

# PETROGRAFIA, QUÍMICA MINERAL E GEOTERMobarOMETRIA DE METAPELITO DO GRUPO CARRANCAS NA NAPPE DE LUMINÁRIAS (MG)

PETROGRAPHY, MINERAL CHEMISTRY AND THERMOBAROMETRY OF METAPELITE OF THE CARRANCAS GROUP IN THE LUMINÁRIAS NAPPE – MINAS GERAIS – BRAZIL

Regiane Andrade FUMES<sup>1</sup>, George Luiz LUVIZOTTO<sup>2</sup>, Renato MORAES<sup>3</sup>, Edson Ricardo Maia FERRAZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, São Paulo, Brasil –Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente. Email: regianefumes@gmail.com; ercmaia@gmail.com.

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro - SP, Brasil. Email: georgell@rc.unesp.br.

<sup>3</sup>Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, São Paulo - SP, Brasil. Email: rmoraes@usp.br

Introdução  
Contexto Geológico da Área de Estudos  
Materiais e Métodos  
Trabalho de campo  
Petrografia  
Química Mineral  
Termobarometria (*Average PT*)  
Petrografia  
Petrografia da porção norte da *Nappe* de Luminárias  
Petrografia da porção centro-norte da *Nappe* de Luminárias  
Petrografia da porção sul da *Nappe* de Luminárias  
Química Mineral  
Granada  
Estauroлита  
Muscovita  
Biotita  
Cloritoide  
Clorita  
Termobarometria (THERMOCALC - *Average P-T*)  
Discussões  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** - A *Nappe* Luminárias corresponde à estrutura alongada de orientação NNE-SSW, situada na porção sul do Orógeno Brasília, de idade neoproterozoica, na borda sul do Cráton do São Francisco. Tal estrutura é composta por metapelitos e quartzitos do Grupo Carrancas. O presente trabalho foca na caracterização metamórfica das suas rochas e utiliza petrografia, química mineral e geotermobarometria. A paragénesis observada na porção norte é  $\text{Chl}+\text{St}+\text{Ky}+\text{Rt}+\text{Qtz}+\text{Ms}$ ; na porção centro norte é  $\text{St}+\text{Grt}+\text{Bt}+\text{Rt}+\text{Qtz}+\text{Ms}$  e na porção sul é  $\text{Grt}+\text{Ky}+\text{St}+\text{Rt}+\text{Qtz}+\text{Ms}$ . Clorita retrometamórfica é observada no centro-norte e sul e biotita retrometamórfica é observada no sul. As condições do pico metamórfico obtidas pelo método *average PT* do THERMOCALC na porção centro-norte são de  $570 \pm 67$  °C e  $9,4 \pm 1,9$  kbar e na porção sul  $609 \pm 63$  °C e  $11,4 \pm 3,9$  kbar. Os resultados indicam a presença de gradiente metamórfico com condições que variam de fácies anfibolito inferior na porção norte e centro-norte a fácies anfibolito médio, na porção sul, ambas de alta pressão.

**Palavras-chave:** *average PT*; fácies anfibolito de alta pressão; Grupo Carrancas; química mineral; THERMOCALC.

**ABSTRACT** - The Luminárias *Nappe* is a NNE-SSW elongated structure, located in the southern portion of the Neoproterozoic Brasília Orogen, which borders the São Francisco Craton, MG, Brazil. It is composed of metapelite and quartzite from the Carrancas Group. The present work focuses on the metamorphic characterization of the Luminárias *Nappe* by means of petrography, mineral chemistry and average PT method of THERMOCALC. In the northern portion, the paragenesis is  $\text{Chl}+\text{St}+\text{Ky}+\text{Rt}+\text{Qtz}+\text{Ms}$ ; in the center-north it is  $\text{St}+\text{Grt}+\text{Bt}+\text{Rt}+\text{Qtz}+\text{Ms}$  and in the southern it is  $\text{Grt}+\text{Ky}+\text{St}+\text{Rt}+\text{Qtz}+\text{Ms}$ . Retrometamorphic chlorite is observed in the center-north and southern portions, while retrometamorphic biotite is observed in the southern portion. Mineral chemistry data on the rock forming minerals show differences in the composition of minerals from the northern, center-north and southern portion of the Luminárias *Nappe*. Metamorphic peak conditions (average PT) in the center-northern portion are  $570 \pm 67$  °C and  $9.4 \pm 1.9$  kbar, in the southern portion are  $609 \pm 63$  °C and  $11.4 \pm 3.9$  kbar. Results indicate the presence of a metamorphic gradient with conditions increasing from lower amphibolite facies in the northern and center-north to medium amphibolite in the southern portion, both at high-pressures.

**Keywords:** average PT; high-pressure amphibolite facies; Carrancas Group; mineral chemistry; THERMOCALC.

## INTRODUÇÃO

Ao sul da borda meridional do Cráton do São Francisco ocorre o limite entre as faixas Brasília e Ribeira e, na literatura, são apresentadas diferentes interpretações acerca desse limite.

Parte dos autores interpreta que o contato entre essas duas faixas é abrupto (Campos Neto, 2000; Campos Neto et al., 2004), outros consideram que o contato entre as faixas ocorre por zona de

interferência entre elas (Trouw et al., 2000; Trouw et al., 2013; Peternel et al., 2005).

Localizada no sudeste brasileiro, na região entre Luminárias e São Tomé das Letras, MG, a *Nappe* de Luminárias se destaca pela ocorrência de conjunto interessante de rochas metamórficas do Grupo Carrancas (Trouw et al., 1980), que é composto por xisto ou filito e quartzito. Na *Nappe* de Luminárias xisto e filito contêm combinações de quartzo, muscovita, estauroлита, cianita, granada, biotita, cloritoide e rutilo, tornando as rochas interessantes para estudos metamórficos.

Trabalhos sobre o metamorfismo do Grupo Carrancas indicam a presença de gradiente metamórfico variando de fácies xisto verde, na porção norte, para fácies anfíbolito na porção sul (Trouw et al., 1980, Trouw et al., 1982;

## CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos se localizada na porção sul do estado de Minas Gerais, abrangendo as proximidades das cidades de Luminárias e São Tomé das Letras. As unidades aflorantes na área pertencem às províncias estruturais do São Francisco, Tocantins e Mantiqueira (Almeida, 1977; Almeida et al., 1981), nas quais ocorrem respectivamente rochas associadas ao Cráton do São Francisco, Faixas Brasília e Ribeira (Figura 1). As rochas que constituem as faixas móveis registram processos metamórficos, magmáticos e sedimentares do Neoproterozoico que atuaram no Ciclo Brasileiro (Brito Neves et al., 1999; Campos Neto, 2000).

A evolução das faixas Brasília e Ribeira pode ser entendida como episódios independentes (Campos Neto, 2000; Campos Neto et al., 2004) ou envolvendo superposição de deformação e de metamorfismo da Faixa Ribeira, mais nova, sobre a Brasília, gerando uma região, ou zona, de interferência (Trouw et al., 2000; Trouw et al., 2013; Peternel et al., 2005). Segundo a proposta de Campos Neto (2000) as rochas da *Nappe* de Luminárias pertencem ao Sistema de *Nappes* Carrancas (Figura 1), que possuem afinidades de margem passiva e/ou relacionadas à Placa Sanfranciscana (Campos Neto et al., 2004; Westin & Campos Neto, 2013; Westin et al., 2016).

Na proposta que postula a existência de zona de interferência entre as faixas Brasília e Ribeira, as rochas da *Nappe* de Luminárias são associadas às *nappes* da Megasequência Andrelândia e estão

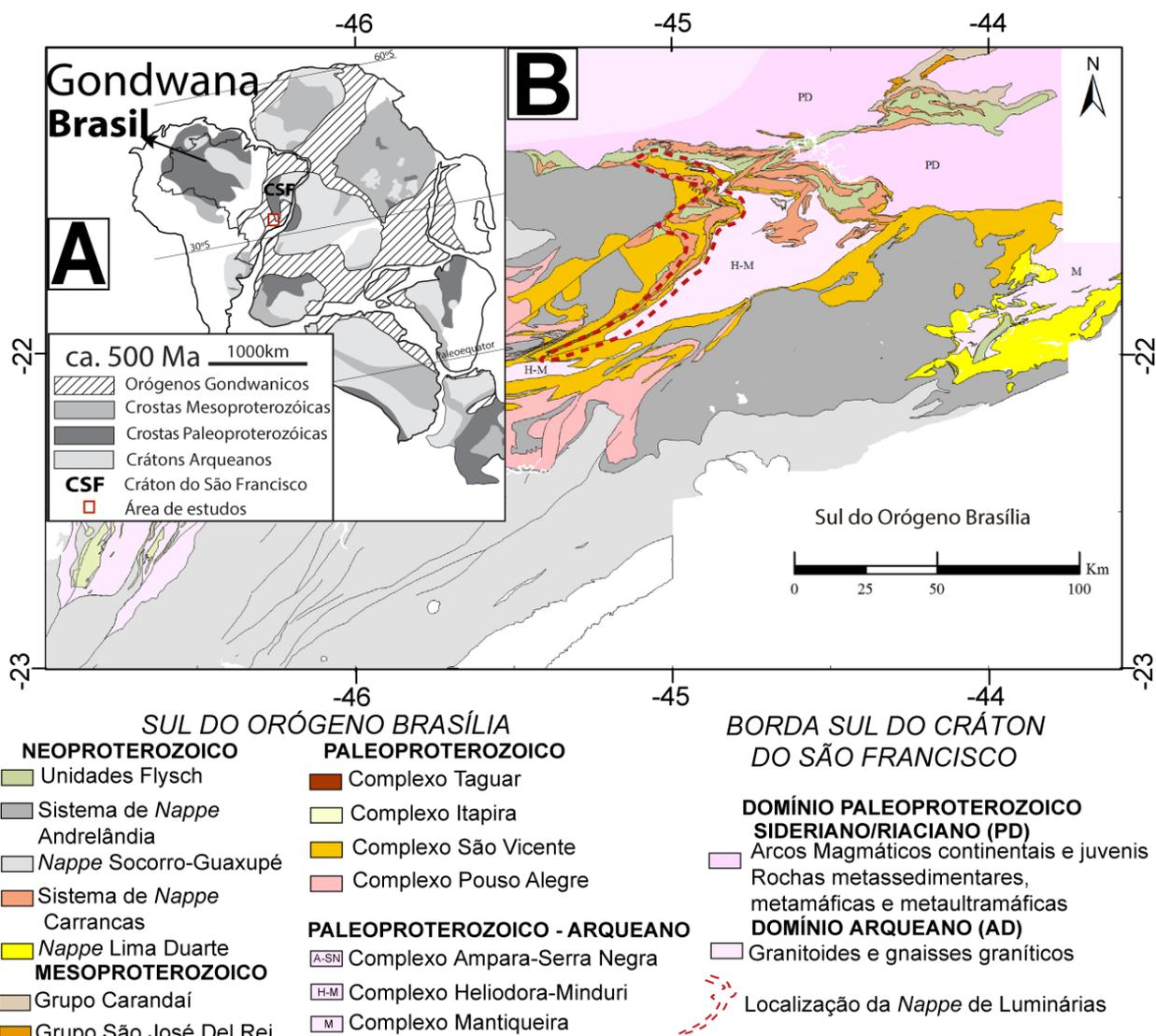
Ribeiro & Heilbron, 1982; Peternel et al., 2005), com regimes de pressão próximos ou no início da fácies eclogito (Silva, 2010). Todavia, os dados disponíveis não permitem quantificar as condições de metamorfismo das rochas na *Nappe* de Luminárias, pois a maior parte dos estudos foi feita na região de Carrancas.

O objetivo do presente trabalho é caracterizar as condições do metamorfismo das rochas da *Nappe* de Luminárias e usar os resultados para avaliar o contexto tectônico no qual o metamorfismo foi gerado. Para tal, são apresentadas associações minerais representativas dos diferentes estágios do metamorfismo. Dados de química mineral são utilizados para quantificar as condições de pressão e temperatura com o THERMOCALC, utilizando o método de *average PT*.

na sua base estrutural (Ribeiro et al., 1995; Trouw et al., 2000; Heilbron et al., 2004 e Heilbron et al., 2008). A *Nappe* de Luminárias é composta pelas rochas do Grupo Carrancas, definido por Trouw et al. (1980), que o dividiu nas formações Campestre e São Tomé das Letras, constituídas, respectivamente, por filito grafitoso cinza, comumente com granada, estauroлита, cianita e cloritoide, com intercalações de quartzito e quartzito micáceo, algumas vezes com mica verde e intercalado com mica xisto.

Ocorrem também rochas associadas ao embasamento, composto por gnaiss fino bandado, filito, quartzito, gondito, rochas meta-ultramáficas e ortognaisses (Trouw et al., 1983, 1980 - Figura 2).

Paciullo et al. (2003) reúnem o Grupo Carrancas e o Grupo Andrelândia que, em conjunto, compõem a Megasequência Andrelândia, uma sequência metassedimentar de idade neoproterozoica composta por associações de litofácies distintas e rochas metaígneas associadas, divididas nas unidades Na<sub>1+2</sub>, Na<sub>3</sub>, Na<sub>4</sub>, Na<sub>5</sub>. Segundo esta proposta, as unidades Na<sub>3</sub> e Na<sub>4</sub> correspondem às formações Campestre e São Tomé das Letras, respectivamente. Westin & Campos Neto (2013) e Westin et al. (2016) denominam a Unidade Na<sub>1+2</sub> de Complexo São Vicente que, segundo os autores, possui idade paleoproterozoica (Figura 1) e, portanto, não podem fazer parte da Megasequência Andrelândia como proposto anteriormente.

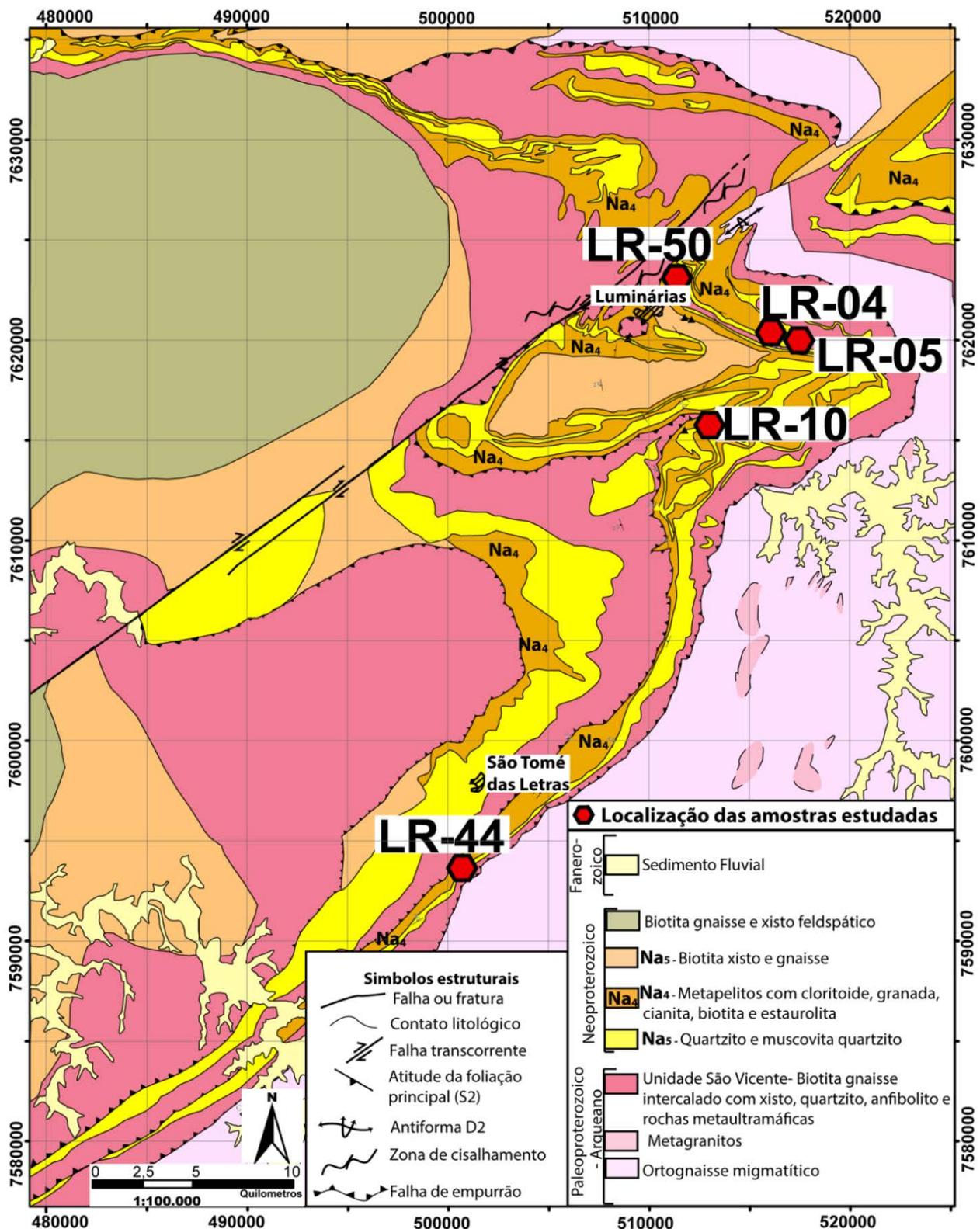


**Figura 1** -Mapa da localização da área de estudos. A) Mapa geológico do Gondwana com cerca de 500 Ma., extraído de Spencer et al. (2016). B) Mapa Geológico do Sul do Orógeno Brasília, mostrando a localização da *Nappe* de Luminárias. Extraído de Westin et al. (2016).

Trouw et al. (1980) e Ribeiro & Heilbron (1982) descrevem que as condições de metamorfismo das rochas do Grupo Carrancas variam de fácies xisto verde, na porção norte, para fácies anfíbolito, na porção sul, ambas com pressões intermediárias, devido à presença de granada e cianita. Nos mapas de distribuição de isógrads metamórficas apresentados por Ribeiro & Heilbron (1982) e de Trouw et al. (1984), a *Nappe* de Luminárias é dividida em quatro associações minerais, de norte para sul: granada, granada + estauroлита, granada + estauroлита + cianita, granada + estauroлита + cianita + sillimanita, confirmando o aumento das condições do metamorfismo para sul. Ribeiro & Heilbron (1982) descrevem a ocorrência de sillimanita no extremo sul da *Nappe* de Luminárias, a qual é interpretada como resultado do metamorfismo/deformação da Faixa Ribeira,

que apresenta regime bórico inferior, sobre a Faixa Brasília.

Mapas posteriores de isógrads metamórficas, como o de Peternel et al. (2005), Reno et al. (2012), Trouw et al. (2013) corroboram os resultados anteriores. Silva (2010) estudou as rochas da *Klippe* de Carrancas, localizada a nordeste da *Nappe* de Luminárias, e obteve condições de metamorfismo com condições de pressão mais elevadas que as de metamorfismo barroviano típico, com  $12,9 \pm 1$  kbar e  $608,5 \pm 19,5$  °C. O mapa metamórfico apresentado difere das zonas apresentadas em trabalhos anteriores (Peternel et al., 2005; Reno et al., 2012; Trouw et al., 2013), pois apresenta zonas envolvendo cloritoide + clorita + cianita, cloritoide + clorita + estauroлита ± granada, clorita + estauroлита + granada, estauroлита + granada + cianita ± biotita.



**Figura 2** - Mapa Geológico da *Nappe* de Luminárias e suas adjacências com a localizações das amostras utilizadas nesse trabalho. Foi utilizada a seguinte base geológica: Trouw et al. (2003), Queménéur et al. (2003), Nunes et al. (2008) e Paciullo & Ribeiro (2008).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Trabalho de campo

Foram realizadas três etapas de trabalho de campo, totalizando doze dias, para reconhecimento das unidades litológicas da área, das relações estruturais entre elas e para

coleta de 40 amostras de metapelito para petrografia e análises químicas.

### Petrografia

A petrografia foi realizada em lâminas delgadas visando:

- (i) identificar a ocorrência de minerais índices do metamorfismo;
- (ii) identificar texturas que evidenciem processos de metamorfismo;
- (iii) identificar as principais reações metamórficas que deram origem as paragêneses;
- (iv) estudar a relação entre a deformação e o metamorfismo;
- (v) calcular as condições *P-T* do metamorfismo após as análises de química mineral.

### Química mineral

Os minerais de sete seções delgadas foram analisados na microsonda eletrônica (EPMA). A localização dessas amostras está apresentada na figura 2.

Foram realizadas análises de elementos maiores com a EPMA nos seguintes minerais dos metapelitos: granada, clorita, cloritoide, estauroilita, biotita e muscovita. Para as análises foi utilizado o Laboratório de EPMA do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) da Unesp de Rio Claro, equipado com microsonda JEOL JXA8230 Superprobe, com cinco detectores WDS. Para análise dos

silicatos, a padronização foi feita em minerais e óxidos, dependendo do elemento a ser analisado.

O tempo de contagem para os elementos maiores foi de 10 segundos no pico e 5 segundos em cada posição do *background*, inferior e superior.

Utilizou-se aceleração de 15 kV e corrente de 20 nA e feixe focado de 5 micrômetros para as micas e de 1 micra para os outros minerais.

A fórmula química dos minerais foi calculada com o programa *aX* (url: <http://www.esc.cam.ac.uk/research/research-groups/research-projects/tim-hollands-software-pages/ax>) desenvolvido por Tim Holland.

### Termobarometria (*average pt*)

Para a termobarometria foi utilizado o programa THERMOCALC (Powell & Holland, 1988, Holland & Powell, 1998), versão 6.2 e o método *average – PT*.

Neste trabalho, foi utilizado o banco de dados internamente consistente *tc-ds62* atualizado em seis de fevereiro de 2012 (Holland & Powell, 2011).

## PETROGRAFIA

Por ocorrer ao longo de toda *Nappe* de Luminárias e por apresentar associações minerais diagnósticas do metamorfismo, foi utilizado o metapelito da unidade Na<sub>4</sub> (Paciullo et al., (2003), equivalente à Formação Campestre de Trouw et al., (1980), para a caracterização metamórfica.

Para melhor ilustrar as variações mineralógicas e texturais decorrentes do gradiente metamórfico, compartimentou-se a área em três grandes porções: norte, centro-norte e sul.

Em ambas as porções a foliação principal é a *S*<sub>2</sub> que se manifesta como xistosidade ou clivagem de crenulação. A foliação *S*<sub>1</sub> é raramente observada em micrólitos de clivagens de crenulação *S*<sub>2</sub> e em regiões de charneira de dobras *D*<sub>2</sub>.

### Petrografia do norte da *Nappe* de Luminárias

Na porção norte da *Nappe* de Luminárias, a Unidade Na<sub>4</sub> é composta por dois litotipos: muscovita xisto porfiroblástico com cloritoide e cianita; e clorita xisto com estauroilita e cianita (Figuras 3A, B, C).

O muscovita xisto porfiroblástico com

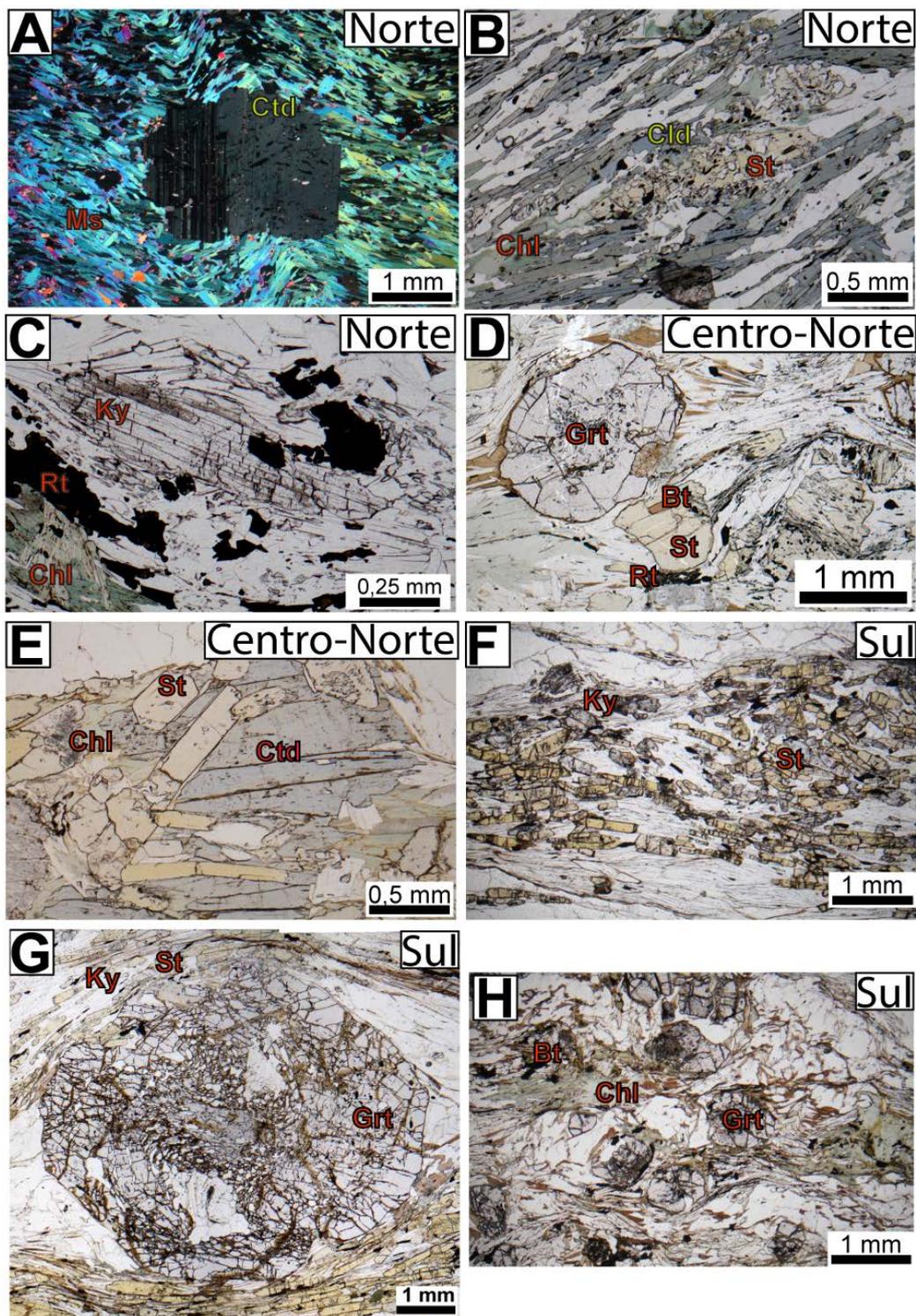
cloritoide e cianita apresenta textura lepidoblástica, inequigranular porfiroblástica. A matriz é composta por muscovita, clorita, cianita e rutilo, já os porfiroblastos são de cloritoide (Figuras 3A, C).

A granulação da matriz é fina, com dimensão média dos cristais de 0,3 mm, mas os porfiroblastos atingem 4 mm. A xistosidade é marcada pela orientação preferencial dos cristais de muscovita, clorita, ilmenita e rutilo. Frequentemente, a xistosidade *S*<sub>2</sub> está crenulada (Figuras 3A, B).

A rocha é composta por muscovita (80%) que compõe a matriz, quartzo (5%) que ocorre como lentes alongadas com extinção ondulante moderada, clorita (5%), minerais opacos (5%), rutilo (2%), cloritoide (3%) e cianita (< 1%).

Os porfiroblastos de cloritoide não apresentam sombra de pressão e a trilha de inclusões segue a foliação externa (Figura 3A) indicando que o mineral é pós-cinemático em relação à foliação principal da rocha (*S*<sub>2</sub>).

A cianita ocorre na matriz, marcando a xistosidade (Figura 3C), e é interpretada como sin-cinemática à foliação *S*<sub>2</sub>.



**Figura 3** - Fotomicrografias de rochas representativas da Unidade Na<sub>4</sub> na *Nappe* de Luminárias. **A)** Porfiroblastos pós-tectônico a S<sub>2</sub> de cloritoide ao centro do muscovita xisto porfiroblástico com cloritoide e cianita. Matriz com textura lepidoblástica crenulada. Polarizadores cruzados. (Lâmina LR-04 - Centro). **B)** Porfiroblasto de estaurolita do clorita xisto com estaurolita e cianita sendo substituído por cristais de clorita. Polarizadores paralelos. (Lâm. LR-05 - Centro). **C)** Exemplo de um cristal de cianita do muscovita xisto porfiroblástico com cloritoide e cianita. Na borda inferior esquerda é possível observar cristais de clorita. Polarizadores paralelos. (Lâm. LR-04 - Centro). **D)** Porfiroblastos de granada e de estaurolita do muscovita xisto porfiroblástico com granada e estaurolita em uma matriz lepidoblástica com muscovita, biotita e clorita. Destaca-se o porfiroblasto de estaurolita com um cristal de biotita incluso. Polarizadores paralelos. (Lâm. LR-10C - Centro-Norte). **E)** Cloritoide subeudral a anedral do muscovita xisto porfiroblástico com granada e estaurolita englobando cristais eudrais a subedrais de estaurolita. A clorita com cristais anedrais borda o cloritoide. Polarizadores paralelos. (Lâm. LR-10E). **F)** Matriz do estaurolita xisto porfiroblástico com granada e cianita. É possível observar a textura nematoblástica da matriz. Polarizadores paralelos. (Lâm. LR-44C - Sul). **G)** Porfiroblasto de granada do estaurolita xisto porfiroblástico com granada e cianita. Polarizadores paralelos. (Lâm. LR-44C - Sul). **H)** Xisto porfiroblástico com granada, mostrando a presença de clorita e biotita tardia. Polarizadores paralelos. (Lâm. LR-44 - Sul).

O clorita xisto com estaurolita e cianita apresenta textura lepidoblástica, equigranular, de granulação fina. A dimensão média dos cristais é de 0,4 mm.

A foliação ( $S_2$ ) é definida pela orientação preferencial dos cristais de mica e cristais de quartzo alongados, que forma uma clivagem espaçada de crenulação anastomosada. O domínio de clivagem composto por clorita e o micróliton composto por quartzo.

A rocha é composta por clorita (55%), quartzo (40%), que apresenta extinção ondulante intensa a moderada, muscovita (3%), rutilo (2%), ilmenita e minerais acessórios, tais como estaurolita (Figura 3B), cianita, que ocorre dispersa, e apatita.

A estaurolita ocorre como cristais com bordas corroídas e que apresentam clorita como a fase que a substituiu (Figura 3B).

#### **Petrografia do centro-norte da *Nappe* de Luminárias**

Na porção centro-norte da *Nappe* de Luminárias, o metapelito da Unidade  $Na_4$  é representado por muscovita xisto porfiroblástico com granada e estaurolita. A rocha tem textura lepidoblástica, inequigranular, porfiroblástica (Figura 3 D).

A estrutura é marcada pela orientação dos filossilicatos que definem a clivagem de crenulação  $S_2$ , foliação principal da rocha. A matriz da rocha é composta por muscovita (33 a 54%), quartzo (20 a 42%) com extinção ondulante e recristalização dinâmica incipiente, clorita (traço a 23%), que ocorre tanto na matriz como bordejando os porfiroblastos, biotita (1 a 13%), que ocorre inclusa na estaurolita e associada à clorita e a muscovita (Figura 3 D). Apatita, rutilo e ilmenita ocorrem como minerais acessórios.

Os porfiroblastos são constituídos por granada, estaurolita e, mais raramente, cloritoide. A granada é euédrica a subédrica e poiquiloblástica, com inclusões de quartzo e minerais opacos (Figura 3 D).

Os cristais de granada apresentam trilhas espiraladas de inclusões que indicam que o mineral está rotacionado em relação à trama da foliação  $S_2$ .

Os seus porfiroblastos apresentam sombra de pressão, evidenciando caráter pré- a sin-cinemático em relação à foliação principal da rocha ( $S_2$ ).

A estaurolita ocorre sob a forma de cristais euédricos na matriz rica em muscovita e também associada à cristais de cloritoide em domínios pouco micáceos.

Os poiquiloblastos de estaurolita contêm inclusões de ilmenita, rutilo e biotita (Figura 3D), as inclusões formam padrões rotacionados que seguem a orientação da foliação  $S_2$ . Devido a esses aspectos a estaurolita é interpretada como sin-cinemática à  $S_2$ .

Alguns cristais de estaurolita são idioblásticos e estão inclusos no cloritoide, assim eles podem ter cristalizados de forma simultânea, enquanto que a borda da estaurolita que é irregular em contato com a clorita indica que a última é retrometamórfica e que cristalizou as expensas da primeira (Figura 3E).

#### **Petrografia do sul da *Nappe* de Luminárias**

Na porção sul da *Nappe* de Luminárias, a Unidade  $Na_4$  é representada por estaurolita xisto porfiroblástico com granada e cianita.

A rocha é de textura lepidoblástica, inequigranular e porfiroblástica (Figura 3F). A granulação da matriz é fina, com dimensão média dos cristais de 0,5 mm e os porfiroblastos de granada alcançam dimensões de até 5 mm (Figura 3G).

A xistosidade ( $S_2$ ) é marcada pela orientação preferencial dos cristais de muscovita e estaurolita (Figura 3F). A matriz é composta por muscovita (45%), quartzo (35%), estaurolita (20%) e cianita (<1%).

Algumas amostras apresentam raros cristais de biotita e clorita na matriz, que ocorrem como cristais anedrais, não apresentam nítida orientação preferencial e são interpretados como tardios, pós-pico metamórfico e pós-cinemáticos em relação à  $S_2$  (Figura 3H). Turmalina, rutilo, zircão, apatita, e ilmenita ocorrem como minerais acessórios.

Os poiquiloblastos de granada (15%) são euedrais a subedrais, com inclusões internas espiraladas de quartzo, estaurolita, ilmenita e rutilo.

As trilhas de inclusões presentes na granada indicam ser pré- a sin-cinemática em relação à foliação principal ( $S_2$ ), e que esta foi rotacionada (Figura 3G).

A estaurolita é subeudral a euhedral, ocorrendo inclusa na borda dos porfiroblastos de granada e orientada na matriz, levando à interpretação de cristalização pré- a sin-

cinemática em relação à foliação S<sub>2</sub>.

A cianita não ocorre inclusa na granada e é interpretada como sin-cinemática à foliação, todavia, sua cristalização se deu posteriormente à estaurolita, devido ao fato do mineral estar presente apenas na matriz, associado à estaurolita,

## QUÍMICA MINERAL

A composição química dos principais minerais das amostras é apresentada a seguir. Análises representativas são apresentadas na Tabela 1.

### Granada

A granada é observada desde o centro-norte até o sul da *Nappe* de Luminárias e por toda a extensão da estrutura o mineral ocorre como porfiroblastos com variação química entre centro e borda. A fórmula química da granada na porção centro-norte é  $Fe^{2+}_{2,2-2,6}Mn_{0-0,2}Mg_{0,2-0,4}Ca_{0,2-0,5}Ti_{0-0,3}Fe^{3+}_{0-0,2}Al_{1,9-2}Si_{2,8-3}O_{12}$  e na porção sul é  $Fe^{2+}_{1,6-2,5}Mn_{0-0,6}Mg_{0,1-1,2}Ca_{0-0,5}Ti_{0-0,5}Fe^{3+}_{0-0,8}Al_{1,8-2}Si_{2,6-3}O_{12}$ .

Na porção centro-norte da *nappe* o membro final principal é almandina. Os teores variando entre 70% no núcleo e 85% na borda dos cristais (Figura 4A). O membro final piropo apresenta a mesma tendência de enriquecimento em direção às bordas dos cristais, apresenta teores mínimos de 6,3% e máximos de 13% (Figura 4A). Espessartita e grossulária possuem tendência inversa, com empobrecimento em direção às bordas dos cristais. Os teores máximos de espessartita são 7,4% e os mínimos são 0,6 e os da grossulária variam de 12% a ausente (Figura 4 A).

No sul da *Nappe* de Luminárias, a almandina é o membro mais abundante. Os teores variam de 77% a 67% no núcleo e de 84% a 69% nas bordas (Figura 4C), piropo varia de 11,1% a 6,3% no núcleo e de 14,4% a 6,2% na borda (Figura 4D).

A espessartita apresenta o padrão inverso, com valores variando entre 21,3% a 14,3% no núcleo e 17,0% a 3,3% nas bordas (Figura 4F) e a grossulária não apresenta padrão definido, variando entre 3,5% a 0,9% (Figura 4E).

### Estaurolita

A estaurolita ocorre desde o norte da *Nappe* de Luminárias até o sul. Os cristais de estaurolita possuem composição química

mas não ocorrendo incluso na granada.

Os cristais de clorita e biotita não ocorrem orientados e são anedrais (Figura 3H), o que indica que são retrometamórficos. A ilmenita forma coroas integrais ou parciais em torno do rutilo.

homogênea. A fórmula química média dos cristais de estaurolita é  $Fe^{2+}_{3,18}Mg_{0,55}Mn_{0,01}Ti_{0,12}Cr_{0,01}Al_{17,70}Si_{7,72}O_{46,5}H_3$  (Amostra LR-10C - centro-norte - granada xisto porfiroblástico com estaurolita e biotita),  $Fe^{2+}_{3,17}Mg_{0,52}Ti_{0,13}Cr_{0,01}Al_{17,60}Si_{7,81}O_{46,5}H_3$  (Amostra LR-10E - centro-norte - granada xisto porfiroblástico com estaurolita e cloritoide) e  $Fe^{2+}_{3,18}Mg_{0,59}Mn_{0,03}Ti_{0,13}Cr_{0,01}Al_{17,59}Si_{7,77}O_{46,5}H_3$  (Amostra LR-44C - sul - granada-estaurolita xisto com cianita).

A composição química da estaurolita é similar para os três litotipos, salvo algumas diferenças ressaltadas a seguir. Na porção centro-norte da *Nappe* Luminárias, os cristais de estaurolita apresentam teores de Zn mais elevados, entre 0,11 e 0,13 a.p.f.u. na amostra LR-10C, entre 0,05 e 0,09 a.p.f.u. na amostra LR-10E, e entre 0,01 e 0,03 a.p.f.u. na amostra LR-44C. Os teores de Mn são inferiores nas rochas da porção centro-norte quando comparado às do sul da *nappe*, 0,00 a 0,01 a.p.f.u. na amostra LR-10C, 0,00 a.p.f.u. na amostra LR-10E e 0,02 a 0,03 a.p.f.u. na amostra LR-44C.

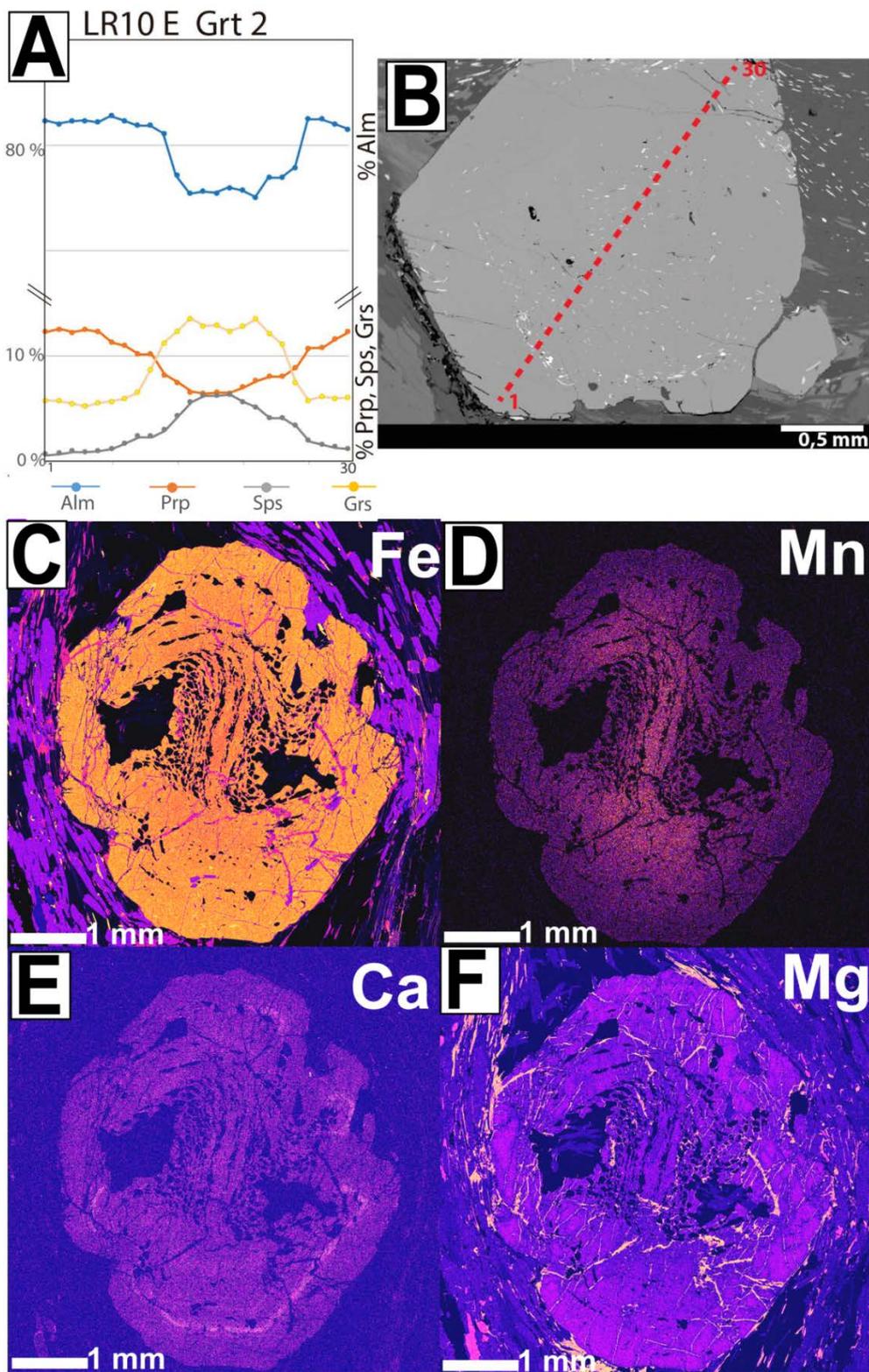
### Muscovita

A fórmula média da muscovita na porção centro-norte é  $K_{0,80}Na_{0,14}Mg_{0,08}Fe^{2+}_{0,07}Ti_{0,02}Al_{2,78}Si_{3,09}O_{10}(OH)_2$  (Amostras LR-10C e LR-10E) e na porção sul é  $K_{0,81}Na_{0,12}Mg_{0,08}Fe^{2+}_{0,06}Ti_{0,03}Al_{2,77}Si_{3,09}O_{10}(OH)_2$  (Amostras LR-44A e LR-44C). A análise comparativa dos elementos envolvidos nas principais substituições que ocorrem na muscovita mostra que não há variação significativa ao longo da área.

Os teores de Na na porção sul são inferiores, entre 0,10 a 0,14 a.p.f.u., quando comparados aos da porção centro-norte, com valores entre 0,14 a 0,16 a.p.f.u..

Os teores de Mg na porção centro-norte e sul são distintos e o valor médio de  $X_{Fe}$  ( $X_{Fe}=Fe/Fe+Mg$ ) na porção centro-norte é 0,47 e na porção sul 0,44.





**Figura 1** - Análise química mineral da granada. **A)** Gráfico ilustrando a composição química do perfil de análise química em termos dos membros finais da granada. **B)** Imagem de elétrons retroespalhados (BSE) do cristal de granada analisado do centro-norte da *Nappe* de Luminárias (Lâmina LR-10E). **C, D, E, F)** Mapas composicionais obtidos pela EPMA da granada do sul da *Nappe* de Luminárias (Lâmina LR-44C). Nessas figuras, é possível observar a variação composicional de Fe (**C**), Mg (**D**), Ca (**E**) e Mg (**F**) na granada.

### Biotita

A biotita está presente na porção centro-norte e sul da *Nappe* de Luminárias. Duas amostras da porção centro-norte foram analisadas: LR-10C e LR-10E. A fórmula

química média da biotita é, respectivamente,  $K_{0,78}Na_{0,03}Mg_{1,14}Fe^{2+}_{1,15}Al_{1,69}Fe^{3+}_{0,13}Ti_{0,08}Si_{2,7}O_{10}(OH)_2$  e  $K_{0,75}Na_{0,03}Mg_{1,08}Fe^{2+}_{1,25}Al_{1,68}Fe^{3+}_{0,03}Ti_{0,08}Si_{2,78}O_{10}(OH)_2$ . Na porção sul (LR-44<sup>A</sup>), a fórmula representativa da biotita é

$K_{0,86}Na_{0,03}Mg_{1,01}Fe^{2+}_{1,34}Al_{1,72}Fe^{3+}_{0,10}Ti_{0,09}Si_{2,65}O_{10}(OH)_2$ .

Nota-se que os teores de  $Fe^{2+}$  são inferiores para a biotita da porção centro-norte, 1,11 a 1,33 a.p.f.u., em comparação com a biotita da porção sul, 1,26 a 1,38 a.p.f.u.. Os teores de Mg apresentam tendência inversa, com valores superiores na porção centro-norte, 0,94 a 1,16 a.p.f.u., quando comparados à porção sul, 0,99 a 1,07 a.p.f.u. A proporção de Al é mais elevada na porção sul, 1,70 a 1,74 a.p.f.u. e 1,64 a 1,70 a.p.f.u., no centro-norte. As proporções moleculares de Na variam de 0,02 a 0,04 a.p.f.u. em ambas as porções.

Os teores de Ti são superiores na biotita da porção sul da *nappe*, 0,08 a 0,12 a.p.f.u. e no centro-norte são entre 0,12 e 0,13 a.p.f.u..

#### Cloritoide

O cloritoide ocorre apenas nas porções norte e centro-norte da *Nappe* de Luminárias. A fórmula representativa dos cristais de cloritoide na porção norte (LR-04) é  $Fe^{2+}_{0,77}Mg_{0,16}Mn_{0,05}Al_{1,95}Fe^{3+}_{0,07}Si_{0,99}O_5(OH)_2$  e na porção centro-norte (amostra LR-10E) é  $Fe^{2+}_{0,81}Mg_{0,19}Al_{1,97}Fe^{3+}_{0,01}Si_{1,01}O_5(OH)_2$ . A composição química do cloritoide é relativamente homogênea. Os cristais da porção norte apresentam valores de Mg e  $Fe^{2+}$

inferiores quando comparados aos da porção centro-norte. Todavia,  $X_{Fe}$  não se altera significativamente, com 0,82 na porção norte e 0,81 na porção centro-norte da *nappe*.

Os cristais de cloritoide da porção norte possuem teores mais elevados de Mn e  $Fe^{3+}$ , em relação à porção centro-norte.

#### Clorita

A fórmula representativa da clorita na porção norte é  $Mg_{2,02}Fe^{2+}_{2,43}Mn_{0,05}Si_{2,51}Al_{2,94}Fe^{3+}_{0,02}Na_{0,01}O_{10}(OH)_{16}$  (LR-04), na porção centro-norte é  $Mg_{2,14}Fe^{2+}_{2,34}Mn_{0,03}Si_{2,52}Al_{2,92}Fe^{3+}_{0,03}O_{10}(OH)_{16}$  para a amostra LR-10C e  $Mg_{2,15}Fe^{2+}_{2,10}Si_{2,78}Al_{2,69}Na_{0,01}O_{10}(OH)_{16}$  na amostra LR-10E.

Na porção norte, os cristais de clorita apresentam valores mais elevados de  $Fe^{2+}$  e teores intermediários de Mg quando comparados às demais amostras. Possui valor médio de  $X_{Fe}$  de 0,55 com teores variando de 0,51 a 0,59. Já no centro-norte da *nappe* os valores de  $Fe^{2+}$  são intermediários e os valores de Mg são mais elevados, com o  $X_{Fe}$  médio de 0,51, com valores variando de 0,59 a 0,48.

Os teores de Al contidos na clorita da porção sul são mais baixos que nas demais amostras, com média de 2,77 a.p.f.u., no norte, de 2,69 a.p.f.u., no centro-norte e 2,51 a.p.f.u., no sul.

### TERMOBAROMETRIA (THERMOCALC - AVERAGE P-T)

Foram calculadas as condições de pressão e temperatura do pico do metamorfismo para duas amostras, uma da porção centro-norte, LR-10E, e outra da porção do sul, LR-44C (Figura 5). Não foi possível calcular *average PT* para amostras da porção norte devido ao fato da estauroлита não estar em equilíbrio textural com os outros minerais (Figura 3B), além disso, o cloritoide analisado nessa porção é pós-cinematismo a  $S_2$  (Figura 3A), não correspondendo ao pico metamórfico, assim, o programa não consegue

definir número mínimo de reações linearmente independentes para os cálculos.

Para a amostra LR-10E a paragênese de pico metamórfico é  $Bt+St+Grt+Ms+Qtz$  (abreviações segundo Kretz, 1983), considerando a rocha com fase aquosa em excesso, obteve-se  $570 \pm 67$  °C e  $9,4 \pm 1,9$  kbar (Figura 5). As condições de  $P$  e  $T$  calculadas para a amostra LR-44C, cuja paragênese é  $Grt+St+Ky+Ms+Qtz$ , são de  $609 \pm 63$  °C e  $11,4 \pm 3,9$  kbar.

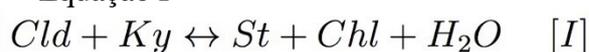
### DISCUSSÕES

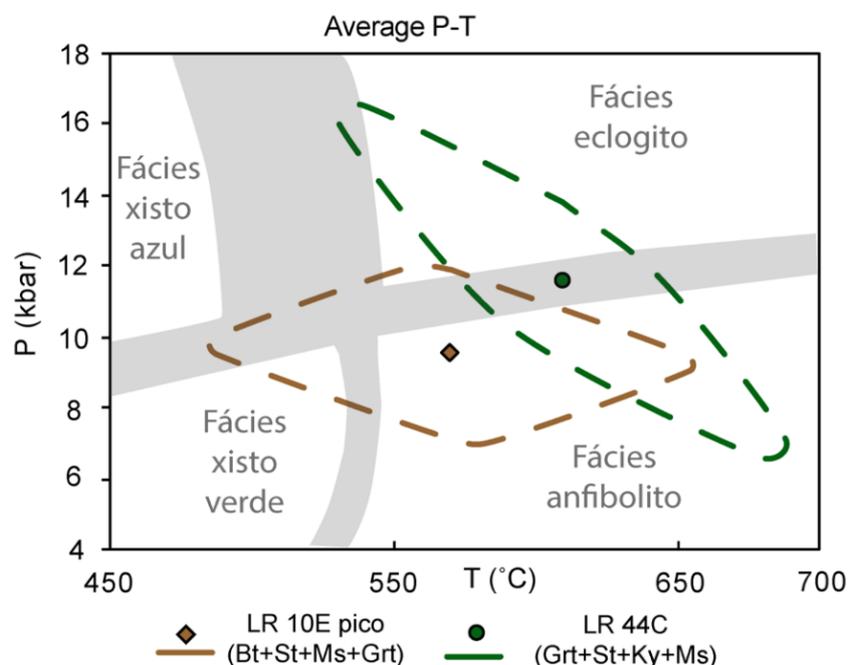
Com base nos dados obtidos, foi possível caracterizar as condições do pico metamórfico das rochas da *Nappe* de Luminárias. Na porção norte da *Nappe* de Luminárias, é observada a paragênese:  $St+Chl+Ky+Ms+Qtz$ , de fácies anfíbolito inferior. A paragênese observada na porção centro-norte da *Nappe* de Luminárias é  $Bt+St+Grt+Qtz+Ms$ , que indica fácies anfíbolito médio. Já no sul da *Nappe*, a

paragênese é  $Ky+St+Grt+Qtz+Ms$ , que representa, no local, fácies anfíbolito médio de alta pressão, no limite com a fácies eclogito.

No norte da *Nappe* de Luminárias a ocorrência da paragênese  $St+Chl+Ky+Ms+Qtz$  indica que foi cruzada a reação metamórfica I (Figura 6):

Equação I



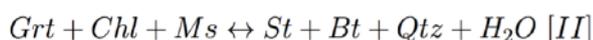


Amostra	avT	sd(T)	avP	sd(P)	corr
LR 10E	570	67	9,4	1,9	-0,189
LR 44C	609	63	11,4	3,9	-0,892

**Figura 5** - Gráfico e tabela mostrando os resultados de *average PT* das amostras LR-10E (pico= Bt+St+Grt+Ms+H<sub>2</sub>O+Qtz) e LR-44C (Grt+St+Ky+Ms+H<sub>2</sub>O+Qtz). Limite das fácies metamórficas extraído de Winter, 2010. Av = média, T = temperatura, P = pressão, sd = desvio padrão e corr = correlação, temperatura em °C e pressão em kbar. Abreviações segundo Kretz, 1983.

Na porção centro-norte ocorre a formação da biotita através da equação II (figura 6).

Equação II



Na porção sul ocorre a estabilização de cianita na paragênese mineral pela reação III, via consumo de clorita (Figura 6).

Equação III



Além das paragêneses metamórficas descritas, foram observadas associações minerais do retrometamorfismo.

Na porção norte da *Nappe* de Luminárias, a clorita ocorre nas bordas corroídas da estauroлита (Figura 3B).

Na porção centro-norte da *Nappe* é observada clorita retrometamórfica na matriz e bordejando cristais de cloritoide e estauroлита (Figura 3E).

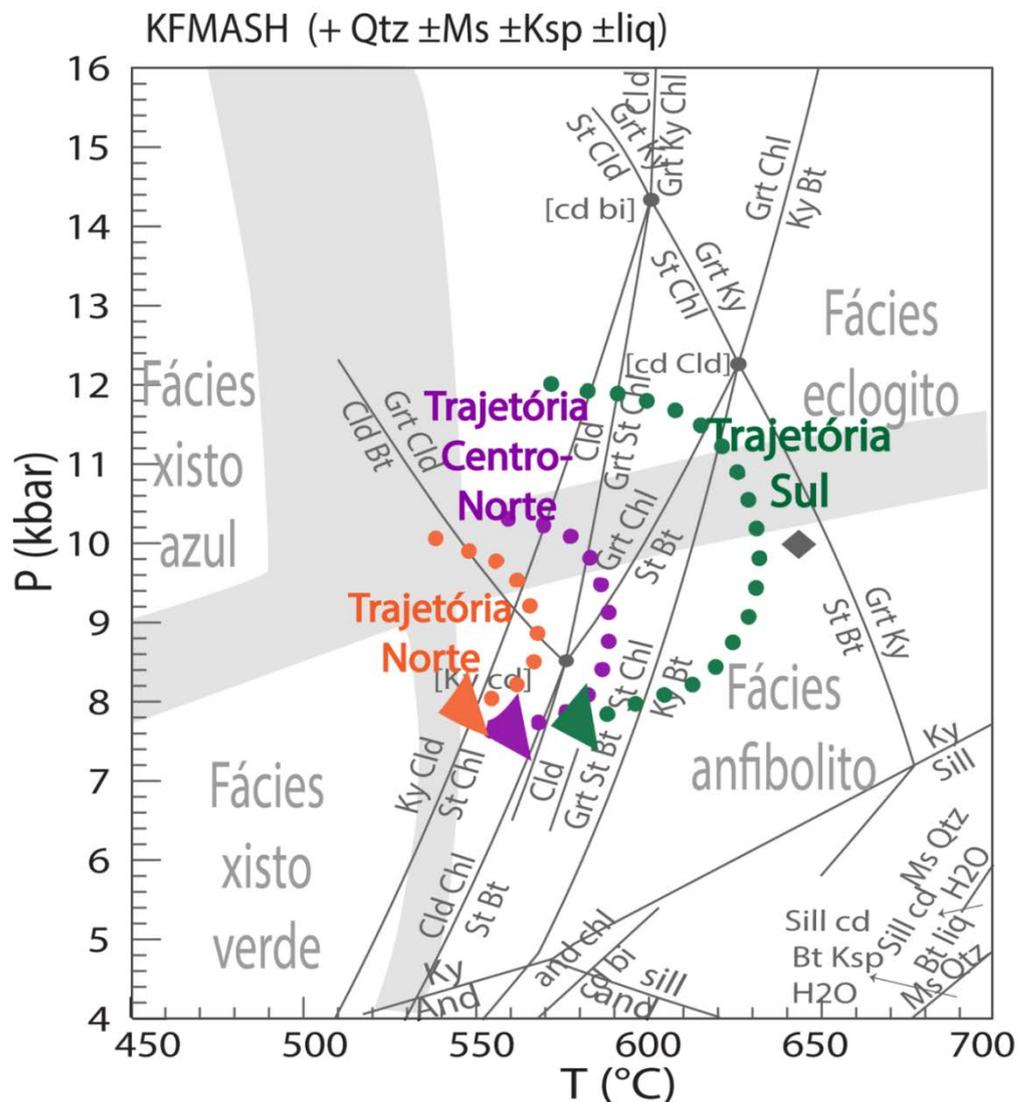
Na porção sul, ocorrem cristais anedrais de clorita e biotita, com disposição aleatória na matriz, textura essa considerada retro-metamórfica (Figura 3H).

Comparando as paragêneses descritas na

*Nappe* de Luminárias por Trouw et al. (1980), Ribeiro & Heilbron (1982), Peternel et al. (2005), Reno et al. (2012) e Trouw et al. (2013), com as paragêneses descritas no presente trabalho, nota-se que o início da ocorrência da granada e a paragênese Grt+St+Ky foram observadas mais ao sul do que nos mapas descritos na literatura.

Além disso, não foi observada a presença de sillimanita na porção sul da *nappe*, como alguns desses trabalhos apontam. Os dados do presente trabalho confirmam a presença do gradiente metamórfico, obliquo à direção dos contatos geológicos, mostrando que as condições de pressão e de temperatura aumentam para sul.

Não é possível observar variação nas condições metamórficas da base para o topo estrutural da unidade Na<sub>4</sub>. Nota-se que o presente estudo não abrange o extremo norte da *Nappe* de Luminárias, onde segundo a literatura (Trouw et al., 1980, Ribeiro & Heilbron, 1982, Peternel et al., 2005, Reno et al., 2012 e Trouw et al., 2013) ocorrem rochas de fácies xisto verde.



**Figura 6:** Grade petrogenética no sistema KFMASH, extraída de White et al. (2014), contendo as trajetórias metamórficas traçadas para as porções norte, centro-norte e sul da *Nappe* de Luminárias. O limite das fácies metamórficas foi extraído de Winter, 2010. As trajetórias foram traçadas utilizando as reações metamórficas observadas nas diferentes associações minerais.

Assim como as diferentes paragêneses observadas ao longo da *Nappe* de Luminárias, também foram caracterizadas algumas distinções na química dos principais minerais, as quais ilustram que as condições de metamorfismo nas porções norte, centro-norte e sul da *Nappe* de Luminárias foram diferentes, tais como os teores de Fe, Mn e Mg na granada; de Zn e Mn na estauroлита; de Na,  $X_{Fe}$  na muscovita; de  $Fe^{3+}$ , Mg, Al e Ti a biotita; de Mg,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  e Mn no cloritoide e de  $Fe^{2+}$  e Al na clorita. Além disso, o zoneamento químico nos porfiroblastos de granada, que ocorrem em toda a extensão da *nappe*, indica que a sua cristalização registrou aumento de temperatura durante o metamorfismo progressivo, já que há aumento de Mg para as bordas dos cristais e diminuição de Mn. Um dado interessante confirma, que

confirma o caráter de alta pressão do metamorfismo das rochas da *nappe*, é a proporção relativamente alta de Na na muscovita, o que gera molécula de paragonita de forma significativa na química do mineral.

A termobarometria usando o método *average PT* do THERMOCALC se mostrou eficiente na caracterização das condições do pico metamórfico das rochas da *Nappe* de Luminárias. As condições metamórficas obtidas pelo método confirmam o gradiente metamórfico, com aumento de temperatura e pressão de norte para o sul.

Apesar do método de *average PT* se mostrar útil, os desvios padrões obtidos são elevados e, deste modo, as diferenças de pressão entre os resultados das porções norte e sul devem ser avaliadas com cuidado.

A dificuldade em se obter resultados mais precisos de pressão está vinculada à ausência de plagioclásio no xisto, que quando conjugado à granada gera um dos barômetros mais precisos para metapelito.

Trouw et al. (1982), Trouw et al. (1983), Ribeiro et al. (1995) descrevem que as condições de metamorfismo da região é do tipo barroviano, de pressão intermediária a alta. Dados apresentados por Silva (2010) para rochas da *Klippe* de Carrancas indicam condições de pico em pressões mais elevadas do que as do metamorfismo barroviano típico. Os resultados obtidos no presente trabalho também indicam condições de pressão mais elevadas, que alcançam  $11,8 \pm 2,8$  kbar com  $608 \pm 47$  °C e na porção sul da *Nappe* de Luminárias. Isto implica

que as rochas metassedimentares estudadas alcançaram condições profundas da crosta, no limite entre as fácies anfibolito e eclogito, como evidenciado anteriormente por Silva (2010) para as rochas da região de Carrancas.

Além disso, as condições aqui calculadas estão em acordo com os resultados obtidos pelo autor e implicam em subducção de rochas da crosta continental. As paragêneses constituídas por cianita + estauroлита + granada  $\pm$  clorita  $\pm$  cloritoide são boas marcadoras de temperatura, mas não de pressão.

No entanto, pelitos afetados por metamorfismo de alta pressão são caracterizados exatamente por essas paragêneses, como discutido por Koons & Thompson (1985) e que podem alcançar pressões de até 16 kbar.

## CONCLUSÕES

Os dados obtidos no presente trabalho permitem concluir que:

- A área é marcada pela ocorrência de gradiente metamórfico com condições que variam de fácies anfibolito inferior, no norte, para fácies anfibolito médio de alta pressão, próximo das condições da fácies eclogito, no sul. A paragênese observada na porção centro-norte da *Nappe* de Luminárias é clorita + estauroлита + cianita + muscovita + quartzo, na porção centro-norte é biotita + estauroлита + granada + muscovita + quartzo e no sul é granada + estauroлита + cianita + muscovita + quartzo.

- O gradiente metamórfico é oblíquo aos contatos das unidades.

- As trajetórias metamórficas registradas nas rochas da *Nappe* de Luminárias são horárias, registrando aquecimento seguido de uma forte descompressão e resfriamento (Figura 6).

- As condições de pressão registradas nas rochas estudadas são superiores àquelas sugeridas na literatura para a área de estudos, e estão em acordo com os cálculos apresentados por Silva

(2010). Estas condições indicam que as rochas se formaram em condições mais profundas, implicando em rápida subducção e exumação de rochas da crosta continental, de modo que as rochas gravam paragêneses de temperaturas medianas e de alta pressão, mas não tiveram tempo para se equilibrar com temperaturas muito altas.

- A caracterização metamórfica usando petrografia, química mineral e termobarometria pelo método *average PT* se mostrou eficiente na caracterização metamórfica das rochas da área de estudo.

Sugere-se para os próximos trabalhos na área o refinamento da termobarometria com o uso de geotermobarômetros mais precisos, como os de elementos traço em minerais, *i.e.* Zr em rutilo (Zack et al., 2004; Tomkins et al., 2007) e Ti em quartzo (Wark & Watson, 2006), a confecção de pseudosseções com isopletas de composição mineral, para a modelagem metamórfica, e a datação do pico do metamorfismo usando o método U-(Th)-Pb em monazita e rutilo.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (projetos 2015/07750-5, 2015/05230-0, 2013/04007-0) pelo apoio financeiro. Os autores agradecem à Professora Dra. Carla Porcher pelas correções e sugestões que possibilitaram a melhoria do artigo.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, p. 349–364, 1977.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. DE; FUCK, R. A. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. *Earth*

- Science Reviews**, v. 17, p. 1–29, 1981.
- BRITO NEVES, B. B. de; CAMPOS NETO, M. D.; FUCK, R. A. From Rodinia to Western Gondwana: an Approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. **Episodes- Newsmagazine of International Union of Geological Science**, v. 22, n. 155-166, 1999.
- CAMPOS NETO, M. D. C. & CABY, R. Neoproterozoic high-pressure metamorphism and tectonic constraint from the nappe system south of the Sao Francisco Craton, southeast Brazil. **Precambrian Research**, v. 97, n. 1-2, p. 3–26, 1999.
- CAMPOS NETO, M. D. C. Orogenic Systems from Southwestern Gondwana: An Approach to Brasiliano-Pan African Cycle and Orogenic Collage in Southeastern Brazil. In: CORDANI, U. G. et al. (Eds). **Tectonic Evolution of South America**. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, p.335–365, 2000.
- CAMPOS NETO, M. D. C.; BASEI, M. A. S.; VLACH, S. R. F.; CABY, R.; SZABÓ, G. A. J. Migração de Orogêneses e Superposição de Orogêneses: Um Esboço da Colagem Brasileira no Sul do Cráton do São Francisco, SE - Brasil. **Geologia USP - Série Científica**, v. 4, n. 1, p. 13–40, 2004.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. D. C.; SILVA, L. D.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. D. A. Província Mantiqueira. In: **Geologia do Continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Editora Beca, p. 203–235, 2004.
- HEILBRON, M.; VALERIANO, C.M.; TASSINARI, C.C.G.; ALMEIDA, J.; TUPINAMBÁ, M.; SIGA, O.; TROUW, R. Correlation of Neoproterozoic terrane between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 294, p. 211–237, 2008.
- HOLLAND, T. & POWELL, R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. **Journal of metamorphic Geology**, v. 16, n. 3, p. 309–343, 1998.
- HOLLAND, T. J. B. & POWELL, R. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 29, n. 3, p. 333–383, 2011.
- KOONS, P.O. & THOMPSON, A.B. Non-mafic rocks in the greenschist, blueschist and eclogite facies. **Chemical Geology**, v.50, n.1-3, p.3-30, 1985.
- KRETZ, R. Symbols for rock-forming minerals. **American Mineralogist**, v. 68, p. 277–279, 1983.
- NUNES, R.P. M.; TROUW, R.A.J.; CASTRO, E.O. Mapa Geológico - Folha Varginha (1:100.000). In: **Programa Geologia do Brasil. Levantamentos Geológicos básicos**. Contrato Serviço Geológico do Brasil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- PACIULLO, F. V. P. & RIBEIRO, A. Mapa Geológico - Folha Nepomuceno (1:100.000). In: **Programa Geologia do Brasil. Levantamentos Geológicos básicos**. Serviço Geológico do Brasil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- PACIULLO, FABIO V.P; TROUW, R.A.J.; RIBEIRO, A.; SIMÕES, L.A.; LOPES, M. **Geologia da Folha Andrelândia 1:100.000. Geologia e recursos minerais do sudeste mineiro**. Projeto Sul de Minas-Etapa I, p.84-119, 2003.
- PETERNEL, R.; TROUW, R. A. J.; SCHMITT, R. D. S. Interferência Entre Duas Faixas Móveis Neoproterozoicas: O Caso Das Faixas Brasília e Ribeira No Sudeste Do Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 35, n. 3, p. 297–310, 2005.
- POWELL, R. & HOLLAND, T. J. B. An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. **Journal of metamorphic Geology**, v. 6, n. 2, p. 173–204, 1988.
- QUÉMENEUR, J. J. G.; RIBEIRO, A., PACIULLO, F. V. P., HEILBRON, M.; TROUW, R. A. J.; VALENÇA, J. G.; NOCE, C. M. **Mapa geológico da Folha Lavras**. Projeto Sul de Minas: mapa (1: 100.000) e relatório. Codemig-Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. 822p, 2003.
- RENO, B. L; PICCOLI, P. M.; BROWN, M; TROUW, R. A. J. In situ monazite (U-Th)-Pb ages from the Southern Brasília Belt, Brazil: Constraints on the high-temperature retrograde evolution of HP granulites. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 30, n. 1, p. 81–112, 2012.

- RIBEIRO, A. & HEILBRON, M. Estratigrafia e Metamorfismo dos Grupos Carrancas e Andrelândia, Sul de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 177–186, 1982.
- RIBEIRO, A.; TROUW, R. A., ANDREIS, R. R., PACIULLO, F. V.; VALENÇA, J. G. Evolução das Bacias Proterozoicas e o Termo-Tectonismo Brasileiro na Margem Sul do Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, n. 4, p. 235–248, 1995.
- SILVA, M. P. **Modelamento Metamórfico de Rocas das Fácies Xisto-Verde e Anfibolito com o Uso de Pseudosseções: Exemplo das Rochas da Klippe Carrancas, Sul de Minas Gerais**. São Paulo, 2010. 184p. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- SPENCER, C. J.; HAWKESWORTH, C.; CAWOOD, P. A.; DHUIME, B. Not all supercontinents are created equal: Gondwanarodinia case study. **Geology**, v. 41, n. 7, p. 795–798, 2013.
- TOMKINS, H. S.; POWELL, R.; ELLIS, D. J. The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 25, n. 6, p. 703–713, 2007.
- TROUW, R. A.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F. V. P. Evolução Estrutural e Metamórfica de uma área a SE de Lavras - Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, 1980, Balneário de Camboriú. Camboriú. **Anais...** Balneário de Camboriú: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 2273-2284, 1980.
- TROUW, R. A. J.; PACIULLO, F. V. P.; CHRISPIM, S. J.; DAYAN, H. H. Análise de Deformação numa Área a SE de Lavras Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 187–198, 1982.
- TROUW, R. A. J.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F. V. Geologia Estrutural do Grupos São João del Rei, Carrancas e Andrelândia, Sul de Minas Gerais. **Anais da Academia brasileira de Ciências**, v. 55, n. 1, p. 71–87, 1983.
- TROUW, R.A.; HELBRON, M.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F.V.P.; VALERIANO, C.M., ALMEIDA, J.C.; TUPINAMBÁ, M.; ANDREIS, R. R. The Central Segment of the Ribeira Belt. In: CORDANI, U. G. (Eds), **Tectonic Evolution of South America**. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, p. 287–310, 2000.
- TROUW, R. A. J.; PACIULLO, F. V. P.; RIBEIRO, A.; BITTAR, S.; ALMEIDA, J. C. H. **Mapa Geológico da Folha Caxambu**. Projeto Sul de Minas: mapa (1: 100.000) e relatório. Comig-Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. p. 822, 2003.
- TROUW, R.A.J.; PETERNEL, R.; RIBEIRO, A.; HEILBRON, M.; VINAGRE, R.; DUFFLES, P.; TROUW, C.A new interpretation for the interference zone between the southern Brasília belt and the central Ribeira belt, SE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 48, p. 43–57, 2013.
- WARK, D. A. & WATSON, E. B. Titanic: a titanium-in-quartz geothermometer. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 152, p. 743–754, 2006.
- WESTIN, A. & CAMPOS NETO, M. D. C. Provenance and tectonic setting of the external nappe of the Southern Brasília Orogen. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 48, p. 220–239, 2013.
- WESTIN, A.; CAMPOS NETO, M.C.; HAWKESWORTH, C.J., CAWOOD, P.A.; DHUIME, B., DELAVAUULT, H. A paleoproterozoic intra-arc basin associated with a juvenile source in the Southern Brasília Orogen: Application of U–Pb and Hf–Nd isotopic analyses to provenance studies of complex areas. **Precambrian Research**, v.276, p.178–193, 2016.
- WHITE, R. W.; POWELL, R.; HOLLAND, T. J. B.; JOHNSON, T. E.; GREEN, E. C. R. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 32, n. 3, p. 261–286, 2014.
- ZACK, T.; MORAES, R.; KRONZ, A. Temperature dependence of Zr in rutile: Empirical calibration of a rutile thermometer. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 148, n. 4, p. 471–488, 2004.

Submetido em 25 de janeiro de 2017  
Aceito em 27 de setembro de 2017