patterns exhibit light enrichment of heavy REE, positive La and negative Ce anomalies. Pedro Leopoldo member is overlaid for purer and darker Lagoa Santa carbonate rocks. These marbles show high concentration of Ca (38,6 a 40,5%) and lower contents of Si (0,02-1%), of Mg (0,08-0,23%) and of Al (0,01-0,27%). They are characterized by lower concentrations of Th, U and Zr relatively by inferior sequence; negative La and positive Ce and Y anomalies, and REE+Y patterns showing wide variation of heavy and light REE fractionation. The petrographic and geochemical characteristics suggest the sedimentation began in marine environment, under deep, anoxic waters and

with a marked terrigenous contribution. The chemical characteristics of Lagoa Santa member indicate in this period the deposition environment changed, evolving to more proximal and oxic.

Keywords: Sete Lagoas Formation, Geochemistry, Limestones, Depositional environment.

1. INTRODUÇÃO

Este estudo foi realizado no domínio das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas que afloram na região da Área de Proteção Ambiental (APA) Carste Lagoa Santa, localizada na parte norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte,

em Minas Gerais (Figura 1). A área abrange toda a APA, se extrapolando para norte e oeste, num total de 520 km², sendo caracterizada por diversificada geomorfologia e feições típicas do ambiente cárstico.

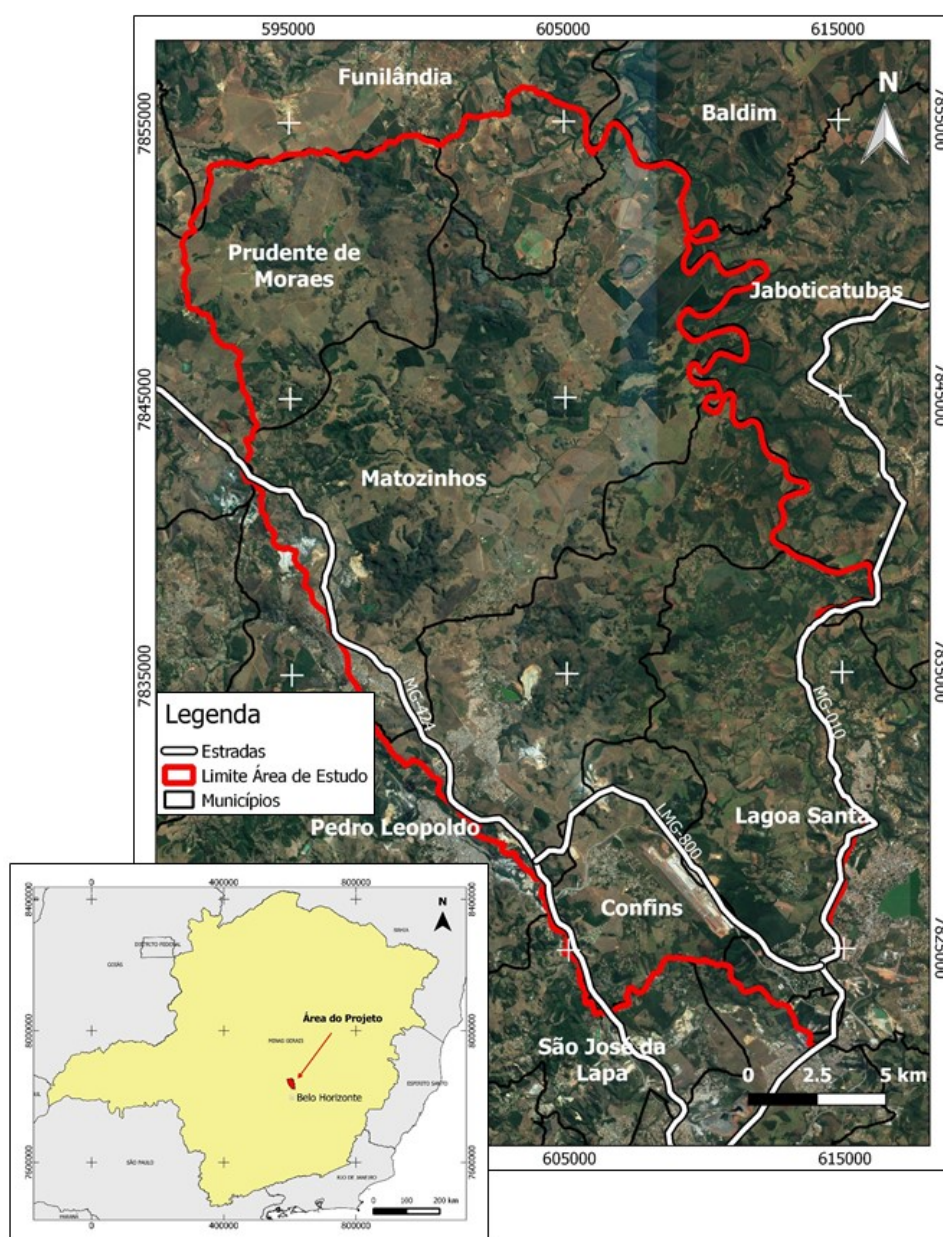


Figura 1
Mapa de localização e municípios da área de estudo, a 30 km ao norte de Belo Horizonte, e abrangendo a APA Carste de Lagoa Santa.

Na região de Lagoa Santa, as rochas carbonáticas da base do Grupo Bambuí, mostram significativo metamorfismo e deformação, com obliteração das estruturas primárias das rochas, aspectos que em muito as difere das rochas estudadas por Vieira *et al.* (2007) na região de Sete Lagoas, 60 km a noroeste, além dos limites desse estudo. Desta forma, a determinação de aspectos dos ambientes de deposição dos carbonatos de Lagoa Santa torna-se complexa e o problema demanda uma solução através de uma abordagem não convencional. A geoquímica tem se mostrado uma ferramenta de grande auxílio tanto para a classificação das rochas carbonáticas recristalizadas quanto para a análise do ambiente em que foram depositadas, contando com trabalhos em diversas regiões do mundo (Madhavaraju & González-Léon 2012, Miche *et al.* 2013, Chen *et al.* 2014, Franchi *et al.* 2016). No Brasil estudos anteriores já foram realizados na bacia do Bambuí (Vieira *et al.* 2007, Caxito *et al.* 2012, Uhlein *et al.* 2012, Mora 2015), mesmo em áreas próximas à região de estudo, porém em sua maioria o foco é na geoquímica isotópica e em outras formações pertencentes ao Grupo.

A análise isotópica dos trabalhos anteriores enfatizam as sequências carbonáticas depositadas a partir de transgressão marinha após períodos de glaciação, também chamadas de *cap carbonates* ou carbonatos de capa. Na borda sudeste do Cráton São Francisco, os *cap carbonates* identificados estão inseridos na Formação Sete Lagoas. Estudos combinados das características sedimentares e isotópicas dos *cap carbonates* da Formação Sete Lagoas, reportam uma forte relação entre fácies sedimentares e $\delta^{13}\text{C}$ (Vieira *et al.* 2007, Caxito *et al.* 2012). Segundo Vieira *et al.* (2007) a sequência carbonática da Formação Sete Lagoas é subdividida em sete associações de fácies que formam dois megaciclos. O primeiro é iniciado em depósito de plataforma profunda supersaturada em CaCO_3 em que se depositam cristais de aragonita da base da formação, e termina em depósitos com influência de tempestade. Já o segundo megaciclo é caracterizado como depósitos de plataforma rasa

1.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo se insere na porção sudeste do Cráton do São Francisco que é recoberto na região por rochas metassedimentares neoproterozóicas detrítico-glaciais (Grupo Macaúbas e Formação Jequitaiá, sequência basal) e pelítico-carbonáticos (Grupo Bambuí, sequência de topo) do Supergrupo São Francisco (Almeida 1977, Dardenne 1978, Campos & Dardenne 1997,

a profunda, ricos em matéria orgânica, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ positivos. Em função dos dados obtidos em seu trabalho, Vieira *et al.* (2007) correlacionaram a sequência a outros depósitos descritos no mundo e atribuíram à Fm Sete Lagoas idade Sturtiana (~800-635 Ma). Entretanto, Caxito *et al.* (2012) sugerem que as fácies de leques de aragonita e as finas capas de dolomita na base da sequência carbonática correlacionam com depósitos Ediacaranos (~635-541 Ma) de ocorrência mundial, sem nenhuma descrição em sequências Sturtianas. A idade Ediacarana da Formação Sete Lagoas pode ser corroborada a partir da recente descoberta do fóssil guia *Cloudina sp.* em Januária (Warren *et al.* 2014), em porções medianas da formação. Como aspecto peculiar deste depósito, Vieira *et al.* (2007) ressalta que a sucessão transgressiva com superfície de inundação máxima coincide com a transição de isótopos de C de valores negativos para positivos.

No mapeamento geológico em escala 1:50.000 já realizado por Ribeiro *et al.* (2003) no âmbito do Projeto Vida há a descrição da geologia local, entretanto não há um detalhamento geoquímico que se faz necessário para caracterização das rochas e ambiente deposicional devido à característica deformacional da área. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo contribuir para a elucidção do aspecto deposicional e correlacionar os resultados encontrados com as interpretações feitas sobre a sequência na região e áreas adjacentes, a partir da apresentação de dados petrográficos e litoquímicos obtidos sobre estas rochas.

Para tanto, o trabalho se baseou em mapeamento geológico com descrição litológica e estrutural macro e micropetrográfica das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas. Considerando as posições geográficas e, quando possível, estratigráficas, além das descrições de lâminas petrográficas, foi realizada a amostragem de rochas para análise química de elementos maiores, traços e terra raras (ETR). Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente e apresentados neste estudo.

Alkmim & Martins-Neto 2001, Alkmim 2004). Estas sequências estão diretamente sobrepostas ao complexo gnáissico-migmatítico que constitui o embasamento regional.

O Grupo Bambuí é interpretado como uma sequência de sedimentos platformais depositados em ambiente marinho raso, durante uma sucessão de ciclos transgressivos e regressivos (Ribeiro *et al.*

2003, Iglesias & Uhlein 2009, Uhlein 2014). Afloram na região apenas as formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena pertencentes ao Grupo Bambuí. A Formação Sete Lagoas, que é o foco deste trabalho, foi subdividida em dois Membros: um inferior denominado Membro Pedro Leopoldo e um superior, Membro Lagoa Santa, conforme proposição original de Schöll (1972, 1973) mais tarde modificada por Dardenne (1978) e utilizada em mapeamento regional mais recente (Tuller *et al.* 2010).

Na área o Membro Pedro Leopoldo encontra-se em sobreposição ao Complexo Gnáissico-Migmatítico por falha de descolamento, sendo o contato entre eles brusco e discordante. O

1.2 GEOLOGIA LOCAL

As rochas metassedimentares neoproterozóicas pertencentes ao Grupo Bambuí são predominantes na área estudada. A sequência pelito-carbonática está diretamente sobreposta ao embasamento gnáissico-migmatítico, que possui uma ocorrência restrita. Coberturas cenozóicas são amplamente distribuídas e formadas por sedimentos detrito-lateríticos e aluvionares (Figura 2).

O complexo gnáissico-migmatítico designado Complexo Belo Horizonte (Tuller *et al.* 2010), restringe-se a uma faixa de direção NW-SE e delimita a área a sudoeste. As rochas são principalmente gnaisses acinzentados de composição granodiorítica, granulação média a grossa, exibindo orientação bem marcada de biotita e anfibólio. As principais alterações minerais são sericitização e saussuritização de feldspatos, uralitização do piroxênio e cloritização do anfibólio e biotita. Apresentam metamorfismo da fácies anfíbolito, enquanto a paragênese formada pelo retrometamorfismo é típica de fácies xisto verde. O tipo litológico mais comum é um gnaisse com bandamento não orientado e porções migmatíticas. Estas estruturas estão relacionadas ao regime de deformação dúctil que acompanhou o metamorfismo da fácies anfíbolito que caracterizou a orogênese Transamazônica do Paleoproterozóico, regionalmente.

O Grupo Bambuí é formado pelas Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, sendo a primeira mais antiga, composta por rochas carbonáticas e

Membro Lagoa Santa é sobreposto ao Pedro Leopoldo e sotoposto à Formação Serra de Santa Helena também por falhas de descolamento (Ribeiro *et al.* 2003). Os dois Membros apresentam recristalização intensa dos cristais de carbonato, sendo possível a observações de poucas estruturas diagenéticas. São identificados estilólitos e dissolução sob pressão, bandamento, laminação, acamamento gradacional normal e estratificação cruzada tabular (Tuller *et al.* 2010). Ainda de acordo com os autores, o grau de deformação é maior na porção leste do limite da área, na qual as rochas encontram-se bastante afetadas pelo tectonismo e em grande parte milonitizadas, além de muitas estruturas primárias estarem obliteradas.

diretamente sobreposta às rochas do complexo gnáissico. Este contato, não observado em campo, constitui uma discordância erosiva e angular (Ribeiro *et al.* 2003). A Formação Serra de Santa Helena, essencialmente constituída por metapelitos carbonáticos, sobrepõe-se à Formação Sete Lagoas em contato tectônico.

A Formação Sete Lagoas ocupa principalmente as porções central, noroeste e sudoeste. A unidade inferior é o Membro Pedro Leopoldo composto por metacalcários com intercalações pelíticas, e o superior é o Membro Lagoa Santa, constituído por metacalcários puros. O contato entre os membros é por vezes tectônico, e outras vezes gradacional.

O Membro Pedro Leopoldo aflora próximo ao limite oeste da área, desde a altura de Matozinhos a São José da Lapa, e continua na borda sul, acompanhando o Ribeirão da Mata até Vespasiano. Aflora ainda a leste, próximo ao curso do Rio das Velhas, em uma faixa N-S que se estende de Fidalgo à Lagoa Santa, e em uma pequena porção no extremo norte da área, próximo a São Bento. É constituído predominantemente pelos metacalcários de granulação muito fina a microcristalina, impuros, essencialmente compostos por calcita, sericita e quartzo, e eventuais ocorrências de sulfetos disseminados. As rochas da base são homogêneas, possuem coloração cinza claro e aspecto sacaroide (Figura 3A).

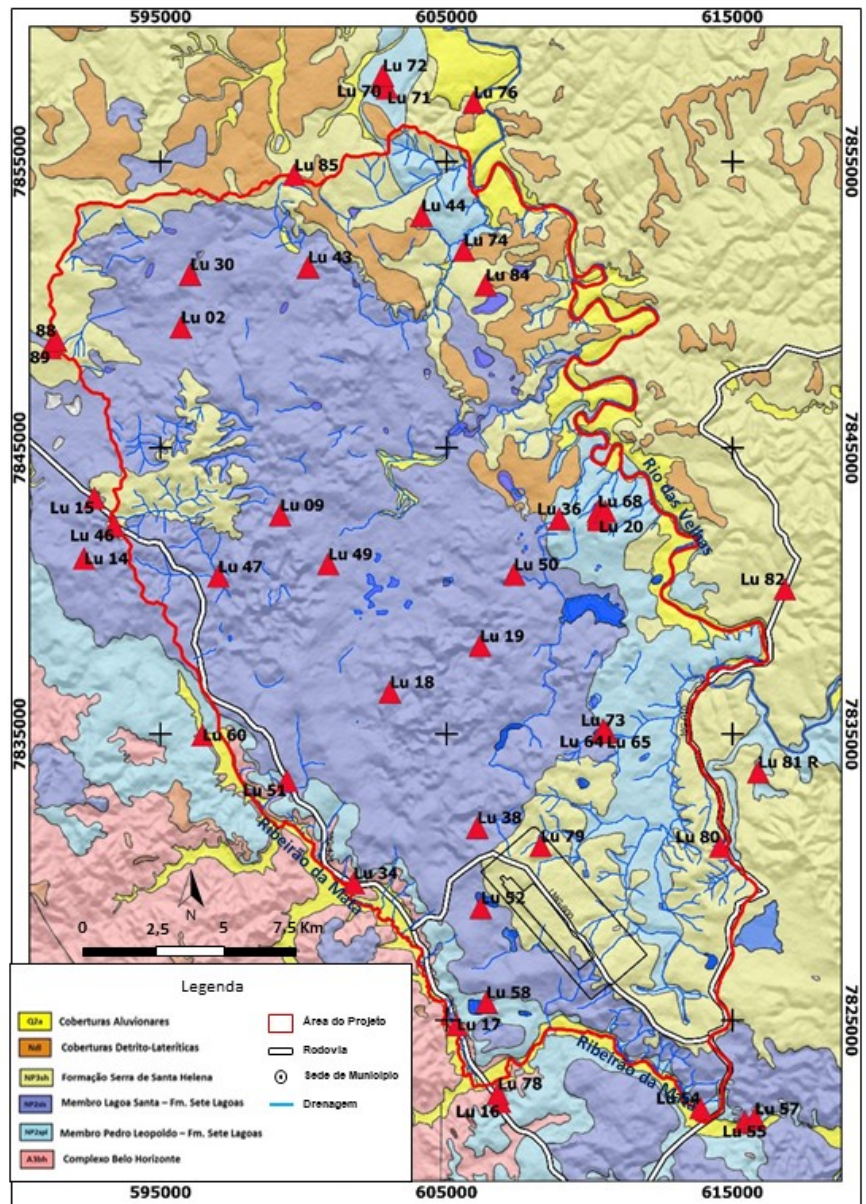


Figura 2

Mapa geológico da área de estudo com a localização das amostras analisadas. Base geológica 1:100.000 de CPRM – Serviço Geológico do Brasil das folhas Belo Horizonte, Contagem, Sete Lagoas e Baldim. Disponível em geobank do site da empresa: <http://www.cprm.gov.br/>

O Membro Lagoa Santa ocupa toda a parte central, norte e uma faixa estreita ao sul. Seus afloramentos geralmente são grandes paredões de calcário com camadas sub-horizontais, bastante carstificados e fraturados (Figura 3B). É formado por metacalcários puros, cinza escuro, cristalinos médios a finos (Figuras 3C e 3D), em geral com granulação mais grossa que os do Pedro Leopoldo, e sulfetos estão disseminados pelas rochas.

Sobreposta principalmente ao Membro Lagoa Santa, algumas vezes sobre o Membro Pedro Leopoldo, a Formação Serra de Santa Helena ocorre principalmente nas regiões NE

(entre Fidalgo e São Bento) e SE (entre Lapinha e Lagoa Santa, se estendendo até o Aeroporto Internacional Tancredo Neves), em contato tectônico entre essas unidades. É representada por metassiltitos, com alto grau de intemperismo, por isso predominantemente friáveis, com textura argilosa, coloração muito variada, em geral do amarelo ao vermelho e do creme ao cinza claro. Quando fresca a rocha tem coloração esverdeada. Os metassiltitos são compostos essencialmente por sericita e quartzo, secundariamente por argila e óxidos de ferro.

Com o metamorfismo de fácies xisto verde, os calcários do Membro Pedro Leopoldo mostram recristalização metamórfica com a formação de uma foliação principal. As rochas do topo, mais impuras, apresentam intercalação pelítica frequente, cujas lâminas formam planos de fraqueza contendo uma evidente lineação de estiramento e textura sedosa pela presença da

sericita. As intercalações pelíticas conferem ainda ao Membro Pedro Leopoldo uma gama de estruturas deformacionais que são mais dificilmente encontradas nos calcários do Membro Lagoa Santa. São amplamente observadas foliações, clivagens de crenulação, mica *fish*, sombras de pressão, lineação mineral, estruturas S-C, dobras suaves a cerradas e de arraste (Figuras 3E e 3F).

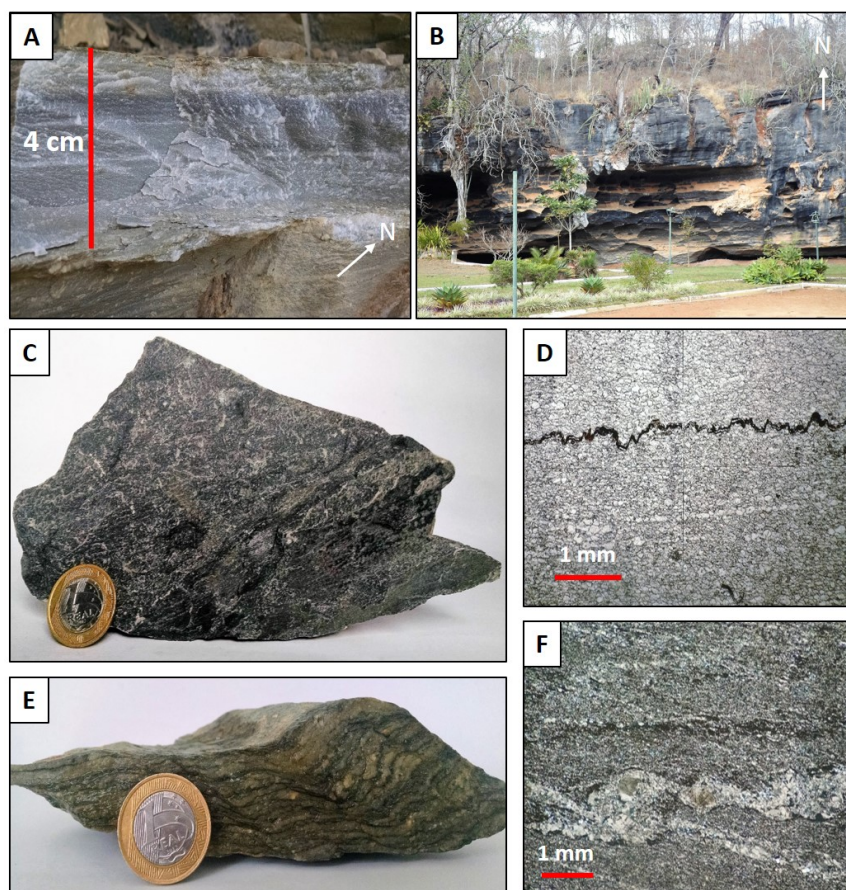


Figura 3

A) Afloramento de calcário da base do Membro Pedro Leopoldo, com aspecto sacaroide, no município de Vespasiano/MG; B) Afloramento carstificado de calcário do Membro Lagoa Santa em Lapinha/MG; C) Calcarenito puro do Membro Lagoa Santa; D) Fotomicrografia de calcário calcítico do Lagoa Santa com nicóis paralelos e aumento de 40x; E) Calcário impuro do Membro Pedro Leopoldo crenulado; F) Fotomicrografia de calcário impuro com estruturas S-C do Membro Pedro Leopoldo com nicóis cruzados e aumento de 40 x.

As rochas do Membro superior, Lagoa Santa, exibem uma foliação bem marcada pela orientação de cristais de calcita, subparalela ao acamamento, lineação de estiramento nas superfícies dos estratos, veios de calcita de espessuras milimétricas a centimétricas, milonitização e dobras isoclinais intrafoliais, recumbentes com vergência para oeste. Assim

como no Membro Pedro Leopoldo, apresenta metamorfismo de fácies xisto verde.

O mesmo grau de metamorfismo é identificado nas rochas da Formação Serra de Santa Helena, que apresenta ainda laminação, caracterizada pela intercalação de lâminas espessas sericíticas e lâminas delgadas quartzosas, crenulação e frequentes dobras fechadas a abertas.

2. MÉTODO DE AMOSTRAGEM GEOQUÍMICAS E TÉCNICAS ANALÍTICAS

Foram analisadas amostras de rochas representativas da posição estratigráfica em afloramentos de maior grau de preservação. O estudo petrográfico ao microscópio representou nova etapa de triagem das amostras tendo sido consideradas principalmente a ausência de alteração visível ou vênulas de calcita secundária. Ao final deste processo, foram selecionadas para a realização de análises químicas 20 amostras de rochas carbonáticas do Membro Pedro Leopoldo e 19 amostras do Membro Lagoa Santa (Figura 2).

As amostras selecionadas para análise química foram britadas a 3 mm, homogeneizadas, submetidas a quarteamento e pulverizadas em moinho de aço a 150 mesh. Para a determinação de óxidos maiores a amostra foi submetida à secagem a 105°C,

homogeneizada com o tetraborato de lítio e então levada à fusão. As pastilhas formadas nessa etapa foram encaminhadas para leitura no espectrômetro de raio-x utilizando curva de calibração preparada com matriz semelhante à amostra.

A determinação de elementos traços e terras raras foi feita por ICP (*Induced Couple Plasma*). As amostras foram preparadas por digestão multiácida e, então, transferidas para tubos de vidro com água deionizada no caso da determinação por ICP-OES (*Induced Couple Plasma – Optic Emission Spectrometry*) e com água ultrapura para determinação por ICP-MS (*Induced Couple Plasma – Mass Spectrometry*). Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

3. RESULTADOS

3.1 ELEMENTOS MAIORES

As rochas do Membro Pedro Leopoldo apresentam teores mais elevados de Si, Al, Fe, Mg, Ti, Na, K e Mn que aquelas do Membro Lagoa Santa. Apenas os teores de Ca e P são maiores no segundo Membro, variando de 38,6 a 40,5% e 0,03 a 0,09%, respectivamente, enquanto no Pedro Leopoldo varia de 14,6 a 39,4% e 0,01 a 0,06%, nesta ordem.

Os conteúdos de Mg, Al e Si entre os dois Membros são bem contrastantes, sendo os do Pedro Leopoldo de 0,05 a 1,98%, 0,08 a 3,9% e 0,23 a 20,12%, respectivamente, e do Lagoa Santa de 0,08 a 0,23%, 0,01 a 0,27% e 0,02 a 1%, na devida ordem.

As amostras do Membro Lagoa Santa exibem valores muito baixos para as concentrações de Fe, K, Na, Mn e Ti (0,02 a 0,19%, 0,01 a 0,12%, 0,01 a 0,03%, 0,01 a 0,05% e 0,003 a 0,01%, respectivamente), enquanto os calcários do Membro Pedro Leopoldo indicam valores mais altos (0,05 a 2,89%, 0,03 a 1,68%, 0,02 a 0,65%, 0,01 a 0,1% e 0,003 a 0,23%, nesta ordem).

3.2 ELEMENTOS TRAÇOS

Os elementos traços, incluindo terras raras, são característicos de sedimentos

As concentrações de Ca e Mg foram utilizadas no cálculo do conteúdo de calcita, dolomita e resíduos sólidos (siliciclásticos) para classificação dos calcários da Formação Sete Lagoas segundo critérios e metodologia de Miche *et al* (2013). Esta categorização abrange rochas calcárias recristalizadas, nas quais a identificação de estruturas primárias e constituintes aloquímicos não é possível, como se verifica na área de estudo. A obliteração de estruturas ocorre principalmente em rochas carbonáticas mais antigas, de idade Neoproterozóica.

De acordo com essa classificação, as amostras do Membro Lagoa Santa são todas denominadas de calcários mais ou menos magnesianos, e as do Membro Pedro Leopoldo subdividem-se em 4 grupos (Figura 4): a) Calcários mais ou menos magnesianos; b) Calcários silicosos mais ou menos magnesianos; c) Calcários dolomíticos silicosos (predominantes); e d) Cherts calcários-dolomíticos.

terrígenos e apresentam maiores teores em rochas siliciclásticas quando comparada com

rochas de sedimentação marinha (Madhavaraju & González-Léon 2012, Piper & Bau 2013, Chen *et al.* 2014). Como previsto para sedimentos marinhos, as rochas do Membro Lagoa Santa mostram baixas concentrações de elementos traços e ETR, enquanto a contribuição terrígena na sedimentação dos calcários do Pedro Leopoldo está refletida nas altas concentrações destes elementos (Vieira *et al.* 2016).

Os teores de Th, U e Zr para as amostras analisadas variam de 0,4 a 6,7 ppm, 0,1 a 1,87 ppm e 2,2 a 79,4 ppm,

respectivamente, no Membro Pedro Leopoldo, e de 0,1 a 0,5 ppm, 0,05 a 1,11 ppm e 0,5 a 5,9 ppm no Membro Lagoa Santa. Já o S apresenta maior concentração nas rochas do Lagoa Santa (0,01 a 0,06 ppm) que aquelas do Membro Pedro Leopoldo, em que 13 amostras indicaram teor de S abaixo do limite de quantificação (<0,01). Em contrapartida foram observados valores relativamente altos de S em amostras da base do Pedro Leopoldo (Lu 16A – 0,05 ppm, Lu 054 – 0,14 ppm e Lu 055 – 0,07 ppm).

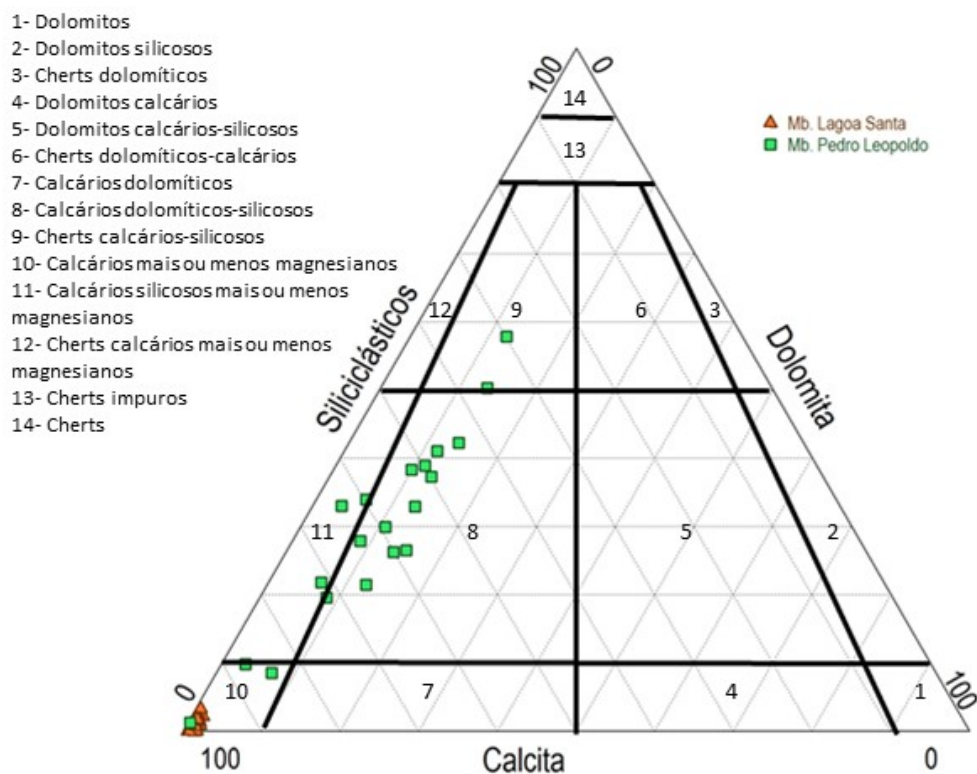


Figura 4

Diagrama ternário da composição de calcita, dolomita e siliciclásticos dos calcários da Formação Sete Lagoas na área do projeto obtido através do software DIAGRAMMES, disponível em Miche *et al.* (2013).

Tabela 1: Resultados litoquímicos das rochas da Formação Sete Lagoas aflorantes na área de estudo

	Membro Pedro Leopoldo									
	Lu 016 A	Lu 016 B	Lu 020	Lu 036 A	Lu 044	Lu 054	Lu 055	Lu 058	Lu 060	Lu 063
SiO₂%	0,50	17,50	26,50	36,20	14,80	7,30	6,60	16,20	16,80	24,70
Al₂O₃	0,19	5,22	4,45	8,11	3,18	1,31	1,14	2,70	3,14	4,95
Fe₂O₃	0,09	2,51	1,97	3,90	1,48	0,57	0,27	1,09	1,24	2,33
CaO	55,20	37,80	35,40	24,40	42,90	49,70	49,70	41,00	42,30	32,00
MgO	<0,1	3,04	1,40	3,20	1,83	0,67	1,76	3,33	1,79	3,39
TiO₂	<0,01	0,29	0,22	0,42	0,16	0,06	0,06	0,12	0,16	0,26
P₂O₅	0,05	0,14	0,06	0,10	0,08	0,08	0,02	0,07	0,06	0,08
Na₂O	0,29	0,05	0,05	0,37	0,05	0,05	0,16	0,21	0,34	0,43
K₂O	0,02	1,54	1,17	2,04	0,64	0,44	0,24	0,75	0,78	1,20
MnO	0,01	0,03	0,09	0,07	0,08	0,04	0,02	0,03	0,02	0,04
LOI	43,48	31,72	29,01	21,61	34,97	39,46	40,07	34,77	34,15	28,86
TOTAL	99,83	99,84	100,32	100,42	100,17	99,68	100,04	100,27	100,78	98,24
Ba ppm	670,00	830,00	244,00	380,00	114,00	87,00	81,00	61,00	69,00	142,00
Be	<0,1	1,10	1,00	1,70	0,70	0,40	0,30	0,90	0,80	1,60
Cd	<0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,09	0,03	0,04
Co	0,80	5,40	5,80	10,60	5,00	2,60	1,90	2,90	3,20	6,20
Cr	4,00	11,00	7,00	17,00	8,00	2,00	6,00	9,00	12,00	21,00
Cu	<0,5	5,30	9,60	32,70	6,10	1,10	4,10	7,50	7,20	13,80
Ga	0,20	6,30	5,20	9,60	3,70	1,60	1,30	3,40	3,90	6,60
Hf	0,11	1,72	1,34	2,42	0,93	0,37	0,53	0,76	0,99	1,60
Li	<1	56,00	31,00	58,00	23,00	11,00	12,00	13,00	17,00	22,00
Mo	5,37	0,18	0,12	0,25	0,11	0,13	0,19	0,16	0,13	0,16
Nb	0,30	4,80	4,00	10,50	2,70	1,10	1,40	1,60	2,70	4,80
Ni	0,25	11,00	8,90	19,10	7,70	2,50	<0,5	3,00	4,30	9,50
P	226,00	562,00	166,00	290,00	259,00	259,00	51,00	344,00	275,00	365,00
Pb	1,20	2,20	4,40	3,40	4,80	1,70	9,00	10,40	10,30	14,20
Rb	1,20	78,90	53,50	83,90	30,90	23,60	12,20	33,10	31,40	47,50
S	0,05	0,02	0,05	0,01	0,01	0,14	0,07	<0,01	<0,01	0,01
Sb	<0,05	0,29	0,66	0,38	0,10	0,16	0,19	0,25	0,15	0,16
Sc	<0,5	7,70	6,20	11,60	4,70	2,00	1,20	3,10	3,80	5,90
Sr	2788,00	266,50	230,40	217,80	275,70	414,50	415,30	382,80	364,40	219,40
Ta	0,05	0,28	0,26	1,16	0,19	0,07	0,34	0,16	0,46	0,75
Th	0,40	5,00	3,90	6,70	2,80	0,70	1,50	2,00	2,90	4,40
Tl	<0,01	0,46	0,22	0,41	0,15	0,19	0,09	0,28	0,16	0,22
U	1,87	0,81	0,67	1,21	0,54	0,21	0,10	0,40	0,40	0,70
V	3,00	29,00	24,00	46,00	20,00	7,00	8,00	16,00	19,00	32,00
W	<0,1	0,70	0,80	1,20	0,70	0,30	0,30	0,30	0,30	0,60
Zn	2,00	36,00	32,00	62,00	27,00	10,00	13,00	21,00	19,00	24,00
Zr	2,20	54,50	41,60	79,40	30,30	11,20	11,70	26,20	31,20	53,00
F	61,00	474,00	309,00	531,00	277,00	263,00	270,00	385,00	323,00	434,00
La	8,70	12,10	15,70	23,00	18,20	2,10	3,40	9,20	10,20	14,90
Ce	4,40	16,20	24,00	41,00	16,60	6,10	5,60	16,20	16,70	24,50
Pr	0,69	1,93	2,68	4,55	1,79	0,77	0,63	1,84	1,91	2,87
Nd	3,00	7,80	10,00	17,80	6,90	3,00	2,40	7,20	7,50	10,80
Sm	0,60	1,40	1,90	3,20	1,30	0,60	0,50	1,40	1,40	2,00
Eu	0,15	0,25	0,37	0,31	0,22	0,12	0,09	0,25	0,32	0,36
Gd	0,86	1,43	1,84	2,87	1,32	0,52	0,42	1,28	1,21	1,82
Tb	0,11	0,20	0,27	0,41	0,20	0,10	0,06	0,19	0,19	0,27
Dy	0,84	1,32	1,54	2,54	1,17	0,51	0,39	1,08	1,11	1,61
Y	6,56	6,82	8,37	13,31	6,23	3,11	2,13	6,49	6,53	9,23
Ho	0,17	0,27	0,30	0,53	0,23	0,11	0,08	0,21	0,21	0,33
Er	0,48	0,87	0,90	1,59	0,65	0,28	0,24	0,64	0,61	0,96
Tm	0,06	0,14	0,13	0,24	0,10	<0,05	<0,05	0,10	0,09	0,15
Yb	0,30	0,90	0,80	1,60	0,60	0,30	0,20	0,60	0,60	0,90
Lu	<0,05	0,13	0,12	0,22	0,09	<0,05	<0,05	0,08	0,08	0,13

Resultados analíticos dos óxidos por fluorescência de raios-X, menores e traços por ICP-MS (Laboratórios da SGS-Geosol)

Tabela 1: Resultados litoquímicos das rochas da Formação Sete Lagoas aflorantes na área de estudo (continuação)

	Membro Pedro Leopoldo									
	Lu 065	Lu 066	Lu 067	Lu 068	Lu 069	Lu 070	Lu 071	Lu 072	Lu 073	Lu 074
SiO2%	24,20	31,00	28,00	42,80	31,80	26,90	20,90	28,20	23,30	21,00
Al2O3	3,51	5,34	5,90	7,71	4,77	2,74	2,29	4,63	3,70	3,12
Fe2O3	1,60	2,42	2,29	3,14	2,20	1,31	1,08	2,21	1,84	1,53
CaO	34,40	30,20	31,50	20,60	29,00	36,80	38,40	32,20	36,70	37,50
MgO	3,23	2,69	2,76	3,12	3,43	0,83	1,95	2,17	2,49	3,46
TiO2	0,15	0,26	0,26	0,37	0,24	0,13	0,11	0,24	0,20	0,15
P2O5	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	0,04	0,04	0,06	0,08	0,06
Na2O	0,28	0,39	0,41	0,61	0,64	0,49	0,31	0,79	0,38	0,58
K2O	1,05	1,36	1,33	1,84	1,22	0,59	0,50	0,51	0,94	0,54
MnO	0,14	0,10	0,10	0,11	0,12	0,07	0,08	0,07	0,09	0,11
LOI	30,73	26,20	26,78	18,59	26,48	29,78	32,82	27,16	31,03	32,52
TOTAL	99,35	100,03	99,40	98,97	99,97	99,68	98,48	98,24	100,75	100,57
Ba ppm	176,00	191,00	206,00	251,00	150,00	63,00	89,00	66,00	157,00	117,00
Be	1,20	1,80	1,60	2,00	1,50	0,70	0,60	0,80	0,80	0,60
Cd	0,10	0,08	0,04	0,07	0,06	0,06	0,39	0,05	0,07	0,09
Co	4,80	6,40	6,70	8,70	5,90	3,30	3,20	5,70	4,10	4,20
Cr	14,00	22,00	20,00	32,00	19,00	12,00	2,00	8,00	7,00	4,00
Cu	13,20	9,30	13,30	33,70	9,20	6,30	3,30	14,70	11,50	14,30
Ga	4,20	6,80	7,30	10,10	5,70	3,20	2,80	5,30	4,00	3,40
Hf	0,95	1,65	1,73	2,28	1,37	0,72	0,60	1,31	1,03	0,81
Li	19,00	30,00	32,00	35,00	23,00	10,00	11,00	26,00	17,00	16,00
Mo	0,34	0,17	0,16	0,28	0,15	0,11	0,13	0,22	0,17	0,11
Nb	2,50	4,40	4,30	5,30	2,80	2,10	1,90	3,20	2,60	2,40
Ni	3,80	8,70	7,90	14,30	7,50	4,90	3,30	9,50	7,60	4,40
P	273,00	303,00	373,00	386,00	284,00	127,00	120,00	255,00	306,00	237,00
Pb	12,70	242,40	6,80	95,20	7,60	36,20	8,90	37,20	5,40	24,10
Rb	39,80	55,40	52,10	77,30	46,90	22,00	17,90	16,30	28,70	16,90
S	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sb	0,50	0,57	0,40	0,88	0,39	0,37	0,15	0,16	0,13	0,32
Sc	4,00	6,00	6,00	8,50	5,40	3,30	3,10	6,30	4,50	3,90
Sr	296,80	198,60	169,80	118,90	173,00	195,30	191,70	159,20	260,10	191,00
Ta	0,25	0,71	0,64	0,58	0,31	0,27	0,06	0,12	0,09	0,08
Th	2,70	4,50	5,10	6,30	3,70	2,00	1,80	4,00	3,00	2,60
Tl	0,23	0,24	0,21	0,32	0,20	0,10	0,09	0,08	0,17	0,09
U	0,60	0,70	0,60	1,20	0,60	0,30	0,40	0,90	0,50	0,60
V	26,00	34,00	29,00	49,00	30,00	17,00	12,00	28,00	23,00	18,00
W	0,40	0,80	0,70	1,10	0,60	0,40	0,40	0,50	0,40	0,60
Zn	21,00	44,00	34,00	45,00	25,00	10,00	17,00	27,00	22,00	23,00
Zr	33,10	52,70	53,10	72,50	44,80	27,00	19,80	44,40	35,10	28,40
F	486,00	415,00	476,00	578,00	400,00	241,00	247,00	377,00	383,00	286,00
La	12,70	14,10	14,30	21,40	15,90	11,90	10,70	15,90	10,70	9,50
Ce	22,60	24,60	25,30	38,20	29,40	17,30	14,90	23,40	17,70	14,90
Pr	2,52	2,79	2,86	4,29	3,26	2,01	1,67	2,65	2,01	1,66
Nd	9,60	11,00	11,00	16,60	12,60	7,70	6,40	10,10	7,90	6,30
Sm	1,90	2,10	2,10	3,20	2,40	1,60	1,20	1,80	1,50	1,30
Eu	0,24	0,37	0,34	0,52	0,49	0,34	0,29	0,38	0,31	0,21
Gd	1,67	1,76	1,93	2,73	2,34	1,64	1,22	1,74	1,36	1,14
Tb	0,26	0,29	0,30	0,42	0,33	0,27	0,19	0,27	0,22	0,17
Dy	1,56	1,67	1,84	2,58	2,00	1,65	1,07	1,53	1,27	1,04
Y	8,98	9,60	10,26	14,14	11,12	9,10	6,28	9,14	7,47	5,98
Ho	0,30	0,35	0,36	0,51	0,39	0,32	0,21	0,32	0,25	0,20
Er	0,85	0,96	1,06	1,49	1,08	0,82	0,57	0,90	0,75	0,60
Tm	0,12	0,14	0,15	0,22	0,17	0,13	0,07	0,14	0,11	0,09
Yb	0,80	1,00	1,00	1,40	1,00	0,70	0,50	0,90	0,70	0,50
Lu	0,11	0,15	0,14	0,22	0,15	0,10	0,07	0,12	0,10	0,08

Resultados analíticos dos óxidos por fluorescência de raios-X, menores e traços por ICP-MS (Laboratórios da SGS-Geosol)

Tabela 1: Resultados litoquímicos das rochas da Formação Sete Lagoas aflorantes na área de estudo (continuação)

	Mb Lagoa Santa									
	Lu 002 A	Lu 002 B	Lu 009 B	Lu 014 A	Lu 014 B	Lu 015 B	Lu 019	Lu 038	Lu 043	Lu 050
SiO2%	0,60	0,73	0,15	0,38	0,45	1,89	0,32	1,13	0,23	2,14
Al2O3	<0,1	0,22	<0,1	<0,1	<0,1	0,22	0,05	0,34	<0,1	0,26
Fe2O3	0,16	0,23	0,06	0,10	0,05	0,13	0,09	0,15	0,09	0,15
CaO	56,20	55,30	56,80	55,40	56,00	55,00	55,90	55,50	55,90	54,40
MgO	0,19	0,24	0,11	0,22	0,22	0,37	0,30	0,38	0,17	0,29
TiO2	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01
P2O5	0,14	0,12	0,11	0,12	0,06	0,11	0,12	0,21	0,06	0,20
Na2O	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,46
K2O	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,10	<0,01	0,08
MnO	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,07	0,08
LOI	43,39	43,64	43,70	43,44	43,65	42,74	43,47	43,06	43,56	42,58
TOTAL	100,72	100,54	100,96	99,68	100,46	100,51	100,28	100,92	100,08	100,64
Ba ppm	120,00	55,00	34,00	55,00	45,00	46,00	120,00	50,00	30,00	196,00
Be	<0,1	<0,1	<0,1	0,10	<0,1	<0,1	<0,1	0,20	0,10	0,10
Cd	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	0,25	0,05
Co	0,80	1,10	0,70	0,80	0,60	0,90	0,80	0,90	0,70	1,00
Cr	3,00	7,00	<1	7,00	4,00	5,00	<1	<1	<1	1,00
Cu	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,30
Ga	0,10	0,30	0,10	0,20	0,20	0,30	0,20	0,50	0,20	0,40
Hf	0,04	0,10	0,03	0,04	0,02	0,08	0,03	0,09	<0,02	0,10
Li	<1	13,00	4,00	3,00	2,00	5,00	8,00	7,00	<1	2,00
Mo	0,13	17,07	0,20	0,27	0,10	0,15	0,07	0,10	0,07	0,10
Nb	0,20	0,80	0,10	0,20	0,10	0,30	0,30	0,40	0,10	0,50
Ni	0,70	1,10	0,25	0,25	0,25	0,80	0,90	0,80	0,25	0,80
P	511,00	449,00	349,00	369,00	160,00	360,00	531,00	790,00	195,00	790,00
Pb	2,10	0,80	0,90	1,30	<0,5	1,40	0,90	1,30	19,90	2,20
Rb	51,80	2,40	0,80	15,70	3,30	2,30	1,50	6,70	1,00	5,20
S	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,06	0,03	0,03	0,02	0,03
Sb	0,05	0,21	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Sc	<0,5	0,70	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,60	<0,5	0,80
Sr	1147,90	1198,30	767,80	1601,90	2051,90	1774,10	2040,60	1958,80	762,00	1250,70
Ta	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05
Th	<0,1	<0,1	<0,1	0,50	0,30	0,40	0,40	0,50	0,10	0,20
Tl	0,03	0,06	<0,01	0,03	<0,01	0,04	0,05	0,19	0,03	0,17
U	<0,05	1,01	0,99	0,84	0,55	1,11	1,02	1,03	0,70	0,75
V	2,00	5,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00	4,00	2,00	3,00
W	0,10	0,20	<0,1	<0,1	<0,1	0,10	<0,1	0,10	<0,1	0,10
Zn	10,00	16,00	3,00	3,00	<1	37,00	4,00	4,00	12,00	8,00
Zr	0,70	3,10	<0,5	0,90	<0,5	2,10	1,00	3,10	<0,5	2,80
F	444,00	690,00	890,00	658,00	439,00	551,00	427,00	385,00	74,00	271,00
La	0,70	5,50	3,30	6,10	5,00	7,30	6,60	3,60	5,40	4,80
Ce	1,00	3,60	1,40	2,30	1,50	3,40	3,00	3,70	2,40	3,00
Pr	0,12	0,40	0,11	0,21	0,12	0,33	0,27	0,41	0,22	0,31
Nd	0,50	1,40	0,40	1,10	0,40	1,30	1,10	1,70	0,90	1,20
Sm	0,10	0,20	<0,1	0,20	<0,1	0,30	0,20	0,40	0,20	0,20
Eu	0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	0,07	<0,05	0,06
Gd	0,18	0,22	0,08	0,20	0,13	0,33	0,24	0,36	0,22	0,25
Tb	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	<0,05
Dy	0,17	0,20	0,14	0,19	0,10	0,30	0,25	0,33	0,20	0,21
Y	1,97	1,72	1,77	1,81	1,16	2,25	2,07	2,70	1,89	1,73
Ho	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	0,06	0,07	<0,05	<0,05
Er	0,05	0,12	0,11	0,13	0,09	0,18	0,16	0,22	0,14	0,14
Tm	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Yb	<0,1	<0,1	<0,1	0,10	<0,1	0,10	0,10	0,20	<0,1	0,10
Lu	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

Resultados analíticos dos óxidos por fluorescência de raios-X, menores e traços por ICP-MS (Laboratórios da SGS-Geosol)

Tabela 1: Resultados litoquímicos das rochas da Formação Sete Lagoas aflorantes na área de estudo (continuação)

	Mb Lagoa Santa								
	Lu 018	Lu 030	Lu 046	Lu 047	Lu 049	Lu 051	Lu 052	Lu 057	Lu 064
SiO2%	1,41	0,43	0,27	0,63	0,66	0,54	<0,1	1,49	0,76
Al2O3	0,13	<0,1	<0,1	<0,1	0,11	<0,1	<0,1	0,33	0,22
Fe2O3	0,09	0,05	0,04	0,09	0,09	0,06	0,05	0,23	0,12
CaO	54,80	55,60	55,50	54,70	54,30	55,50	55,60	55,10	55,10
MgO	0,15	0,19	0,25	<0,1	<0,1	0,30	0,19	0,31	0,20
TiO2	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01
P2O5	0,19	0,17	0,15	0,07	0,15	0,13	0,08	0,11	0,15
Na2O	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
K2O	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,09	0,08
MnO	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,03	<0,01	0,01
LOI	42,84	43,38	43,31	43,40	43,21	43,20	43,71	42,85	42,98
TOTAL	99,65	99,87	99,55	98,91	98,55	99,77	99,66	100,53	99,62
Ba ppm	39,00	38,00	52,00	29,00	33,00	61,00	41,00	41,00	79,00
Be	<0,1	<0,1	0,10	<0,1	0,10	0,10	<0,1	0,10	0,10
Cd	0,03	0,03	0,04	<0,02	0,42	0,03	0,10	0,04	0,31
Co	0,90	0,90	0,80	0,90	1,00	0,90	0,60	1,00	0,90
Cr	<1	<1	1,00	<1	2,00	2,00	<1	<1	3,00
Cu	2,70	2,70	3,00	3,10	2,90	2,80	<0,5	3,50	2,60
Ga	0,30	0,30	0,20	0,20	0,30	0,20	0,20	0,50	0,40
Hf	0,04	0,03	<0,02	0,06	0,03	0,03	0,04	0,10	0,14
Li	4,00	4,00	4,00	3,00	3,00	4,00	2,00	5,00	4,00
Mo	0,15	0,11	0,12	0,11	0,11	0,09	0,11	0,13	0,14
Nb	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,40	0,60
Ni	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
P	838,00	798,00	679,00	427,00	748,00	551,00	353,00	424,00	674,00
Pb	19,40	3,10	4,00	21,30	3,60	11,40	2,60	9,60	17,10
Rb	1,90	1,50	1,10	1,00	1,70	1,80	0,80	4,20	2,80
S	0,04	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,05
Sb	0,07	<0,05	<0,05	0,07	0,07	0,11	<0,05	0,12	0,09
Sc	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Sr	3681,20	1244,20	1454,80	1594,40	1651,90	2310,90	1548,10	1965,00	2697,60
Ta	<0,05	<0,05	<0,05	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,18
Th	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,30	0,40
Tl	0,09	0,02	0,03	<0,01	0,03	0,07	0,02	0,75	0,06
U	1,10	0,90	0,90	0,50	0,90	0,90	0,90	0,70	1,10
V	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00	3,00	<1	5,00	4,00
W	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,10	0,10	<0,1	<0,1	0,20
Zn	3,00	2,00	6,00	<1	22,00	<1	5,00	8,00	5,00
Zr	2,60	2,70	2,30	3,80	2,90	3,30	<0,5	4,60	5,90
F	908,00	786,00	2704,00	632,00	921,00	1384,00	847,00	653,00	988,00
La	3,00	4,40	2,20	3,70	2,60	4,90	3,80	3,30	2,20
Ce	2,50	3,20	1,70	2,10	2,50	3,30	2,00	3,50	2,60
Pr	0,28	0,33	0,19	0,22	0,27	0,37	0,19	0,39	0,32
Nd	1,20	1,40	0,80	0,90	1,30	1,60	0,70	1,60	1,40
Sm	0,30	0,30	0,20	0,20	0,30	0,30	0,10	0,40	0,30
Eu	0,06	0,06	<0,05	<0,05	0,06	0,06	<0,05	0,07	<0,05
Gd	0,33	0,33	0,22	0,21	0,34	0,45	0,18	0,37	0,28
Tb	0,05	0,06	<0,05	<0,05	0,06	0,07	<0,05	<0,05	<0,05
Dy	0,33	0,36	0,21	0,20	0,31	0,34	0,18	0,31	0,28
Y	3,01	3,10	2,08	1,64	3,00	3,16	1,83	2,32	2,32
Ho	0,08	0,08	<0,05	<0,05	0,08	0,07	<0,05	0,06	0,06
Er	0,22	0,22	0,15	0,11	0,22	0,21	0,13	0,20	0,17
Tm	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Yb	0,20	0,10	<0,1	<0,1	0,10	0,10	<0,1	0,10	0,10
Lu	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

Resultados analíticos dos óxidos por fluorescência de raios-X, menores e traços por ICP-MS (Laboratórios da SGS-Geosol)

A substituição de Ca por Ba e Sr na estrutura de carbonatos é bem comum, principalmente do Sr pela alta concentração em águas marinhas. Entretanto devido a intercalação pelítica existente no Membro Pedro Leopoldo, o conteúdo de Ba tende a ser maior nesta unidade do que no Lagoa Santa (61 a 830 ppm e 29 a 196 ppm, nesta ordem). Em relação a concentração de Sr, o Membro superior apresenta os maiores valores (762 a 3681 ppm), enquanto a concentração desde elemento no Pedro Leopoldo varia de 118,9 a 2788 ppm.

Os teores de ETR+Y obtidos na análise química foram normalizados ao PAAS (*Post Archean Australian Shale*)

segundo valores de Piper & Bau (2013). As anomalias comumente encontradas no padrão ETR típico de águas oceânicas, quando normalizadas ao PAAS, são apresentadas como $La/La^* = La/(3Pr - 2Nd)$, $Ce/Ce^* = Ce/(2Pr - Nd)$ e $Pr/Pr^* = Pr/(0,5Ce + 0,5Nd)$ (Madhavaraju & González-León 2012).

A concentração total de Elementos Terras Raras é significativamente mais elevada nas amostras do Membro Pedro Leopoldo do que nas do Membro Lagoa Santa (16,19 a 113,17 ppm e 4,99 a 15,99 ppm, respectivamente), conforme representada na Figura 5.

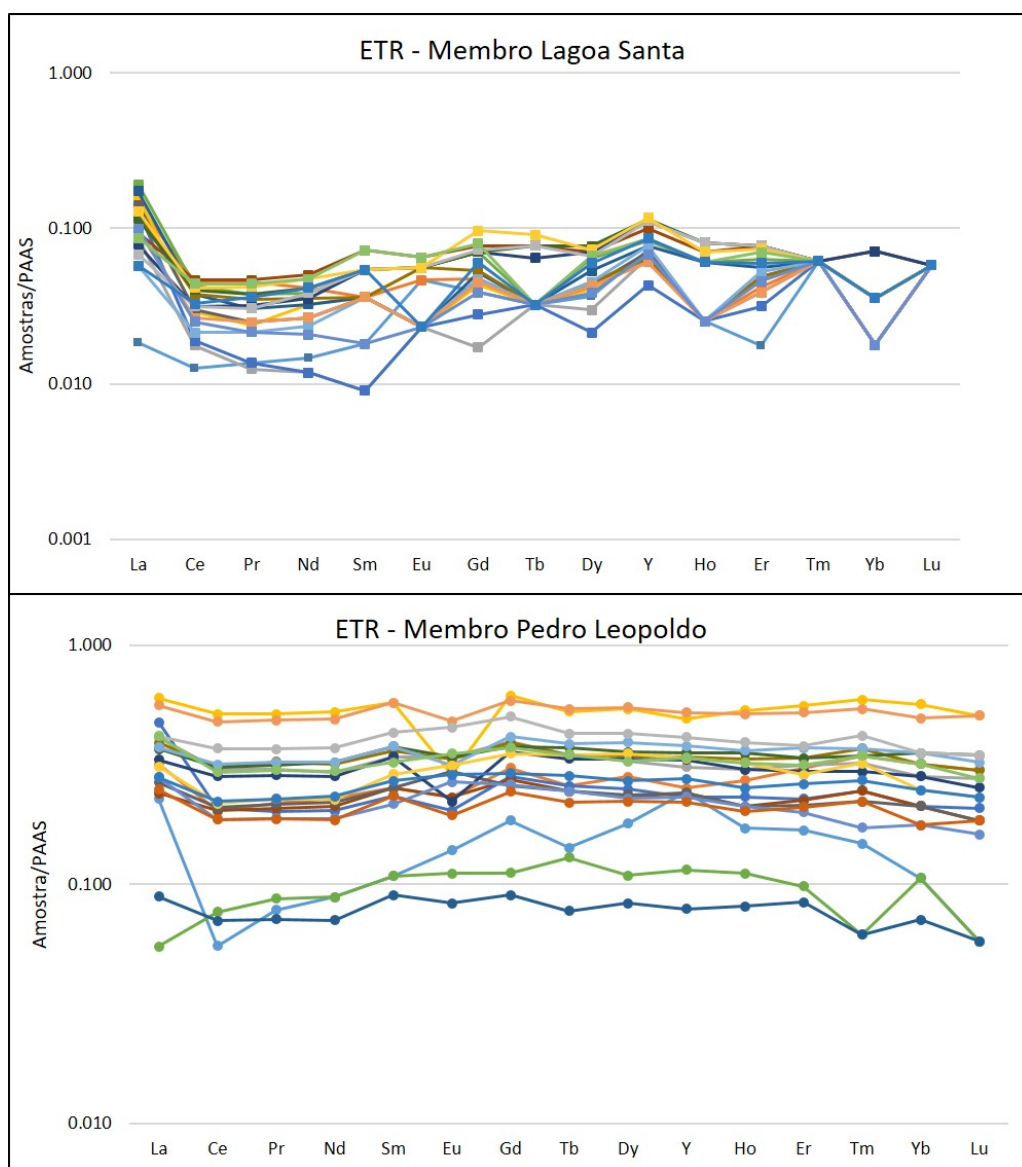


Figura 5
Padrões de ETR+Y para amostras dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa normalizados com PAAS (*Post Archean Australian Shale*, valores de Nance & Taylor 1976)

O padrão da curva de ETR normalizado ao PAAS para as águas marinhas é caracterizado por leve empobrecimento de terras raras leves em relação aos pesados, leve anomalia positiva de La, anomalia negativa de Ce e anomalia positiva de Y (Madhavaraju & González-Léon 2012, Chen *et al.* 2014). As rochas do Membro Pedro Leopoldo apresentam leve empobrecimento de ETR leves ($Nd/Yb_n = 0,721$ a $1,065$), evidenciado também pelo padrão praticamente reto de suas curvas no diagrama, anomalia levemente negativa a positiva de La ($La/La^* = 0,65$ a $3,97$), anomalia levemente positiva a negativa de Ce ($Ce/Ce^* = 0,82$ a $1,03$) e anomalia

levemente negativa a positiva de Y ($Y^* = 0,911$ a $1,384$). Além disso, os calcários deste Membro exibem anomalia negativa a levemente positiva de Eu ($Eu/Eu^* = 0,512$ a $1,189$) e razão $Y/Ho = 25,1$ a $38,6$. Nas rochas do Membro Lagoa Santa identifica-se ampla variação do fracionamento de ETR pesados e leves ($Nd/Yb_n = 0,499$ a $1,497$), anomalia levemente negativa a positiva de Ce ($Ce/Ce^* = 0,917$ a $1,911$) e anomalia positiva de Y ($Y^* = 1,337$ a $2,378$). A anomalia de Eu dos calcários Lagoa Santa é bastante variada ($Eu/Eu^* = 0,494$ a $2,037$) e as rochas apresentam, ainda, altas razões Y/Ho ($34,5$ a $83,2$).

4. DISCUSSÃO

4.1 ELEMENTOS MAIORES

A composição essencialmente calcítica para rochas do Membro Lagoa Santa foi comprovada a partir das altas concentrações de CaO obtidas pelas análises geoquímicas. Os calcários do Membro Pedro Leopoldo, por sua vez, apresentam composição diversificada. Para estas rochas, as concentrações de elementos típicos de sedimentos terrígenos, como Al e Si, são altas em relação aos valores destes na unidade superior. Estes teores, quando comparados com as concentrações de Ca destas mesmas rochas (Figura 6), sugerem períodos de sedimentação clástica intercalada com carbonatos em ambiente de baixa energia. As concentrações de Ca e Al, bem como de Ca e Si, são inversamente proporcionais, indicando a variação composicional durante a deposição. Já os calcários Lagoa Santa

destacam-se pelas altas e constantes concentrações de P que, juntamente com sua coloração escura característica, sugerem forte presença de matéria orgânica.

Além do aporte detrítico identificado nos calcários Pedro Leopoldo, sua composição dolomítica é também variada, atingindo teores de aproximadamente 15%, diferentemente das rochas carbonáticas do Membro Lagoa Santa, que apresentam valores de dolomita próximos a 0%. A abundância de dolomita em seqüências carbonáticas é registrada principalmente em rochas neoproterozóicas e sua origem tem sido atribuída a bactérias redutoras de sulfato em ambientes anóxicos (Fairbridge 1957, McKenzie 1991, McKenzie & Vasconcelos 2009, Boggiani 2010).

4.2 ELEMENTOS TRAÇOS

Rochas carbonáticas depositadas em ambiente marinho usualmente preservam assinatura geoquímica das águas oceânicas (Deer 2011, Chen *et al.* 2014, Franchi *et al.* 2016). Segundo Chen *et al.* (2014), a entrada de sedimentos siliciclásticos no sistema de deposição, mesmo que em concentrações muito pequenas, colabora para a alteração do padrão geoquímico típico de águas marinhas.

A contribuição terrígena é apenas um dos fatores que podem ser responsáveis por estas mudanças, juntamente com processos de remoção, condições paleo-redox, hidrotermalismo e diagênese (Deer 2011, Madhavaraju & González-Léon 2012, Ling *et al.* 2013, Chen *et al.* 2014, Franchi *et al.* 2016, Madhavaraju *et al.* 2016).

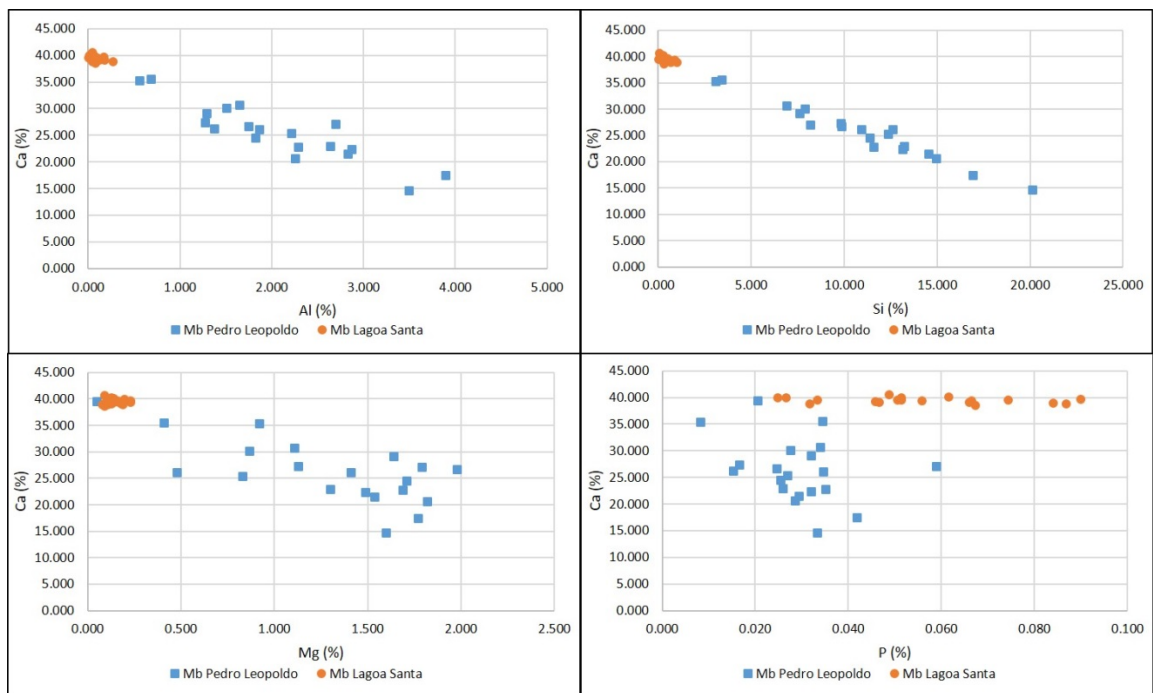


Figura 6
Gráficos da concentração de Ca (%) versus concentrações de Al (%), Si (%), Mg (%) e P (%) para rochas dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

Elementos traços característicos de sedimentos terrestres e suas relações com ETR são muito utilizados para interpretação da contaminação terrígena na sedimentação carbonática (Madhavaraju & González-León

2012, Chen *et al.* 2014). A boa correlação entre ETR, Zr e Th, como observada nos gráficos da Figura 7 para as rochas do Pedro Leopoldo, sugerem forte contribuição siliciclástica na formação destas rochas.

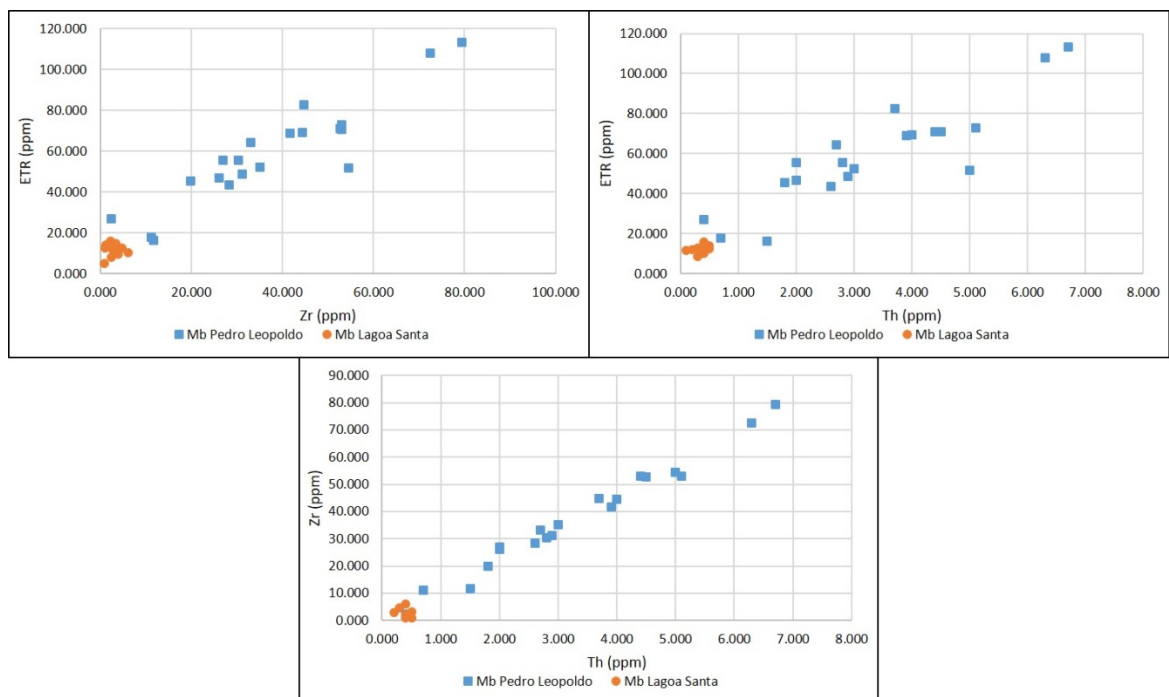


Figura 7
Gráficos de ETR (ppm) e Zr (ppm), ETR (ppm) e Th (ppm) e Zr (ppm) e Th (ppm) para amostras da Formação Sete Lagoas.

Devido a seus dois estados de oxidação, tanto o Ce quanto o Eu são bastante utilizados como indicadores paleo-redox do ambiente de sedimentação (Deer 2011, Ling *et al.* 2013, Franchi *et al.* 2016). Em ambientes bem oxigenados estes elementos assumem suas formas oxidadas, Ce^{4+} e Eu^{3+} , o que reduz a solubilidade Ce e aumenta a solubilidade de Eu quando comparada com a de seus estados reduzidos (Ce^{3+} e Eu^{2+}). Nessas condições óxicas, o padrão geoquímico ETR+Y apresentaria anomalia negativa de Ce, devido a fácil precipitação e associação a partículas de Fe e Mn do elemento na forma tetravalente, e anomalia positiva de Eu, pela maior solubilidade do íon trivalente. Contudo, as fracas correlações entre Ce/Ce* e Mn nos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa ($R^2=0,44$ e $0,10$, nesta ordem) e entre Ce/Ce* e Fe ($R^2=0,53$ e $0,39$, na mesma ordem) sugerem que os processos de remoção e as condições paleo-redox possuem influência limitada nas anomalias de Ce dos calcários das duas unidades estudadas (Madhavaraju & González-León 2012, Ling *et al.* 2013).

As fracas correlações entre Ce e Al_2O_3 , Ce e Zr, Ce/Ce* e Al_2O_3 , Zr e Th para as rochas do Mb Lagoa Santa (Ce e $Al_2O_3 = 0,40$; Ce e Zr = $0,42$; Ce/Ce* e $Al_2O_3 = 0,43$; Ce/Ce* e Zr = $0,11$; Ce/Ce* e Th = $0,12$) indicam que a divergência entre o padrão ETR destes calcários e das águas oceânicas em relação a anomalia de Ce não é devida à contaminação detrítica. Já as correlações fortemente positivas entre Ce e Al_2O_3 ($R^2=0,94$) e Ce e Zr ($R^2=0,93$) e boas relações entre Ce/Ce* e Al_2O_3 , Zr e Th ($R^2=0,54$; $0,52$; $0,52$; respectivamente) nas rochas do Pedro Leopoldo corroboram para influência detrítica na anomalia de Ce (Chen *et al.* 2014).

As anomalias de Ce e La foram calculadas também pela relação entre Ce/Ce* e Pr/Pr*, segundo método de Bau & Dulski (1996), representada na Figura 8A. A grande maioria das amostras do Membro Lagoa Santa apresentam anomalias negativas de La e positivas de Ce, indicando que as rochas analisadas estão alteradas. Já para o Membro Pedro Leopoldo a anomalia positiva de La e a negativa de Ce, mesmo que pequenas, coincide com o padrão típico das águas marinhas.

Outros fatores que podem modificar o padrão geoquímico típico de águas oceânicas nos carbonatos são a diagênese e hidrotermalismo. Para que as anomalias positivas de Ce e Eu nos calcários puros do Membro Lagoa Santa tenham influência diagenética é necessário que as correlações entre Ce/Ce*, Eu/Eu* e ETR sejam positivas (Chen *et al.* 2014). As relações, entretanto, são fracas, negativas (Figuras 8B, 8C e 8D) e, portanto, os efeitos da diagênese são limitados para estas amostras. É interpretado para as rochas do Membro superior, portanto, que as anomalias positivas de Ce e Eu foram influenciadas por fluidos hidrotermais, o que é reforçado pela abundância de veios de calcita nessa unidade e sulfetos, principalmente pirita, disseminados.

A anomalia positiva de Y e as altas razões Y/Ho características da assinatura geoquímica da água marinha se deve às diferentes taxas de complexação de Y e Ho com óxidos, em que o Ho é retirado das águas mais rápido que o Y (Deer 2011, Chen *et al.* 2014). Em águas mais profundas, em que o ambiente se torna mais anóxico, a anomalia positiva de Y diminui. Como as rochas do Membro Lagoa Santa apresentam valores mais elevados de Y* que as amostras do Pedro Leopoldo, pode-se interpretar que sua deposição ocorre em águas mais rasas e ambientes mais proximais. Essa interpretação é corroborada pela descrição petrográfica dos calcários do Lagoa Santa, caracterizados como calcarenitos puros, grossos e de coloração escura. Assim como no modelo de sedimentação de Vieira *et al.* (2007), essas rochas indicam deposição em rampa interna, após uma regressão marinha, em ambiente de alta energia. Nas águas oceânicas a razão Y/Ho varia entre 44 e 74, mas em materiais terrígenos os valores são mais baixos, em torno de 28 (Chen *et al.* 2014). A razão Y/Ho das rochas do Mb Pedro Leopoldo é baixa (25,1 a 38,6), concordando com a de sedimentos terrestres, enquanto os valores para a mesma razão no Mb Lagoa Santa condizem com aqueles de águas marinhas (34,5 a 83,2).

As condições oxidantes e redutoras do ambiente de deposição dos calcários da Formação Sete Lagoas podem ser indicadas também pela concentração de S presente nas

amostras. A presença de sulfetos disseminados em rochas do Membro Lagoa Santa e da base do Pedro Leopoldo, aliados aos valores mais elevados de S nestas (0,01 a 0,14 ppm),

indicam uma característica mais anóxica do ambiente, enquanto para as demais amostras do Pedro Leopoldo a concentração de S está abaixo do limite de quantificação (<0,01 ppm).

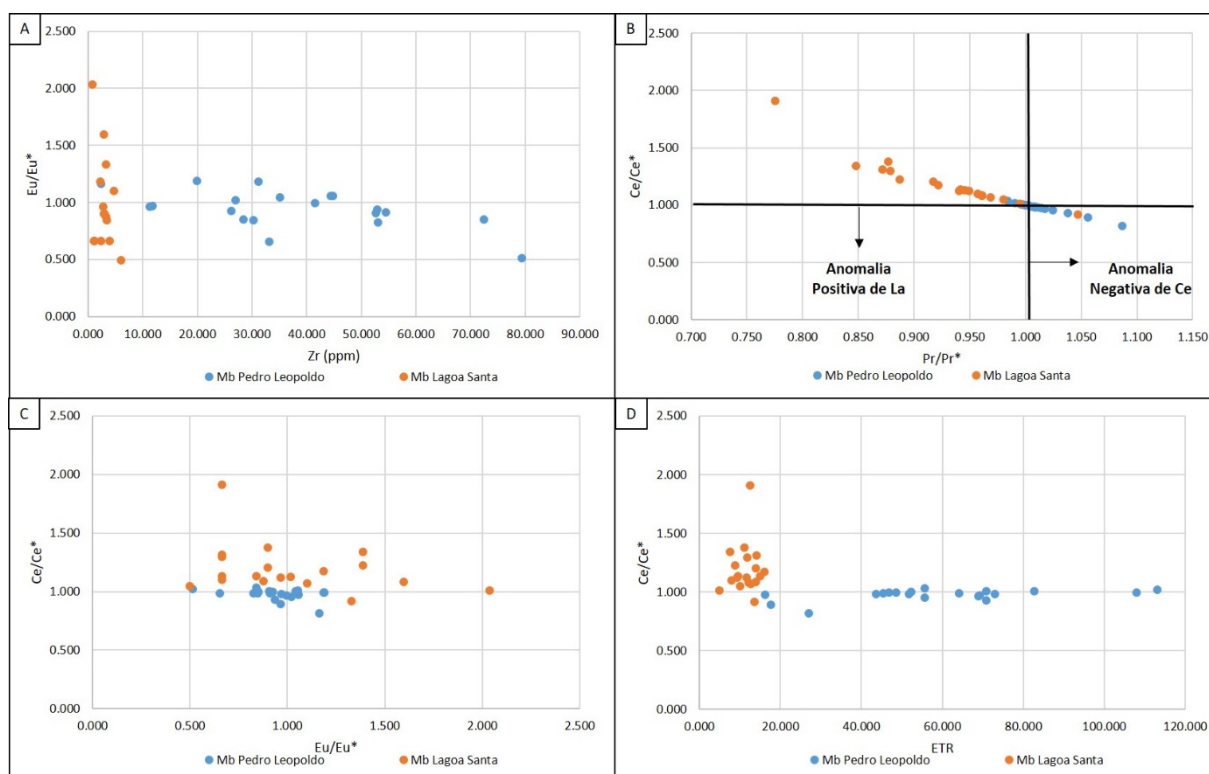


Figura 8

A) Gráfico com determinação de anomalias de La e Ce segundo método de Bau & Dulski (1996) para rochas dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa; B) Correlação entre Ce/Ce* e ETR para as duas unidades; C) Correlação da anomalia de Eu com Zr (ppm); D) Correlação entre anomalias de Ce e Eu.

5. CONCLUSÕES

As rochas carbonáticas neoproterozóicas da base do Grupo Bambuí na região da APA Carste de Lagoa Santa, pertencentes a Formação Sete Lagoas, encontram-se completamente metamorizadas, com grãos de calcita estirados e estruturas primárias obliteradas. A análise geoquímica aliada a descrição petrográfica se mostra uma importante ferramenta para obtenção de dados sobre condições ambientais sin e pós-deposição.

A presença de fantasmas de cristais de aragonita na base do Membro Pedro Leopoldo indica uma sedimentação em águas profundas, calmas e supersaturadas em CaCO_3 . As laminações siliciclásticas, a relação inversamente proporcional entre o conteúdo de Ca e o dos elementos Al e Si, e as boas correlações entre elementos traços típicos de sedimentos terrígenos, como ETR, Th e Zr,

evidenciadas nos calcários da unidade em questão sugerem a gradação da fácies de leques de aragonita para uma intercalação pelítica e carbonática, ainda em águas calmas. As porções carbonáticas das rochas deste Membro são cristalinas finas, coincidindo com o modelo de estudos anteriores de deposição em ambiente de baixa energia. A assinatura geoquímica das águas marinhas está levemente alterada nestes carbonatos, principalmente devido à contaminação clástica durante sedimentação, como demonstrados pelas relações $\text{Ce} \times \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ce} \times \text{Zr}$, $\text{Ce}/\text{Ce}^* \times \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ce}/\text{Ce}^* \times \text{Zr}$, $\text{Ce}/\text{Ce}^* \times \text{Th}$ e pela baixa razão Y/Ho. A anomalia de Y nessas rochas também está de acordo com o modelo, que indica deposição em plataforma externa, em águas mais profundas e anóxicas.

A granulação grossa dos calcários do Membro Lagoa Santa juntamente com sua

composição puramente calcítica indicam ambiente de plataforma rasa, com alta energia e restrito. A presença de matéria orgânica pela coloração das amostras e teores de P e S relativamente altos indica sua formação em ambiente parcialmente anóxico, embora anomalias fortemente positivas de Y confirmam o caráter predominantemente óxico e proximal da deposição. A análise do padrão de ETR+Y dessas rochas constatou alteração das mesmas, provavelmente por fluidos hidrotermais, uma vez que as fracas correlações de Ce e Ce/Ce* com Al₂O₃, Zr, Th, Mn e Fe descartam as hipóteses de influência de contaminação terrígena e condições paleo-redox, e as baixas relações entre Ce/Ce* x ETR, Ce/Ce* x Eu/Eu* eliminam a

possibilidade do controle da diagênese no padrão geoquímico.

A partir dessa análise geoquímica dos dois Membros da Formação Sete Lagoas é possível traçar um paralelo com os megaciclos descritos por Vieira *et al.* (2007) para a sequência carbonática em estudo. O primeiro megaciclo em rampa externa a média, com valores de isótopos de C negativos possivelmente corresponde ao Membro Pedro Leopoldo, enquanto o segundo megaciclo conferiria ao Lagoa Santa. A peculiaridade da transição dos valores negativos para positivos de isótopos de C coincidir com a superfície de inundação máxima reforça a comparação dos valores com os Membros analisados e pode corresponder, também, ao contato entre as unidades.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Instituto de Geociências (IGC) da UFMG, a bolsa de pesquisa da pós-graduação da CAPES e ao Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades

Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais, parceria CECAV/FUNDEP/ UFMG/CDTN, e com apoio dos órgãos CPRM – Serviço Geológico do Brasil e IGAM.

7. REFERÊNCIAS

- 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: V. Mantesso-Net; A. Bartorelli; C.D.R. Carneiro; B.B. Brito Neves (orgs.) *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, p.: 17–35.
- Alkmim F.F. & Martins-Neto M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.). *A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais*. SBG: Belo Horizonte, p.: 9-30.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. Geoc.*, 7:349-364.
- Bau M. & Dulski P. 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79:37-55.
- Boggiani P.C. 2010. Sedimentação Autigênica Neoproterozóica e Mineralizações Associadas - um registro não uniformitarista. Tese Livre Docência em Geociências - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 136p.
- Campos J. E. & Dardenne M.A. 1997. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: Uma Revisão. *Brasilian Journal of Geology*, 27:269–282.
- 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*, 200:38–58.
- Chen S., Gui H., Sun L. 2014. Geochemical characteristics of REE in the Late Neo-proterozoic limestone from northern Anhui Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 33:187–193.
- Ribeiro J.H., Tulle M.P., Filho A.D., Padilha A.V., Córdoba V.C., 2003. Projeto Vida: Mapeamento Geológico - Região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia - Minas Gerais – Relatório Final. Belo Horizonte, Convênio Secretária de Minas e Energia / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, 54 p.
- Tuller M.P., Ribeiro J.H., Signorelli N., Féboli W.L., Pinho J.M.M. 2010. Projeto Sete Lagoas - Abaeté. Belo Horizonte, Convênio Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, 160 p.
- Dardenne M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Cong. Bras. de Geol., 30, Anais, p. 597-610.
- Deer L. 2011. Limestone and speleothem trace element

- geochemistry as tools for palaeoclimatic reconstruction, Mount Etna region, central-coastal Queensland. Tese (Doctor of Philosophy) - Discipline of Biogeosciences, Queensland University of Technology, 334 p.
- Fairbridge R.W. 1957. The Dolomite Question. In: R.J. Le Blanc & J.G. Breeding, *Regional Aspects of Carbonate Deposition*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, p.: 125 - 178.
- Franchi F., Turetta C., Cavalazzi B., Corami F., Barbieri R. 2016. Trace elements and REE geochemistry of Middle Devonian carbonate mounds (Maider Basin, Eastern Anti-Atlas, Morocco): Implications for early diagenetic processes. *Sedimentary Geology*, **343**:56–71.
- Iglesias M. & Uhlein A. 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Rev. Bras. de Geoc.*, **39**:256–266.
- 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 Research*, **225**:110–127.
- Madhavaraju J. & González-León C. 2012. Depositional conditions and source of rare earth elements in carbonate strata of the Aptian-Albian Mural Formation, Pitaycachi section, northeastern Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **29**:478–491.
- McKenzie J.A. 1991. The dolomite problem: an outstanding controversy. In: D.W. Müller, J.A. McKenzie, H. Weissert (eds.) *Evolution of Geological Theories in Sedimentology, Earth History and Tectonics*. London: Academic Press, p.: 37–54.
- McKenzie J.A. & Vasconcelos C. 2009. Dolomite Mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: historical developments and new perspectives. *Sedimentology*, **56**:205–219.
- Miche H., Simler R., Affaton P., Mickala O., Boudzoumou F., Mbina M. 2013. New Computerized Method for the Geochemical Classification of Precambrian Carbonate Rocks: Case of a Set of African Cap Carbonates. *International Journal of Geosciences*, **4**:37–49.
- Nance W.B. & Taylor S.R. 1976. Rare earth element patterns and crustal evolution—I. Australian post-Archean sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **40**:1539-1551.
- Piper D.Z. & Bau M. 2013. Normalized Rare Earth Elements in Water, Sediments, and Wine: Identifying Sources and Environmental Redox Conditions. *American Journal of Analytical Chemistry*, **4**:69–83.
- Schöll W.U. 1976. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: SBG: Cong. Bras. de Geol., **29**, Anais, 207 - 231.
- Uhlein G.J. 2014. Estratigrafia e Proveniência das Formações Carrancas e Lagoa Formosa e a Evolução do Grupo Bambuí (~ 635-570 Ma) em Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 147 p
- Uhlein G.J., de Carvalho J.F.M.G., Uhlein A., Caxito F.A., Halverson G.P., Sial A.N. 2012. Estratigrafia e Sedimentologia da Formação Carrancas, Grupo Bambuí, nas regiões de Belo Horizonte e Pitangui, MG. *Geonomos*, **20**:79-97
- Vieira L.C., Trindade R.I.F., Nogueira A.C.R., Ader M. 2007. Identification of a Sturtian cap carbonate in the Neoproterozoic Sete Lagoas carbonate platform, Bambuí Group, Brazil. *Comptes Rendus Geoscience*, **339**:240–258.
- Vieira L.C.M., Dussin T.M., Velásquez L.N.M., Matta M.V.L. da. 2016. Geoquímica das Rochas Carbonáticas da Base do Grupo Bambuí (Lagoa Santa, Mg): Implicações para Fontes de Proveniência e Condições Paleo-Redox de Deposição. In: SBG: Cong. Bras. de Geol., **48**, Anais.
- 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.