

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelagem termodinâmica de gnaisses com coesita da Nappe Três Pontas,
extremo Sul do Orógeno Brasília**

Monografia de Trabalho de Formatura
TF-24/11

Aluno: Eduardo Zenko Taniguti de Oliveira

Orientadora: Dr^a. Alice Westin Teixeira

Co-Orientador: Prof. Dr. Mário da Costa Campos Neto

São Paulo
2024

*À minha família, aos amigos
e companheiros dessa jornada
geológica.*

*Ao meu amigo de quatro
patas, Bethoven (in memorian).*

AGRADECIMENTOS

Os 5 intermináveis (e o mesmo tempo tão rápidos!) anos da graduação seriam intoleráveis sem o apoio e incentivo contínuo de muitas pessoas. Aqui, uma humilde tentativa de agradecer a todos que no meu caminho cruzaram, e de algum modo moldaram quem sou como pessoa e geólogo.

À minha mãe Erika, pelo amor incondicional e suporte em todas as fases da vida, pelo amparo e aconselhamento que permitiram que eu estivesse onde estou. Palavras não bastam para agradecer todo o esforço que segue fazendo por mim, obrigado por tudo! Te amo!

Ao meu pai Leandro, também geólogo, pelo amor e apoio abrangente em todos os âmbitos da vida. Pelas conversas geológicas, companheirismo e viagens que alimentaram o desejo em ser geólogo e ter o mundo como seu laboratório.

Aos meus avós (Claudete e Nivaldo, Olga (*in memoriam*) e Kenzo), aos meus tios e tias (Lu, Paulinho, Renato (*in memoriam*) e Evellyn) e aos meus primos e primas (tantos para nomear) pela eterna companhia e carinho.

À minha orientadora, Alice Westin, pelo suporte, por me guiar nesse labirinto do mundo da modelagem termodinâmica e por estar sempre presente em todas etapas desse trabalho.

Ao meu co-orientador, Mário da Costa Campos Neto, a quem muito admiro, pelo apoio e por me fornecer a oportunidade de trabalhar com as rochas de Três Pontas-Varginha e tentar desvendar seus segredos.

À Beatriz Benetti, que ministrou o minicurso de modelagem termodinâmica durante o 51° CBG em BH que foi essencial para a confecção e melhoria dos diagramas de fase desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Caio Arthur (Fofona) da UnB, pelas orientações e ajuda disponibilizada na modelagem do bendito granulito máfico e seus mistérios ocultos.

A todos os professores do IGc que participaram de minha formação como geólogo, como: Boggiani, André Negrão, Rogério Azzone, Adriana, Renato Moraes, Gergely Szabó, Fred, Brenda Chung, Mário Campos, Cláudio Mora (Kabong), Egydio, Rafito e tantos outros. Se hoje sou o geólogo que sou, a culpa é de vocês!

Aos malucos que eu tenho como amigos mais próximos: Cipó, Frieira, Origami, Micoze, Joanete, Mourão, Tarzan, Progídio, Ovolete e Xarrete. Pelas discussões, rolês da vida e milhares de horas falando m#l\$@. Não sei o que seria da minha graduação sem isso.

Ao pessoal da turma 63, com quem tive o prazer de compartilhar essa caminhada geológica e tantas viagens de campo e suas pérolas.

À minha namorada e companheira de vida, Karin, pela paciência, carinho, apoio, incentivo e por todos os momentos que vivemos e ainda vamos viver juntos. Te quero hoje e sempre!

Finalmente, àqueles que aqui não foram mencionados, mas também fizeram parte da minha caminhada. Quem sabe, sabe!

À FAPESP pelo incentivo financeiro através do processo 2023/16259-5 de bolsa de Iniciação Científica.

"It's a dangerous business, Frodo, going out of your door", he used to say. "You step into the Road, and if you don't keep your feet, there is no knowing where you might be swept off to."

Frodo in "The Fellowship of the Ring" of
J.R.R.Tolkien's "The Lord of the Rings"

*"And I knew exactly what to do.
But in a much more real sense,
I had no idea what to do"*

- Michael Scott, The Office, S7E19

RESUMO

O foco do presente projeto encontra-se na obtenção das condições de pressão e temperatura (P-T) a que foram submetidas as rochas metassedimentares granulíticas da *Nappe* Três Pontas-Varginha (NTPV), extremo sul do Orógeno Brasília. A identificação recente de micro-inclusões de coesita em porfiroblastos de granada indica que tais rochas foram submetidas a condições metamórficas de ultra-alta pressão. Tal evidência, inédita na literatura, demanda que novos modelamentos termodinâmicos de detalhe sejam realizados com o intuito de identificar possíveis registros de condições de pressão e temperatura (P-T) de ultra-alta pressão (UHP) na assembleia mineral principal destas rochas. Para isso duas amostras foram selecionadas: (i) rutilo-cianita-granada-quartzo-feldspato granulito (NESG-72X); (ii) rutilo-titanita-hornblenda-granada gnaiss (NESG-72U). Trajetórias P-T foram estimadas para ambas amostras a partir da combinação de análises petrográficas por microscopia óptica, análises químicas pontuais e mapeamento composicional quantitativo via microsonda eletrônica com modelagem termodinâmica (*software* Theriak-Domino). Mapas composicionais quantitativos da amostra NESG-72X evidenciam zoneamento composicional concêntrico no porfiroblasto de granada analisado, com X_{Grs} seguindo um padrão composicional centro–zona intermediária–borda de aproximadamente 0,04-0,02-0,05. Valores de X_{Alm} (0,74-0,77-0,73) e X_{Prp} (0,20-0,21-0,19) apresentam padrão concêntrico semelhante, porém opostos e com variações mais suaves. Valores de X_{Sps} apresentam um padrão distinto, com empobrecimento suave do centro para a borda do cristal (0,01 para 0,007). Cristais de feldspato potássico desta amostra apresentam composições compatíveis a sanidina/ortoclásio ($X_{San}=0,70-0,92$). Os porfiroblastos de granada da amostra NESG-72U analisados apresentam zoneamento concêntrico marcado pelo empobrecimento em X_{Grs} (0,41 para 0,30) e X_{Sps} (0,01 para <0,01) concomitante ao enriquecimento em X_{Alm} (0,44 para 0,51) e X_{Prp} (0,14 para 0,20) do núcleo para borda dos cristais. Cristais de plagioclásio na matriz apresentam valores de X_{An} entre 0,39 e 0,49, composições compatíveis a andesina. Alguns cristais de plagioclásio encontrados como inclusões em porfiroblastos de granada variam de labradorita a anortita, com valor médio de X_{An} ao redor de 0,77. Valores de X_{Mg} em anfibólio variam de 0,56 a 0,62. Diagramas de fases em equilíbrio e isopletras composicionais de granada e feldspato calculados para a amostra NESG-72X indicam condições entre 1000-1100°C e 19-31 kbar para o pico metamórfico (Fsp+Grt+Ky+Qtz+Rt+L) e condições retrometamórficas de 650-715°C e 8-9 kbar (Pl+Kfs+Ilm+Grt+Ms+Bt+Ky+Qtz). Para a amostra NESG-72U, o diagrama estima condições P-T de 800-1200°C e 12-24 kbar para a assembleia mineral de pico metamórfico (Cpx+Grt+Pl+Qtz+Rt+Ttn+L) e 625-750°C a 7,5-9,5 kbar para a assembleia retrometamórfica (Amp+Cpx+Grt+Pl+Bt+Qtz+Ttn), condições semelhantes às obtidas para a amostra NESG-72X. Trajetórias P-T estimadas para as rochas da NTPV nesse trabalho estão de acordo com trajetórias previamente reportadas na literatura. Entretanto, os

intervalos P-T estimados para as assembleias minerais de pico metamórfico não descartam a possibilidade dessas rochas terem sido submetidas a condições de alta a ultra-alta pressão.

ABSTRACT

The focus of this project lies in determining the pressure and temperature (P-T) conditions to which the granulitic metasedimentary rocks of the Três Pontas-Varginha Nappe (NTPV), located in the southernmost domain of the Brasília Orogen, were submitted. The recent identification of micro-coesite inclusions within garnet porphyroblasts indicates that these rocks underwent ultra-high-pressure (UHP) metamorphic conditions. This evidence, unprecedented in the literature, requires detailed thermodynamic modelling to identify possible records of ultra-high pressure P-T conditions in the main mineral assemblage of these rocks. For this purpose, two samples were selected: (i) rutile-kyanite-garnet-quartz-feldspar granulite (NESG-72X) and (ii) rutile-titanite-hornblende-garnet gneiss (NESG-72U). P-T paths were estimated for both samples through a combination of petrographic analysis using optical microscopy, spot chemical analyses and quantitative compositional mapping via EPMA coupled with thermodynamic modeling using the Theriak-Domino software. Quantitative compositional maps of sample NESG-72X reveal concentric compositional zoning in the analyzed garnet porphyroblast, with X_{Grs} following a core–mantle–rim compositional pattern of approximately 0.04-0.02-0.05. X_{Alm} values (0.74-0.77-0.73) and X_{Prp} values (0.20-0.21-0.19) show similar concentric patterns but are inversely related and exhibit smoother variations. X_{Sps} values show a distinct pattern, with a slight depletion from core to rim (0.01 to 0.007). Feldspar crystals in this sample exhibit compositions consistent with sanidine/orthoclase ($X_{\text{San}}=0.70-0.92$). The garnet porphyroblasts analyzed in sample NESG-72U exhibit concentric compositional zoning, characterized by a depletion in X_{Grs} (0.41 to 0.30) and X_{Sps} (0.01 to <0.01) accompanied by an enrichment in X_{Alm} (0.44 to 0.51) and X_{Prp} (0.14 to 0.20) from core to rim. Plagioclase crystals in the matrix exhibit X_{An} values ranging from 0.39 to 0.49, consistent with andesine compositions. Some plagioclase crystals found as inclusions within garnet porphyroblasts range from labradorite to anorthite, with an average X_{An} value around 0.77. X_{Mg} values in amphibole range from 0.56 to 0.62. Phase equilibria diagrams and compositional isopleths for garnet and feldspar calculated for sample NESG-72X indicate conditions of 1000–1100°C and 19–31 kbar for the metamorphic peak (Fsp+Grt+Ky+Qtz+Rt+L), and retrograde conditions of 650–715°C and 8–9 kbar (Pl+Kfs+Ilm+Grt+Ms+Bt+Ky+Qtz). For sample NESG-72U, the phase equilibria diagram estimates P-T conditions of 800–1200°C and 12–24 kbar for the peak metamorphic mineral assemblage (Cpx+Grt+Pl+Qtz+Rt+Ttn+L), and 625–750°C and 7.5–9.5 kbar for the retrograde assemblage (Amp+Cpx+Grt+Pl+Bt+Qtz+Ttn), conditions similar to those obtained for sample NESG-72X. The P-T paths estimated for the NTPV rocks in this study align with previously reported trajectories in the literature. However, the estimated P-T ranges for the peak metamorphic mineral assemblages do not rule out the possibility that these rocks experienced high- to ultra-high-pressure conditions.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	METAS E OBJETIVOS	1
3.	FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1	Extremo sul do orógeno Brasília	2
3.1.1	<i>Nappe Três Pontas-Varginha</i>	5
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	6
4.1	Mapeamento composicional quantitativo e <i>XMapTools</i>	7
4.2	Modelamento termodinâmico – Theriak-Domino	7
5.	RESULTADOS OBTIDOS	8
5.1	Petrografia	8
5.2	Mapeamento composicional (via <i>XMapTools</i>)	11
5.3	Modelagem termodinâmica direta	19
5.3.1	<i>Rutilo-cianita-granada-quartzo-feldspato granulito - NESG-72X</i>	19
5.3.2	<i>Rutilo-titanita-hornblenda-granada gnaiss - NESG-72U</i>	24
6.	DISCUSSÕES	26
7.	CONCLUSÕES	30
8.	REFERÊNCIAS	31
ANEXO I – Análises químicas pontuais (WDS)		

1. INTRODUÇÃO

Rochas metamórficas de ultra-alta pressão (*ultra-high pressure – UHP*), *i.e.*, metamorfisadas acima da reação quartzo-coesita, são importantes evidências de eventos de subducção profunda, trazendo implicações importantes acerca da evolução geodinâmica da Terra. Entretanto, a preservação destas rochas no registro geológico é rara, devido, principalmente, a reações de reequilíbrio durante sua exumação ou sobreposição de eventos metamórficos. A caracterização de rochas de ultra-alta pressão se dá pela presença de coesita (Chopin, 1984) ou microdiamante (Sobolev and Shatsky, 1990), tipicamente inclusos em granada ou zircão, podendo ocorrer em rochas metamáficas (Liu et al., 2008; Santos et al., 2015) ou metapelíticas (Caby, 1994; Schertl et al., 1991). Fraturas radiais em granada ao redor de inclusões de quartzo são microestruturas bem documentadas de rochas metamórficas de UHP e são interpretadas como resultado da transformação de coesita para quartzo- α durante descompressão, gerando uma expansão de volume positivo e consequentemente resultando em fraturas espacialmente bem distribuídas em padrão radial (Brown & Johnson, 2018; Whitney et al., 2000; Gillet et al., 1984).

Processos de subducção profunda são registrados desde o Cambriano através de rochas Fanerozoicas de UHP, no entanto, a descoberta de rochas Neoproterozoicas metamórficas máficas de origem continental contendo coesita (Caby, 1994, Gomes et al., 2023, Santos et al., 2015) permitem estender os processos geodinâmicos convergentes de subducção profunda para idades mais velhas. Registro de rochas metamorfisadas sob condições de UHP são raros no Brasil, sendo reportados no extremo-sul do Orógeno Brasília (Parkinson et al., 2001) e na Província Borborema (Gomes et al., 2023, Santos et al., 2015). Ocorrências ainda inéditas de micro-inclusões de coesita em granada foram identificadas em granulitos da Nappe Três Pontas-Varginha, no extremo sul do Orógeno Brasília (Campos Neto et al., 2024). Dados obtidos por modelagem termodinâmica e mapas composicionais quantitativos agregarão a novas evidências dos processos geodinâmicos vigentes durante a evolução tectônica dos orógenos colisionais do Neoproterozoico e serão comparados com os disponíveis na literatura para considerações relacionadas ao estágio de subducção na margem passiva do extremo sul do Orógeno Brasília.

2. METAS E OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo de duas amostras com coesita: (i) rutilo-cianita-granada-quartzo-feldspato granulito (NESG-72X) e (ii) rutilo-titanita-hornblenda-granada gnaiss (NESG-72U) da *Nappe* Três Pontas-Varginha com o intuito de:

i – Identificar registros composicionais preservados de metamorfismo de ultra-alta pressão em porfiroblastos de granada através de mapeamento composicional quantitativo de óxidos em wt% via microsonda eletrônica;

ii – Estimar as condições P-T do metamorfismo das rochas da NTPV através de modelamento termodinâmico combinado a isopletras composicionais de granada, K-feldspato e anfibólio realizado a partir das composições de rocha-total adquiridas previamente via FRX (Fluorescência de Raios X) e extração de composições médias locais em mapas composicionais quantitativos;

iii – Comparar os dados obtidos com os disponíveis na literatura, a fim de discutir as possíveis implicações geotectônicas dos resultados obtidos.

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Extremo sul do orógeno Brasília

O sistema de nappes do extremo sul do Orógeno Brasília resulta da colisão entre as paleoplacas São Francisco, representando uma margem passiva, e Paranapanema, uma margem ativa, durante o Ediacarano (Campos Neto et al., 2020; Trouw et al., 2013). Tal sistema é formado por uma pilha espessa de nappes de cavalgamento de diferentes graus metamórficos, transportadas para ENE e sub-paralelas a borda sul do cráton São Francisco (Campos Neto et al., 2011; Trouw et al., 2013) (**Fig. 1B**): (i) Nappe Socorro-Guaxupé, registro da raiz de um arco magmático continental criogeniano, (Campos Neto & Caby, 2000, 1999); (ii) Sistema de Nappes Andrelândia, depósitos de prisma acrescionário-*foreland*, (Campos Neto et al., 2011; Frugis et al., 2018; Kuster et al., 2020); (iii) Sistema de *Nappes* Carrancas, sequências metassedimentares tonianas de margem passiva, (Campos Neto et al., 2020, 2004; Marimon et al., 2020; Trouw et al., 2000; Westin et al., 2019); (iv) ortognaisses e sequência imatura metassedimentar de arco magmático juvenil do Paleoproterozóico (Cioffi et al., 2016b; Westin et al., 2016); (v) migmatitos e ortognaisses arqueano-paleoproterozóicos (Cioffi et al., 2016a; Oliveira et al., 2019). Unidades do tipo *foreland* encontram-se discordantes sobre o Sistema de Nappes Carrancas (Westin et al., 2019; Westin & Campos Neto, 2013).

Campos Neto & Caby, 1999); (iii) Unidade Metatexítica Paraderivada, constituída principalmente por migmatitos metassedimentares (Campos Neto & Caby, 2000; Rocha et al., 2017). O pico metamórfico para rochas das unidades basal e ortoderivada ocorreu sob ~900-1040°C e ~10-12 kbar, compatíveis com o ambiente tectônico de raiz profunda de arco magmático (Campos Neto & Caby, 2000; Del Lama et al., 2000; Garcia e Campos Neto, 2003; Reno et al., 2009; Rocha et al., 2017, 2018; Tedeschi et al., 2018). Migmatitos da unidade paraderivada registram pico metamórfico entre 750-950°C e pressão inferior a 10 kbar, delimitado pelo campo de estabilidade da silimanita (Martins et al., 2009).

O Sistema de Nappes Andrelândia (**Fig 1B**) compreende três alóctones de alta pressão em um padrão metamórfico invertido relacionados à um gradiente termal moderado aparente que diminui das nappes superiores (825°C/GPa) para as inferiores (650°C/GPa) (Motta & Moraes, 2017; Trouw et al., 2000; Campos Neto et al., 2024): Nappe Carmo da Cachoeira–Andrelândia (inferior), Nappe Liberdade (intermediário) e nappes Três Pontas–Varginha, Pouso Alto e *klippen* associadas (superior). O alóctone inferior (Carmo da Cachoeira - Andrelândia) é composto por uma pilha litoestratigráfica de metawackes, metapelitos e alternâncias metapelito-psamíticas que foram submetidas à um pico metamórfico de ~680°C e ~12 kbar (Campos Neto et al., 2007; Santos, 2004) e é subdividida em três unidades: (i) unidade basal Xisto Rio Capivari é composta por rochas metapelíticas pelágicas com predomínio de granada-cianita-muscovita-biotita xistos com esparsas intercalações de anfibolitos e quartzitos; (ii) unidade intermediária Xisto Santo Antônio (Trouw et al., 1983) caracterizada por metawackes, com intercalações esparsas e pouco espessas de rochas metapsamíticas e metamáficas (Campos Neto et al., 2007); (iii) unidade superior, Xisto Serra da Boa Vista definida, da base ao topo da unidade, por muscovita quartzitos e muscovita-quartzo xistos com lentes de ortoquartzitos que intercalam camadas de cianita-granada-muscovita-quartzo xisto porfiroblástico e gradam, em direção ao topo, para um cianita-granada-biotita-muscovita xisto porfiroblástico intercalado com camadas métricas de quartzito (Campos Neto et al., 2007, 2020; Frugis et al., 2018).

O alóctone intermediário (Liberdade) é dominado por rochas metapelíticas aluminosas com intercalações de metapsamitos e é assumido como o registro geológico de depósitos pelágicos de água profunda (Trouw et al., 2000; Campos Neto et al., 2020). Rutilo-(ilmenita-silimanita)-cianita-granada-plagioclásio-muscovita-biotita xistos porfiroblásticos são predominantes, com lentes subordinadas de gnaisses calciossilicáticos, anfibolitos, granada anfibolitos e clinopiroxênio-granada anfibolitos (retroeclogitos) (Campos Neto et al., 2007, 2020; Frugis et al., 2018). Amostras dos retroeclogitos (anfibolitos com relíquias de onfacita) registram condições metamórficas de 700°C e 17 kbar com idade de 680–670 Ma (Campos Neto & Caby, 1999; Coelho et al., 2017; Reno et al., 2009). O alóctone superior, caracterizado pela Nappe Três Pontas-Varginha, objeto de estudo desse trabalho (ver **item 3.1.1**), Nappe

Pouso Alto e *klippen* associadas, é composto por metapelitos e metawackes metamorfisados sob condições de fácies granulito de alta pressão.

Granulitos da Nappe Pouso Alto (NPA), análogas à rochas da Nappe Três Pontas-Varginha, atingiram condições metamórficas de 850-960°C e 12-16 kbar a partir de estudos utilizando modelagem termodinâmica, geotermômetros (Zr-em-rutilo, *Ti*-em-biotita, *Ti*-em-zircão) e termobarometria (Campos Neto et al., 2010; Campos Neto & Caby, 2000; Cioffi et al., 2012; Fumes et al., 2021; Li et al., 2021; Reno et al., 2009). Alternativamente, Campos Neto et al. (2004) reportam um caminho P-T de pico metamórfico em ca. 900-1000°C e 20kbar para um granulito da Nappe Pouso Alto. Através de modelagem termodinâmica, utilizando isopletras em granada e isomodas de minerais, Benetti et al. (2024) infere condições de ultra-alta temperatura (UHT) com pico metamórfico em ca. 1050-1150°C a 17-19 kbar para um granulito com cianita, k-feldspato, granada e rutilo.

O Sistema de Nappes Carrancas abrange uma sequência de alóctones e um domínio para-autóctone: (i) Nappe São Tomé das Letras (sul), (ii) Nappe Luminárias (intermediária); (iii) Nappe Carrancas (norte) e (iv) *thrust-and-fold belt* no domínio para-autóctone frontal; transportados para E-SE lateralmente à borda do cráton São Francisco (Trouw et al., 2000; Westin et al., 2019). O Grupo Carrancas (Trouw et al., 1980, 1983), que tem como área tipo a Nappe Carrancas, consiste em um sistema deposicional de margem passiva relacionado à borda sul do cráton São Francisco com idade máxima deposicional de ca. 920 Ma (Marimon et al., 2020; Ribeiro et al., 1990; Paciullo et al., 2000; Trouw et al., 2000; Campos Neto et al., 2004; Westin & Campos Neto et al., 2013; Valeriano et al., 2004; Westin et al., 2019). Nappes Luminárias e Carrancas registram condições metamórficas de alta pressão, com pico metamórfico estimado de 580–690 °C / 9–16 kbar por volta de 630–615 Ma para a Nappe Luminárias (Fumes et al., 2019) e 590-635 °C / 10-14 kbar (Silva, 2010; Westin et al., submetido) por volta de 600–580 Ma (Campos Neto et al., 2011; Valladares et al., 2004; Westin et al., 2021, submetido) para a Nappe Carrancas.

Depósitos sin-colisionais do tipo *foreland* (Unidade Metawacke) encontram-se discordantes sobre as unidade tectônicas principais descritas anteriormente, metamorfisados durante a migração do orógeno (Westin & Campos Neto, 2013; Frugis et al., 2018).

3.1.1 Nappe Três Pontas-Varginha

O litotipo predominante da Nappe Três Pontas-Varginha consiste em gnaisses formados por granada, cianita, K-feldspato e rutilo associados com leucossomas de granada granitos e granulitos máficos (granada, clino e ortopiroxênio) e granulitos calciossilicáticos (clinopiroxênio, granada e quartzo) em menores proporções (Campos Neto & Caby, 2000, 1999, Campos Neto et al., 2010). A presença de lineações minerais e de estiramento com caimento para W-SW definidas pela fábrica de forma de rutilo, cianita, muscovita e *ribbons* de quartzo são comuns, com direção de transporte para E-NE evidenciada por *boudins* e

porfiroclastos assimétricos e fábricas S-C de cisalhamento (Campos Neto & Caby, 2000). Gnaisses granulíticos da NTPV são interpretados como os equivalentes das unidades metassedimentares da Nappe Liberdade e Andrelândia submetidas a metamorfismo de fácies granulito (Cioffi et al., 2012; Garcia et al., 2004).

Condições P-T do pico metamórfico sob condições de fácies granulitos da NTPV foram reportadas em torno de 850°C e 15 kbar por meio de calibrações realizadas por termobarometria clássica (Campos Neto et al., 2010; Campos Neto & Caby, 2000, 1999; Del Lama et al., 2000; Garcia & Campos Neto, 2003; Motta & Moraes, 2017; Trouw et al., 1998), por modelamento termodinâmico (Li et al., 2021; Reno et al., 2009; Benetti et al., 2024) e termometria de Ti-em-zircão e Zr-em-rutilo (Campos Neto et al., 2024; Reno et al., 2009). Microinclusões de coesita, inclusões de agulhas de rutilo em rede e fraturas radiais ao redor de inclusões de quartzo e plagioclásio, todos em granada, possivelmente registram condições metamórficas de UHP (Campos Neto et al., 2024).

Campos Neto et al. (2024) argumentam que o início da colisão entre as placas Paranapanema e São Francisco, com subducção da crosta continental da placa São Francisco a profundidades mantélicas (metamorfismo UHP) teria ocorrido entre ca. 680 e 640 Ma. Os autores baseiam o modelo na ocorrência de sequências do tipo *flysh* depositadas sobre a margem passiva a partir de 680-640 Ma (Belém et al., 2011; Falci et al., 2018; Frugis et al., 2018; Manoel et al., 2022; Rocha et al., 2024; Trouw, 2008; Westin & Campos Neto, 2013), aliadas a idades entre 680-650 Ma obtidas em retroeclogitos (Campos Neto et al., 2011; Tedeschi et al., 2017) e nos granulitos da NPTV (Reno et al., 2012).

Zircões do tipo *soccer-ball* registram metamorfismo em fácies granulito e marcam o início da exumação da Nappe a partir de 625-620 Ma (Campos Neto et al., 2024), com descompressão isotérmica contínua até ca. 590 Ma atingindo 650 °C e 7 kbar (Campos Neto et al., 2010; Motta & Moraes, 2017; Reno et al., 2012).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Descrições petrográficas por microscopia óptica foram realizadas utilizando microscópio Zeiss Axioplan no Laboratório de Microscopia Petrográfica do Instituto de Geociências da USP (IGc-USP). Análises de química mineral e a aquisição de mapas composicionais quantitativos foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica da NAP-Geoanalítica do IGc-USP, utilizando equipamento JEOL JXA-FE-8530 com canhão eletrônico suportado por *Field Emission*. Os dados de química mineral (**ANEXO I**) e dos mapas composicionais foram processados e avaliados através do *software* de tratamento de imagens composicionais XMapTools (Lanari et al., 2014, 2019).

Análises de microsonda na amostra NESG-72X foram realizadas utilizando um *probe diameter* de 20µm e *dwell time* de 85ms com *step sizes* de 20µm. Para a NESG-72U, foi utilizado um *probe diameter* de 10µm com *dwell time* de 80ms e *step sizes* de 10µm. Para as

duas amostras foram utilizadas voltagem de 15kV e corrente de 100nA. Análises pontuais por WDS foram realizadas utilizando voltagem de 15kV, corrente de 20nA com spot de 5µm e *dwell time* de 20s para elementos maiores e 30s para elementos menores.

Diagramas de fase em equilíbrio das rochas da NPTV foram realizadas no sistema químico (Mn)NCKFMASHTO através do Theriak-Domino utilizando composições de rocha-total por FRX previamente adquiridas pelo co-orientador e extração de composições médias locais através de mapas composicionais quantitativos via XMapTools com a finalidade de estimar condições de P-T para os granulitos da NTPV.

4.1 Mapeamento composicional quantitativo e XMapTools

Mapeamento composicional quantitativo via microsonda eletrônica realizado em seções delgadas permitem a extração de composições mais próximas às originais, pois permite a seleção de áreas não afetadas por processos geológico secundários (e.g., intemperismo), procedimento muitas vezes inviável no caso de análises de fluorescência de raios-x em rocha total (Lanari & Engi, 2017). Além disso, o mapeamento composicional de áreas de interesse permite a identificação de variações composicionais em minerais que podem ser subestimadas se apenas análises pontuais em WDS em microsonda eletrônica forem realizadas.

A extração das composições minerais foi realizada utilizando o *software XMapTools* (Lanari et al., 2014, 2019), um programa gráfico baseado em MATLAB® com propósito fundamentado em análises químicas quantitativas de amostras geológicas. Através do *software*, variações composicionais e texturas complexas podem ser investigadas em mapas composicionais de alta resolução em escalas milimétricas e centimétricas. Mapas de intensidade de raios- X de elementos maiores, menores e traços são convertidos em concentração de óxidos wt% utilizando análises pontuais WDS como padrões internos. Como resultado final, o XMapTools permite gerar mapas de classificação mineral, de proporções de membros-finais e de composições de elementos químicos em cada fase mineral.

4.2 Modelamento termodinâmico – Theriak-Domino

O Theriak-Domino, pacote de *softwares* utilizado na etapa de modelamento termodinâmico, inclui diversos programas para cálculos termodinâmicos e plotagem de resultados em forma gráfica para uma dada composição de rocha-total. Dentre os programas que o pacote inclui, os principais são o Theriak e o Domino. O Theriak utiliza minimização da energia livre de Gibbs baseada em repetições lineares e não lineares para calcular associações minerais estáveis e as composições em equilíbrio a partir de uma composição de rocha total em condições de P-T previamente definidas (de Capitani & Brown, 1987). O Domino, por sua vez, é utilizado para calcular diagramas de fase em equilíbrio e isopletras

(e.g., composicionais e volume) baseado em propriedades termodinâmicas fornecidas em uma base de dados internamente consistente (de Capitani & Petrakakis, 2010).

Os modelos gerados pelo Theriak-Domino buscam representar de forma simplificada os diversos processos que ocorrem na natureza geológica, não sendo representações absolutas dos processos envolvidos. De qualquer modo, os diagramas desempenham um importante papel para estudos que busquem a combinação de modelos com outras ferramentas de investigação de processos metamórficos, como análise de química mineral, além de serem extremamente eficientes para estudos termodinâmicos (de Capitani & Petrakakis, 2010).

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Petrografia

A amostra NESG-72X corresponde a um rutilo-cianita-granada-quartzo-feldspato granulito porfiroblástico, textura grossa, com assembleia mineral principal definida por cianita (11%), granada (48%), quartzo (13%), rutilo (~5%) e K-feldspato (20%) (mesopertita). Biotita e clorita (~2%) estão presentes como fases retrometamórficas, substituindo parcialmente cristais de granada. Zircão, ilmenita e apatita são os principais minerais acessórios.

Cristais de cianita são subidioblásticos, orientados e, por vezes, deformados de acordo com a foliação principal, juntamente com quartzo e K-feldspato (**Fig 2A,B**), além de apresentarem ocasionalmente inclusões de rutilo, zircão e/ou ilmenita.

Cristais de granada são idioblásticos a subidioblásticos, centimétricos (até 1,5 cm), com inclusões de quartzo, plagioclásio, rutilo e ocasionalmente apatita. Inclusões de quartzo e rutilo do núcleo apresentam orientação oblíqua às inclusões dos mesmos minerais presentes na borda (**Fig 2C**). Na amostra analisada, inclusões de quartzo e rutilo marcam texturalmente a divisão entre núcleo e zona intermediária do porfiroblasto de granada (**Fig 2D**). Os porfiroblastos apresentam fraturas ao redor de diversas inclusões, entretanto, sendo as radiais comumente associadas a inclusões de quartzo (**Fig 2E-F**).

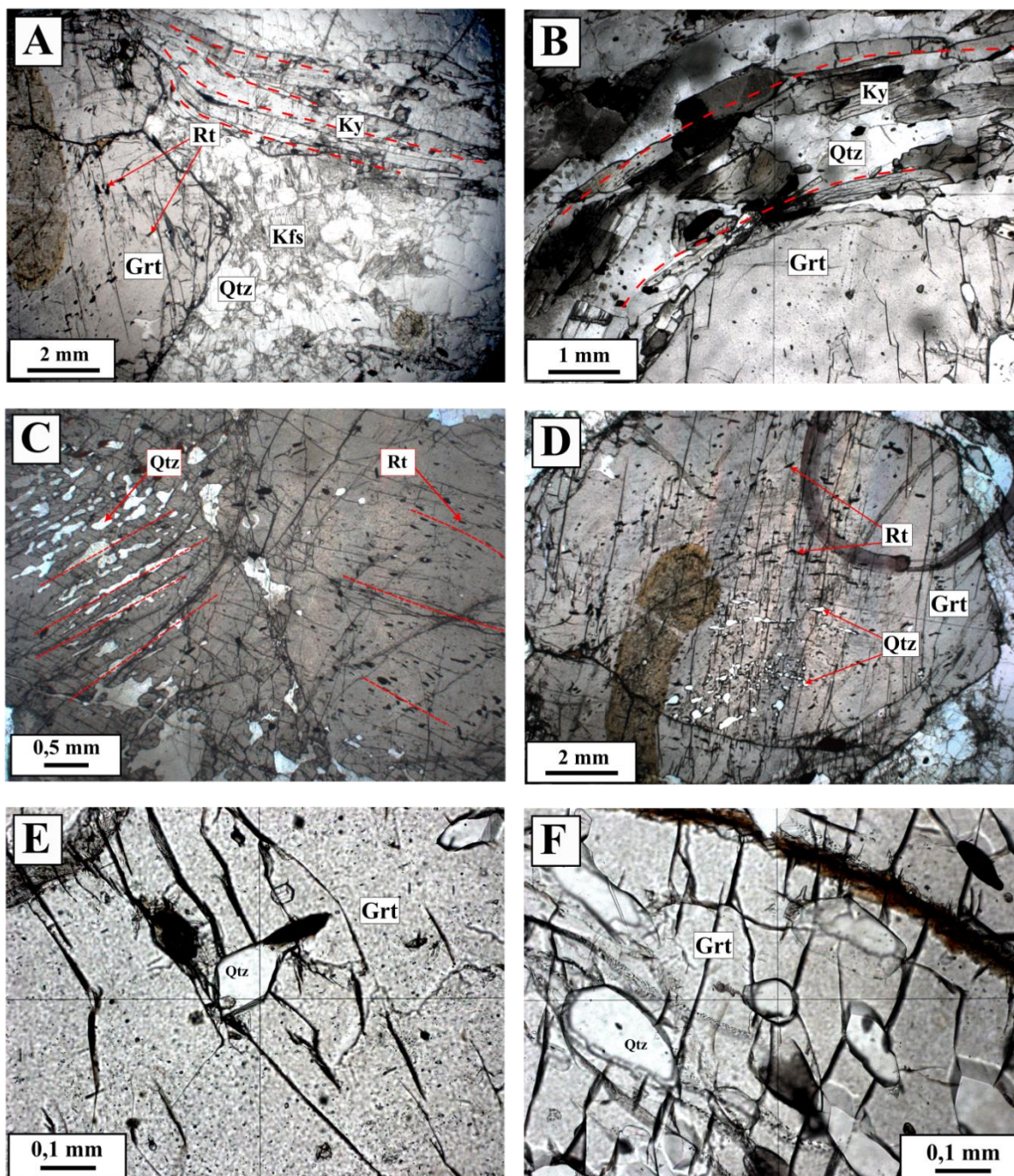


Figura 2 – Fotomicrografias da amostra NESG-72X (rutilo-cianita-granada-quartzo-feldspato granulito) **(A)** e **(B)** Aspecto geral da amostra com ênfase nos cristais orientados e deformados de cianita e porfiroblastos idio a subidioblásticos de granada. Linhas vermelhas tracejadas indicam foliação principal da rocha. **(C)** Porfiroblastos distintos com orientações discordantes de quartzo e rutilo. Linhas tracejadas vermelhas indicam foliação interna dos porfiroblastos. **(D)** Zoneamento textural entre inclusões de quartzo (núcleo) e rutilo (zona intermediária), com bordas relativamente livres de inclusões. **(E)** e **(F)** Fraturas em granada ao redor de grãos de quartzo.

A amostra NESG-72U, por sua vez, corresponde a um rutilo-titanita-hornblenda-granada gnaiss de textura porfiroblástica e granulação média a grossa. Sua mineralogia principal consiste em quartzo (8,5%), plagioclásio (33,5%), hornblenda (28,5%) e granada (25%) **(Fig 3A)** com titanita (3,1%), rutilo (0,3%), apatita (0,15%) e biotita retrometamórfica (0,9%) como minerais acessórios.

Os cristais de granada são porfiroblásticos de dimensões também centimétricas, assumindo formatos subidioblásticos a xenoblásticos (**Fig 3B**), apresentando inclusões de plagioclásio e quartzo, ameboides ou não, titanita e rutilo. Cristais de quartzo e feldspato na matriz estão presentes como algumas lentes contínuas, apresentando contato lobado e englobando cristais de hornblenda orientada e cristais de granada.

Titanita está presente tanto na matriz quanto como inclusões em granada, assumindo uma mesma orientação geral em ambos os casos e ocasionalmente com inclusões de rutilo (**Fig 3B,C**). Inclusões de quartzo e plagioclásio em granada estão comumente relacionadas a fraturas radiais (**Fig 3D,E**).

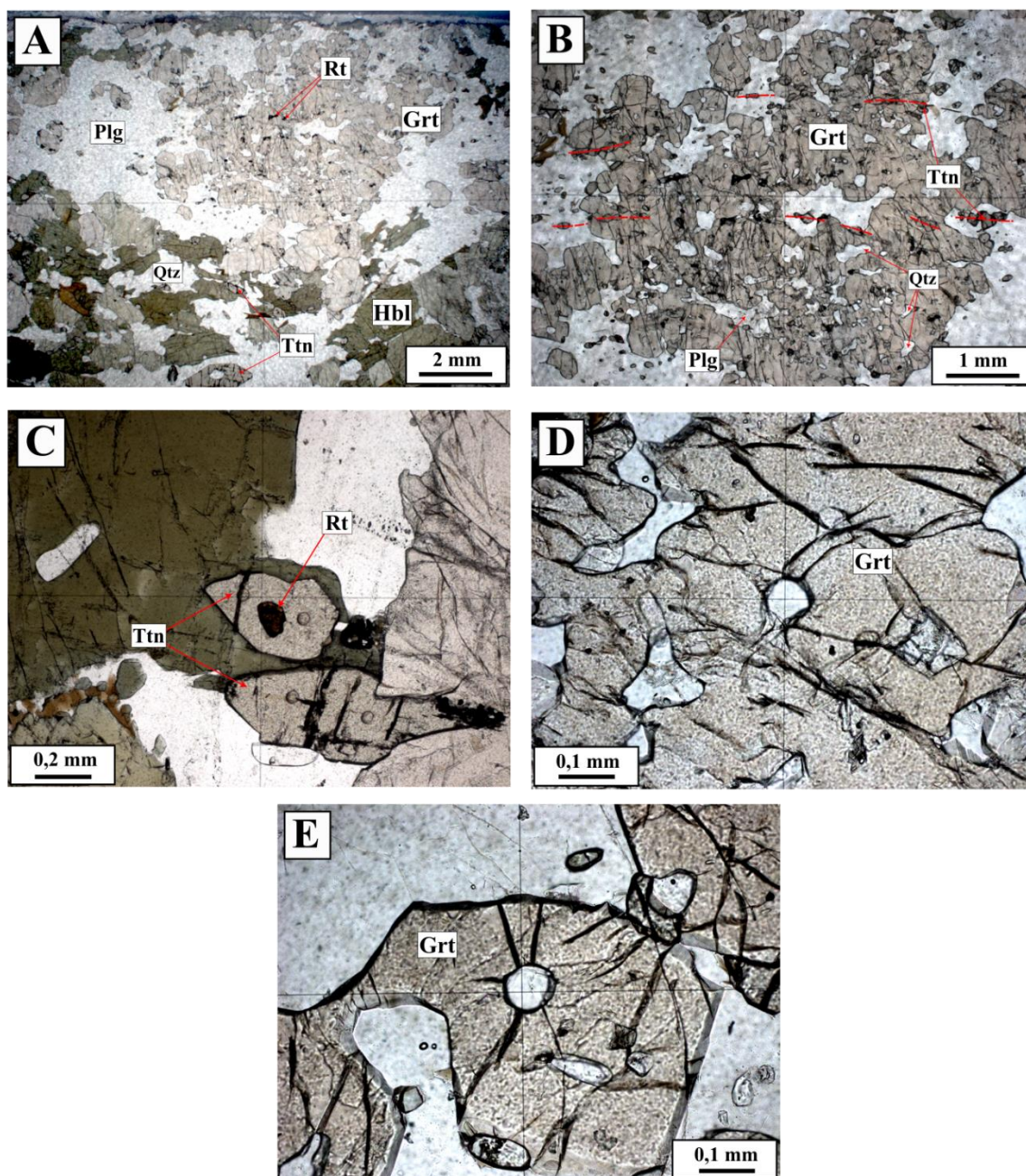


Figura 3 – Fotomicrografias da amostra NESG-72U (rutilo-titanita-hornblenda-granada granulito). **(A)** Aspecto geral da amostra NESG-72U e sua mineralogia essencial. **(B)** Cristais de titanita na matriz e como inclusões em

granada, com as linhas tracejadas vermelhas representando as orientações dos cristais. (C) Inclusão de rutilo em titanita. (D) e (E) Inclusões de quartzo com fraturas radiais.

5.2 Mapeamento composicional (via XMapTools)

O mapeamento composicional quantitativo das amostras foi realizado seguindo procedimentos descritos em Lanari e Piccoli (2020). Dois mapas foram obtidos: (i) NESG-72X - 621.960 *pixels* (825x730); (ii) NESG-72U - 722.892 *pixels* (1126 x 642).

No mapa de fases obtido para a amostra NESG-72X via XMapTools (**Fig 4**) observa-se as orientações oblíquas entre si das inclusões de rutilo e quartzo no núcleo e borda do porfiroblasto de granada. Adicionalmente, é possível identificar filmes de plagioclásio associados aos cristais de K-feldspato.

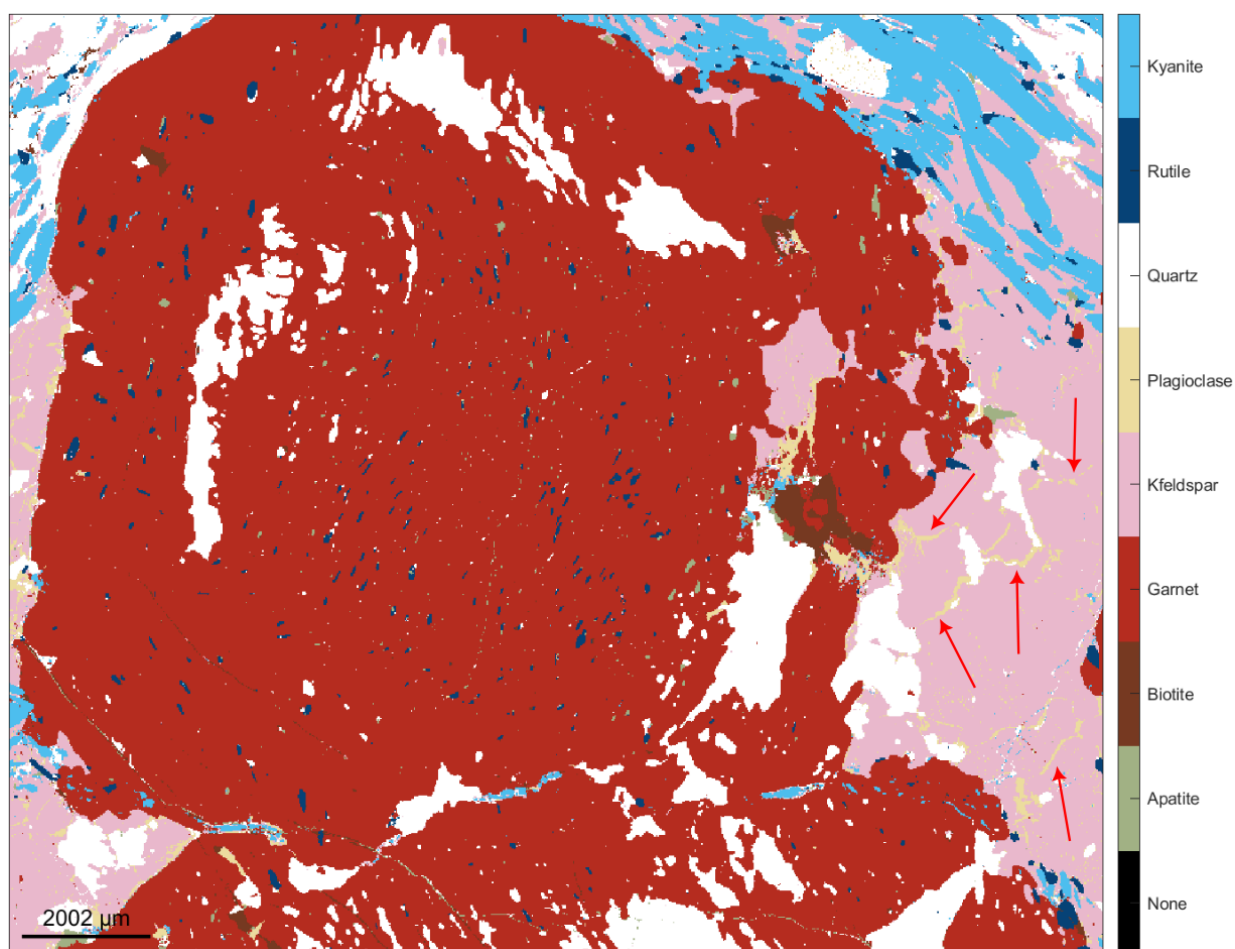


Figura 4 – Mapa de fases gerado via XMapTools para a área mapeada da amostra NESG-72X. Setas vermelhas indicam filmes de plagioclásio associados a K-feldspato na matriz.

Após a classificação das fases minerais e a padronização dos valores de óxidos em wt%, foram obtidos os mapas composicionais de granada (**Fig. 5A-D**).

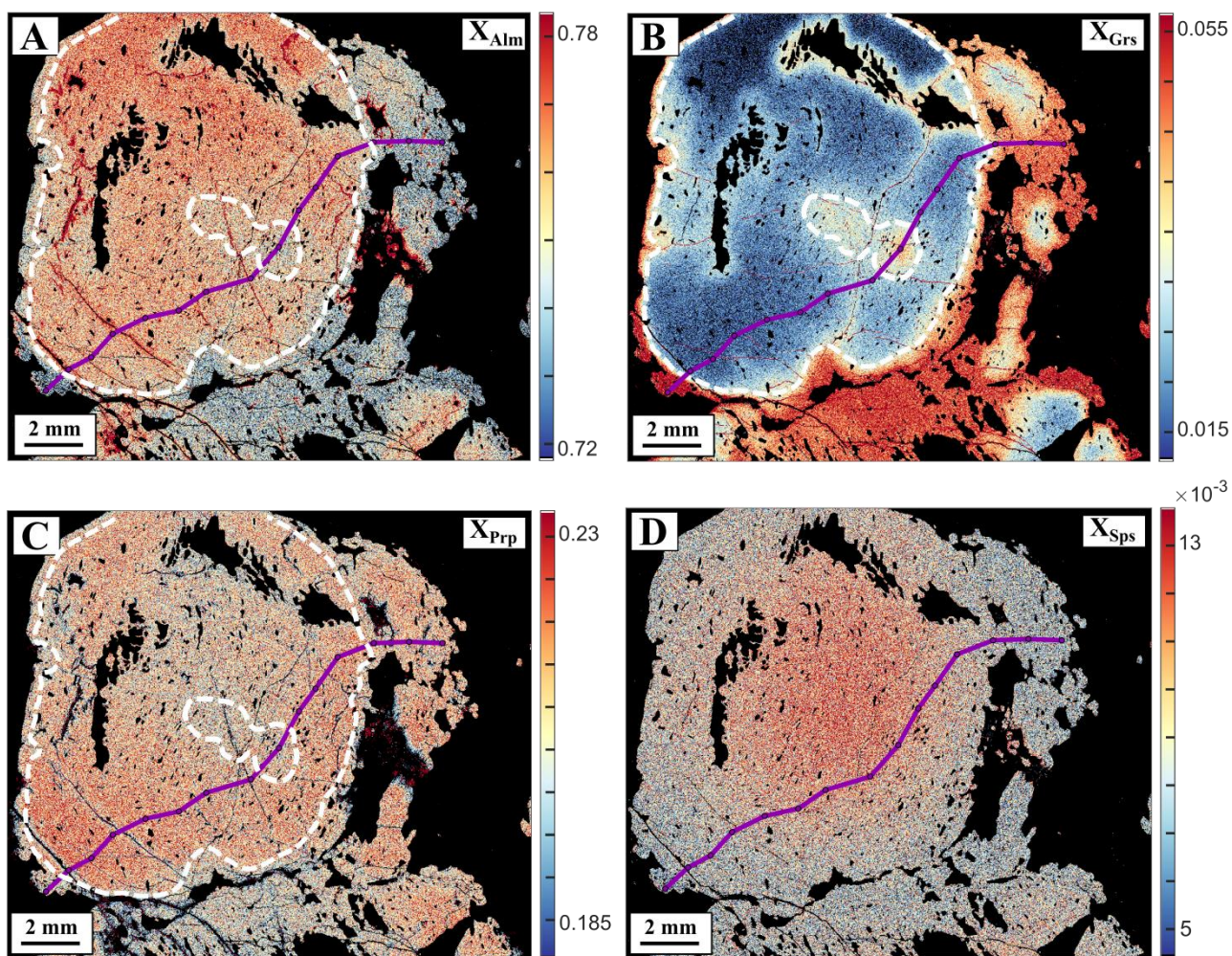


Figura 5 – Mapa composicional de porfiroblasto de granada da amostra NESG-72X. Linhas tracejadas brancas dividem centro, zona intermediária e borda do porfiroblasto. Linha roxa remete ao perfil da **Fig 6**. **(A)** Mapa composicional de X_{Alm} , membro-final de almandina. **(B)** Mapa composicional de X_{Grs} , membro-final de grossulária. **(C)** Mapa composicional de X_{Prp} , membro-final de piropo. **(D)** Mapa composicional de X_{Sps} , membro-final de espessartita.

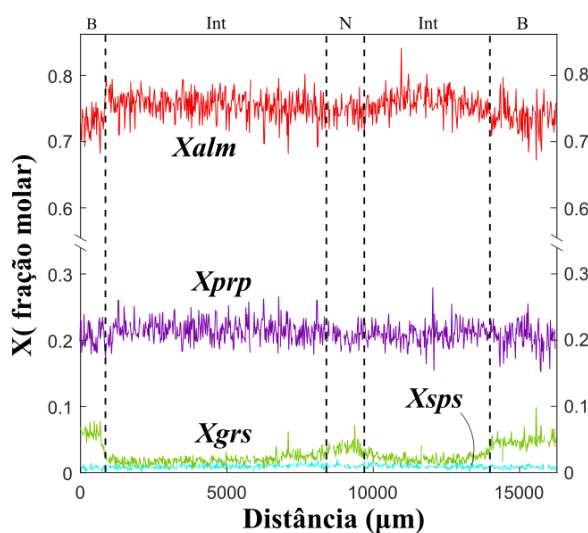


Figura 6 – Perfil composicional do porfiroblasto de granada da amostra NESG-72X, evidenciando o zoneamento de borda-zona intermediária e núcleo e o comportamento dos *endmembers*.

O porfiroblasto de granada é rico em almandina (**Fig. 6 e 7**) e apresenta zoneamento composicional concêntrico destacado nos mapas de X_{Alm} , X_{Grs} e X_{Sps} (**Fig. 5A-B e D**). O porfiroblasto maior apresenta um empobrecimento em X_{Grs} do núcleo para a zona intermediária do cristal (0,04 para 0,02), seguido de enriquecimento em X_{Grs} da zona intermediária para a borda (0,02 para 0,05) (**Fig. 5B**). Os cristais de granada menores registram apenas enriquecimento de X_{Grs} do núcleo para a borda do cristal. X_{Alm} e X_{Prp} apresentam padrão composicional núcleo-zona intermediária e zona intermediária-borda similar (X_{Alm} : 0,74 para 0,77 e 0,77 para 0,73; X_{Prp} : 0,20 para 0,21 e 0,21 para 0,19), apesar da variação ser mais suave (**Fig. 5A e 5B**). X_{Sps} apresenta padrão distinto, diminuindo do núcleo para a borda (0,01 para 0,007).

A extração da composição a partir do mapa permitiu o cálculo das fórmulas estruturais médias do centro, zona intermediária e borda do porfiroblasto com base em 12 oxigênios através da função de fórmula estrutural do XMapTools (**Tabela 1**).

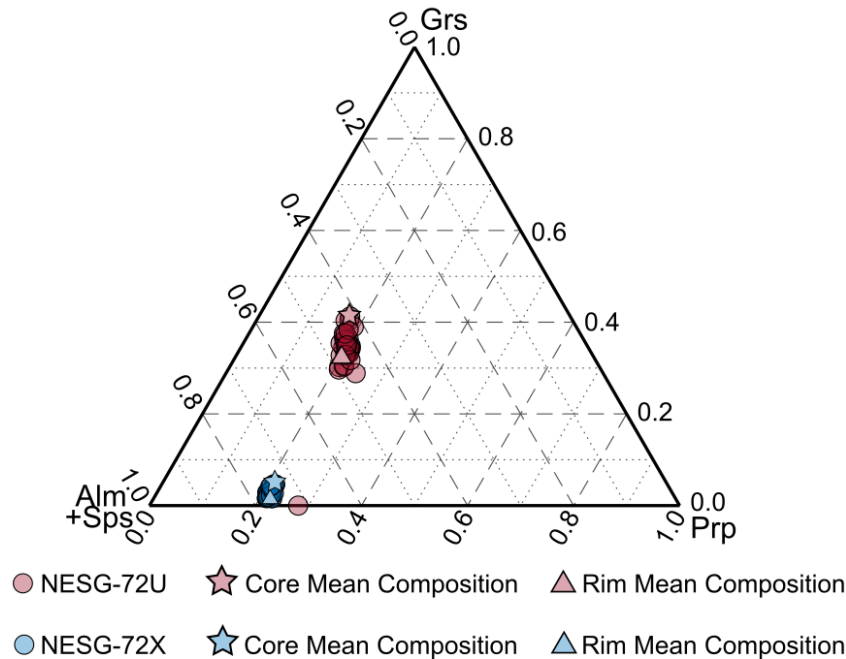


Figura 7 – Dados composicionais dos porfiroblastos de granada plotados com MinPlot (Walters, 2022). Composições médias de núcleo e bordas foram extraídas via XMapTools.

Granada	<i>Fórmula estrutural média – Grt (SF, 12-Ox. basis)</i>
Núcleo	(Fe _{2,24} Mg _{0,61} Ca _{0,12} Mn _{0,030}) Al _{2,03} Si _{2,96} O ₁₂
Intermediária	(Fe _{2,27} Mg _{0,63} Ca _{0,053} Mn _{0,031}) Al _{2,03} Si _{2,97} O ₁₂
Borda	(Fe _{2,23} Mg _{0,60} Ca _{0,16} Mn _{0,027}) Al _{2,02} Si _{2,95} O ₁₂

Tabela 1 – Fórmula estrutural média calculada com base em 12 oxigênios para o porfiroblasto de granada da amostra NESG-72X.

Cristais de feldspato potássico na matriz da amostra não apresentam variação composicional de núcleo e borda identificável e possuem composições compatíveis à ortoclásio (**Fig 8**).

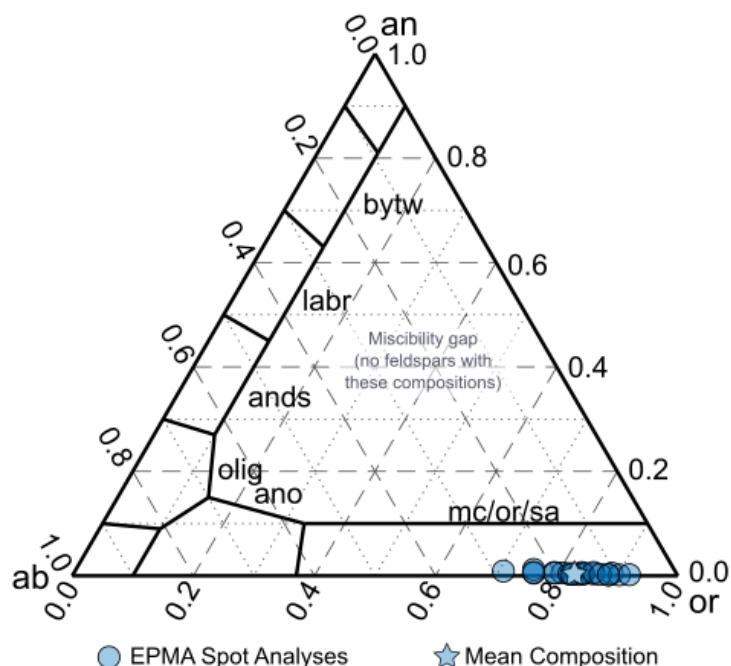


Figura 8 – Dados composicionais dos cristais de feldspato potássico presentes na matriz da amostra NESG-72X. Composição média corresponde à composição extraída do mapa composicional quantitativo.

O mapa de fases minerais gerado para a amostra NESG-72U (**Fig 9**) destaca os contatos lobados entre grãos de quartzo e plagioclásio, e filmes de plagioclásio que invadem cristais de granada e quartzo observados na microscopia óptica. Adicionalmente, a orientação dos cristais de titanita na matriz e inclusos no porfiroblasto de granada também é observada nos mapas de fases minerais.

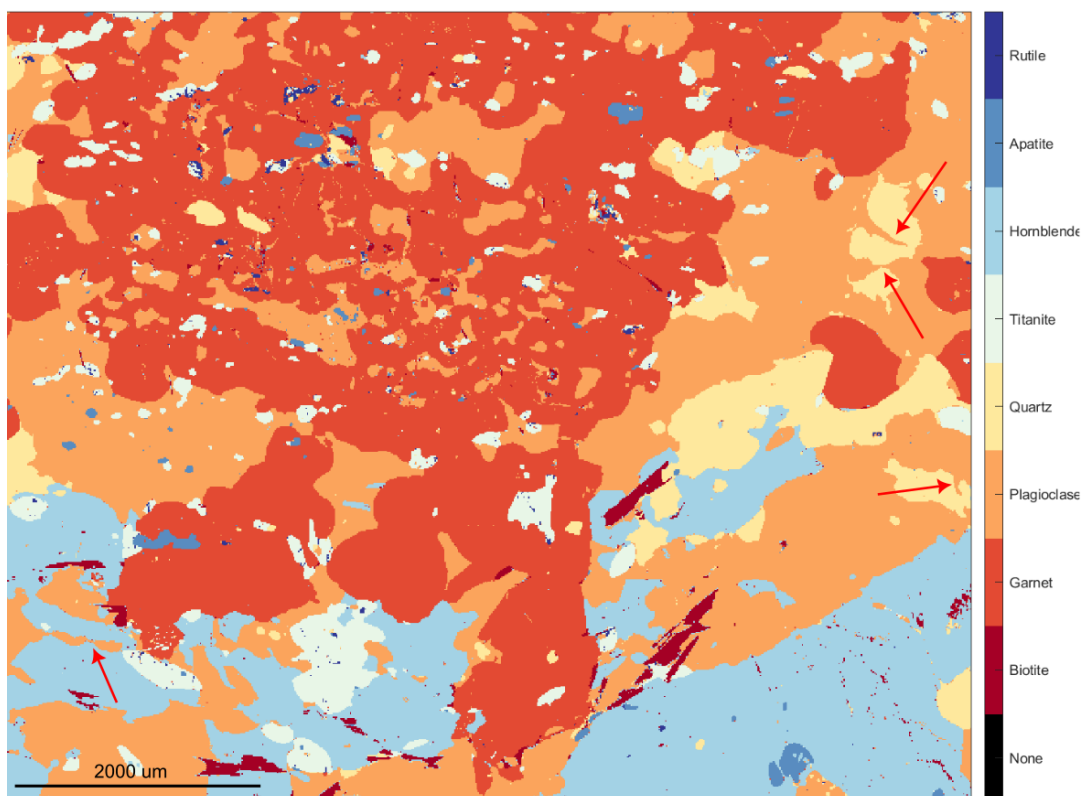


Figura 9 – Mapa de fases gerado via XMapTools para a área mapeada da amostra NESG-72U. Setas vermelhas destacam filmes de plagioclásio.

Os mapas composicionais (**Fig 10A-D**) indicam que os porfiroblastos xenoblásticos de granada são ricos em almandina (**Fig. 7 e 11**), com zoneamento composicional concêntrico marcado pelo enriquecimento de X_{Alm} (0,44 para 0,51) e de X_{Prp} (0,14 para 0,20) concomitante ao empobrecimento de X_{Grs} (0,41 para 0,30) e de X_{Sps} (0,01 para < 0,01) do núcleo para a borda do cristal.

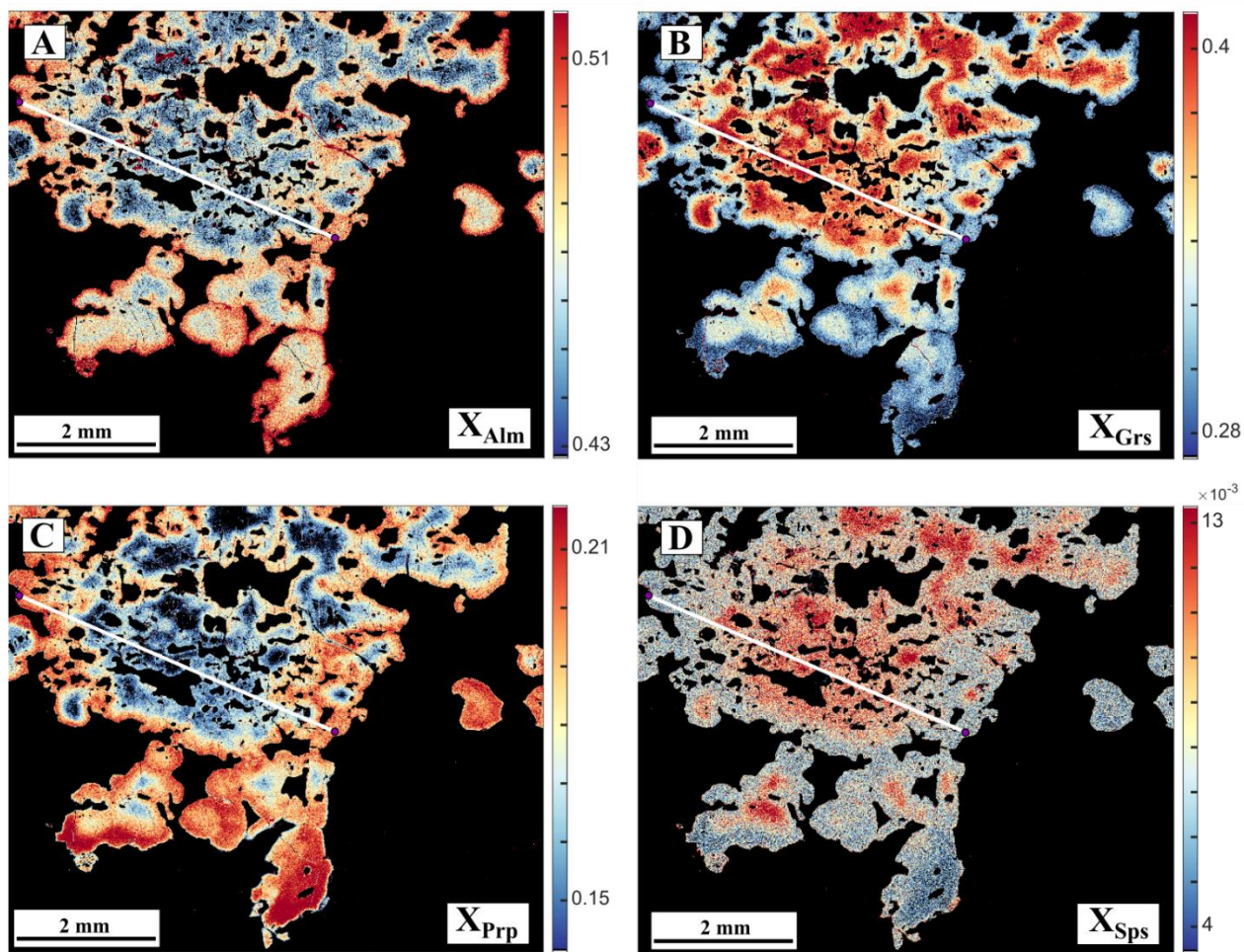


Figura 10 - Mapa composicional de porfiroblasto de granada da amostra NESG-72U. Linha branca remete ao perfil composicional da **Fig 11**. **(A)** Mapa composicional de X_{Alm} , membro-final de almandina. **(B)** Mapa composicional de X_{Grs} , membro-final de grossulária. **(C)** Mapa composicional de X_{Prp} , membro-final de piropo. **(D)** Mapa composicional de X_{Sps} , membro-final de espessartita.

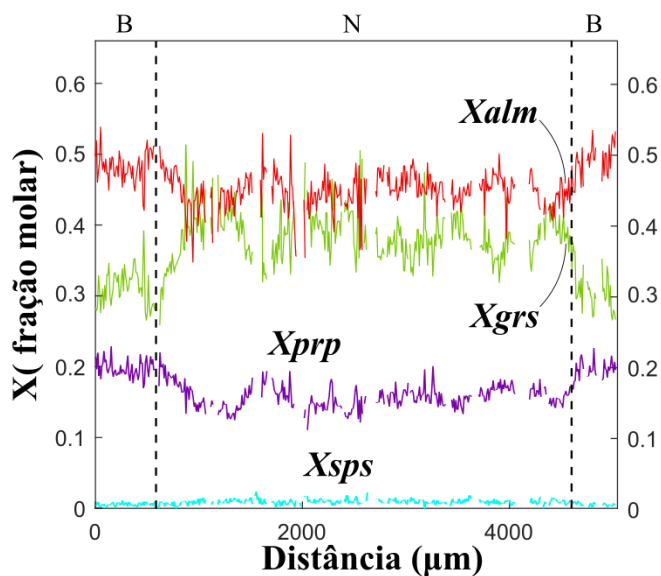


Figura 11 - Perfil composicional do porfiroblasto de granada da amostra NESG-72U, evidenciando o zoneamento de borda-núcleo e o comportamento dos *endmembers*.

Adicionalmente, o mapa composicional destaca as diferenças composicionais entre cristais de plagioclásio da matriz e aqueles inclusos em granada (**Fig 12**).

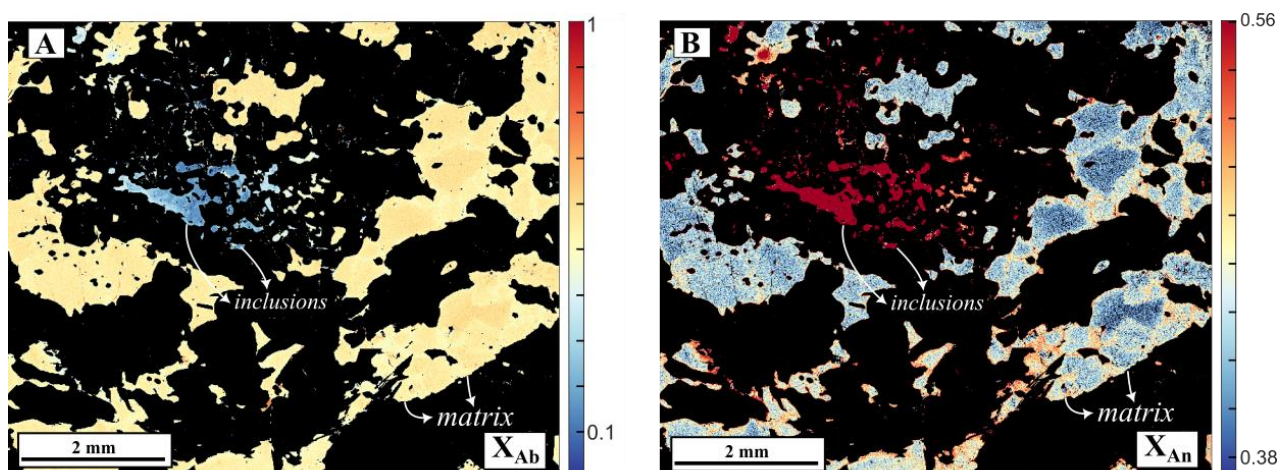


Figura 12 - Mapa composicional de plagioclásio da amostra NESG-72U. **(A)** Mapa composicional de X_{Ab} , membro-final de albita. **(B)** Mapa composicional de X_{An} , membro-final de anortita.

Os cristais de plagioclásio presentes na matriz são enriquecidos em X_{Ab} , com valores entre 0,49 e 0,59 e valores de X_{An} que variam de 0,39 para 0,49. Enquanto isso, os plagioclásios inclusos nos porfiroblastos de granada são ricos no membro-final de anortita (média 0,77). As diferenças composicionais são explicitadas no diagrama de classificação, com inclusões variando de labradorita a anortita, enquanto a maioria dos cristais da matriz se concentram no campo da andesina (**Fig. 13**).

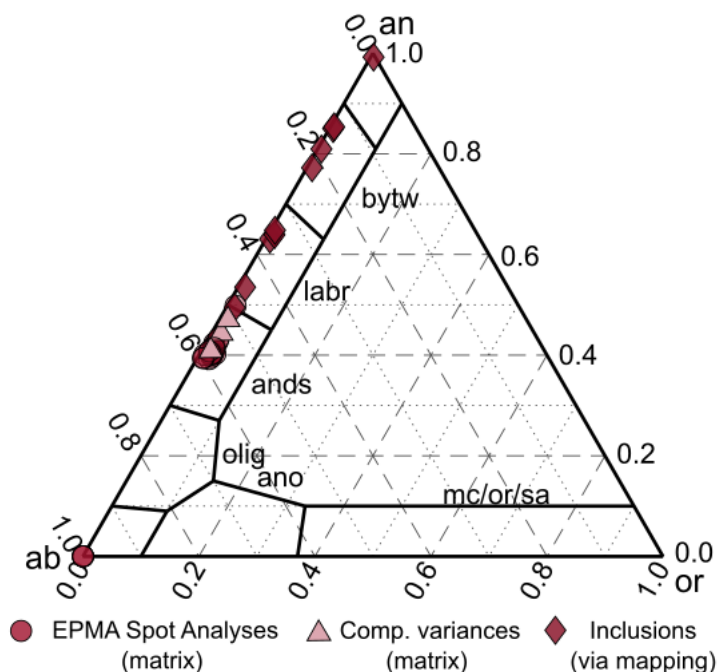


Figura 13 – Diagrama ternário de feldspatos com dados adquiridos via análises em microsonda eletrônica e extração de composição por mapeamento composicional quantitativo via XMapTools.

Os cristais de anfibólio da amostra NESG-72U possuem composição compatível a tschermakita (**Fig. 15**), com X_{Mg} variando de 0,56 a 0,62 (**Fig 14**), Si a.p.f.u. entre 5,90 e 6,04, CaO de 1,81 a 2,00 e NaO de 0,14 a 0,24.

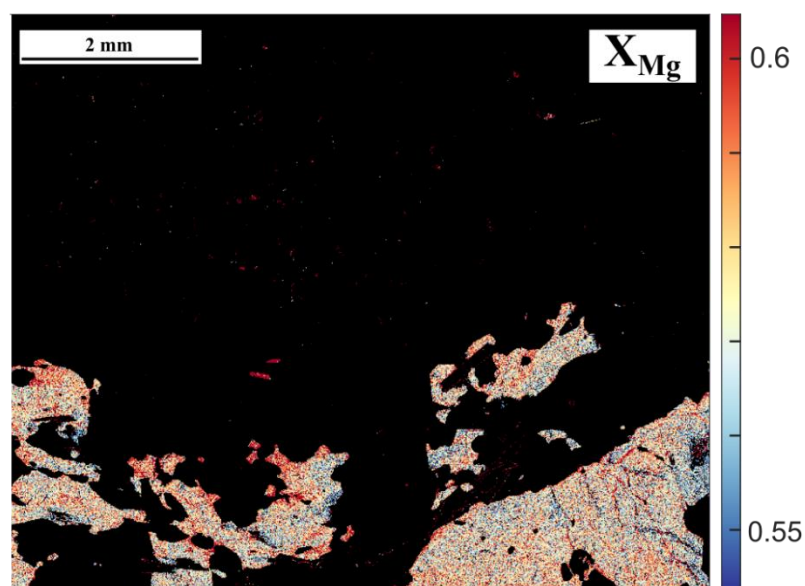


Figura 14 - Mapa composicional de X_{Mg} em anfibólio da amostra NESG-72U.

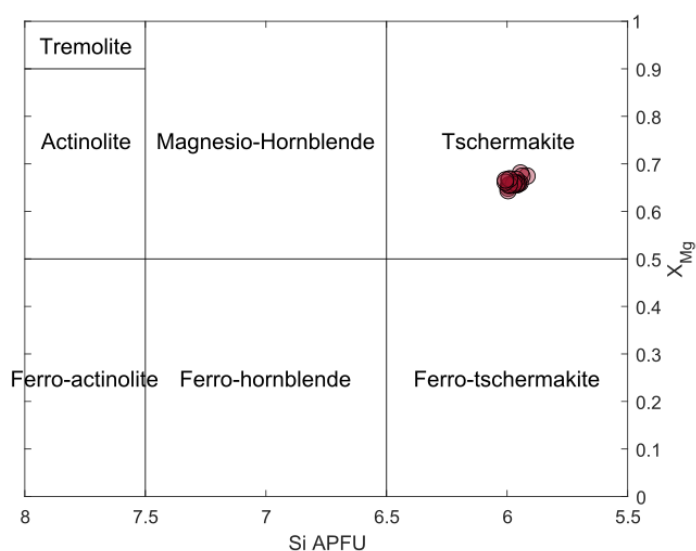


Figura 15 – Diagrama de classificação de anfibólios cálcicos (Leake et al., 1997) com dados de anfibólio extraídos via microsonda eletrônica.

A extração de composições a partir do mapa permitiu o cálculo das fórmulas estruturais médias do núcleo e borda do porfiroblasto de granada, cristais de plagioclásios na matriz e em inclusões e de anfibólio, com base em 12, 8 e 23 oxigênios, respectivamente, através da função de cálculo de fórmula estrutural do XMapTools (**Tabela 2**).

Granada	<i>Fórmula estrutural média – Grt (SF, 12-Ox. basis)</i>
Núcleo	(Fe _{2,99} Mg _{0,44} Ca _{1,28} Mn _{0,045}) Al _{1,83} Si _{2,99} O ₁₂
Borda	(Fe _{1,53} Mg _{0,65} Ca _{0,9} Mn _{0,017}) Al _{1,82} Si _{3,05} O ₁₂
Plagioclásio	<i>Fórmula estrutural média – Fsp (SF, 8-Ox. basis)</i>
Matriz	(Na _{0,61} Ca _{0,42}) Al _{1,20} Si _{2,72} O ₈
Inclusões	(Na _{0,28} Ca _{1,06}) Al _{1,52} Si _{2,24} O ₈
Anfibólio	<i>Fórmula estrutural média – CaAmp (SF, 23-Ox. basis)</i>
Média	Na _{0,38} K _{0,43} Ca _{1,84} Mg _{2,32} Fe ²⁺ _{1,32} Fe ³⁺ _{0,38} Ti _{0,19} Si _{5,94} Al _{2,05} O ₂₂ (OH)

Tabela 2 - Fórmulas estruturais médias calculadas com base em 12, 8 e 23 oxigênios para núcleo e borda dos porfiroblastos de granada, plagioclásios na matriz e inclusões e cristais de anfibólio, respectivamente, da amostra NESG-72U.

5.3 Modelagem termodinâmica direta

5.3.1 Rutilo-cianita-granada-quartzo-feldspato granulito - NESG-72X

Para reconstruir a trajetória P-T para a amostra NESG-72X, foram calculados diagramas de fases em equilíbrio para o sistema MnNCKFMASHTO utilizando o *software* Theriak-Domino. A composição de rocha-total via Fluorescência de Raios-X (FRX) foi utilizada para o modelamento sem prejuízos ao resultado final devido a relativa homogeneidade do litotipo. O mapeamento composicional dessa amostra teve como foco a extração da composição de diferentes zonas de crescimento de um porfiroblasto centimétrico de granada. Os diagramas foram calculados utilizando o banco de dados TC55 (Holland & Powell, 1998 e atualizações), considerando as seguintes soluções sólidas: granada, mica branca (Holland & Powell, 1998); feldspato (Baldwin et al., 2005); biotita e líquido/*melt* (White et al., 2007) e a solução ideal de ilmenita.

A quantidade de água foi estabelecida a partir do cálculo de um diagrama binário T-X com P fixa em 10 kbar e quartzo em excesso (**Fig 16**). Considerando o comportamento da curva *solidus*, que se estabiliza em ca. 700°C, e no campo de estabilidade da paragênese de pico metamórfico (Kfs+Grt+Ky+Rt+Qtz+Melt), determinou-se um valor de 1.13 wt% de H₂O (0.125mol de H).

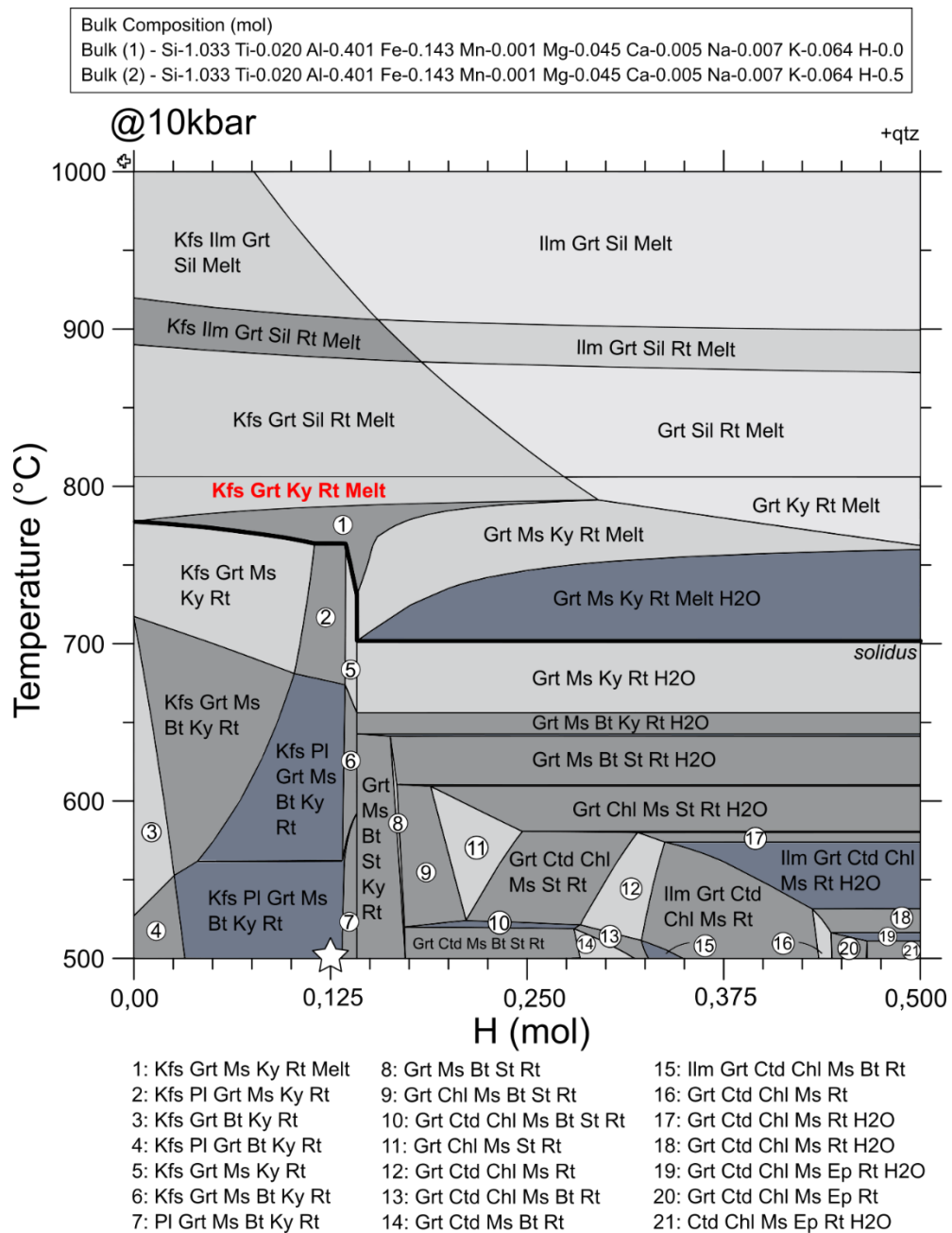


Figura 16 - Diagrama binário T-X com P fixa a 10 kbar para a amostra NESG-72X. Quartzo é considerado como uma fase em excesso. Assembleia em letras vermelhas indica a assembleia estimada de pico metamórfico. Estrela indica valor de H em mol utilizado para o cálculo dos diagramas de fase em equilíbrio.

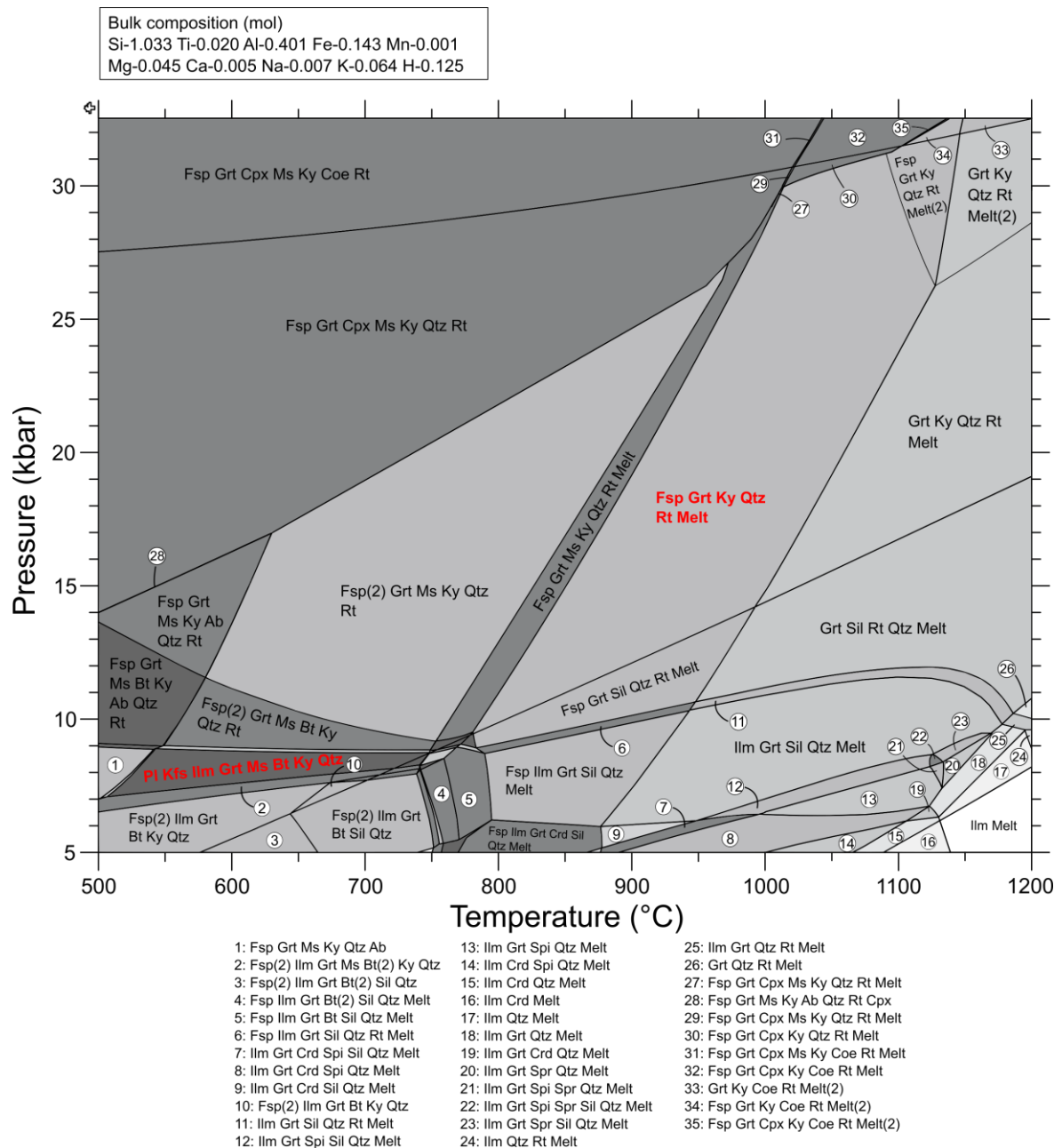


Figura 17 – Diagrama de fase em equilíbrio no sistema MnNCKFMASHTO para a amostra NESG-72X. Assembleias em vermelho indicam paragéneses de pico metamórfico e fase retrógrada.

A paragénese inferida (Qtz + Fsp + Grt-intermediária + Ky + Rt + Melt) foi estimada pelo modelo como um campo hexavariante entre ca. 800-1100°C e 9-31 kbar, delimitado pela reação *Ms-out* em temperaturas ca. 800°C, por *Ky-in* em menores pressões e *Cpx-in* em maiores pressões (**Figs. 17 e 18**). Valores de X_{Grs} e X_{Prp} da zona intermediária do porfiroblasto de granada e X_{San} em feldspato potássico utilizados para restringir o campo de estabilidade do pico metamórfico inferido. A intersecção das isopletras com o campo de estabilidade da paragénese de pico metamórfico restringe as condições P-T em aproximadamente de 1000-1100°C e ca. 19-31 kbar.

A assembleia mineral retrometamórfica (Pl + Kfs + Ilm + Grt-borda + Ms + Bt + Ky + Qtz) é estimada pelo modelo como um campo octavariante entre 500-750°C e 7-9 kbar,

delimitado pela reação de *Rt-in* em seu limite superior e por *Ms-out* em seu limite inferior. A reação de *Bt-out* limita o campo em temperaturas menores que 750°C. Valores de X_{Grs} , X_{Prp} , X_{Alm} e X_{Sps} da borda do porfiroblasto de granada restringem as condições P-T retrometamórficas em ca. 650-715°C e 8-9 kbar.

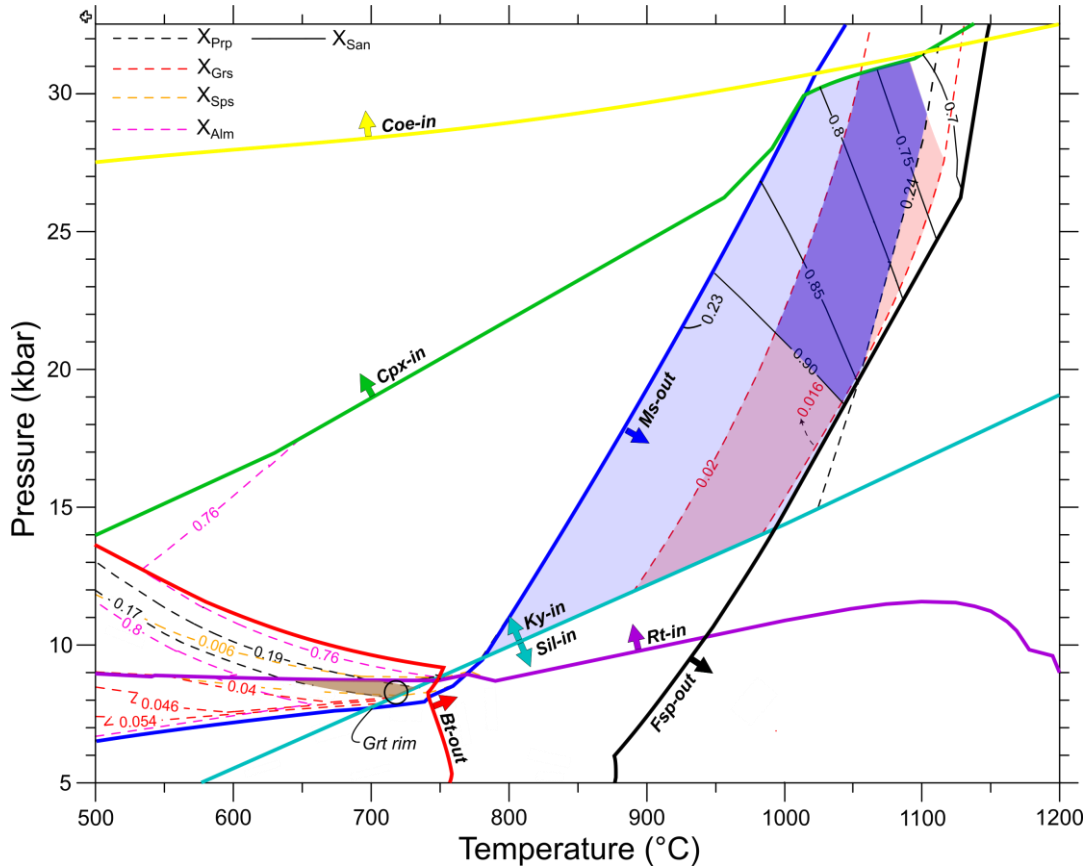


Figura 18 – Grade P-T com isopletas de granada (X_{Grs} , X_{Prp} , X_{Sps} e X_{Alm}) e feldspato (X_{San}) e curvas de estabilidade mineral, explicitando a sobreposição de isopletas e campos de estabilidade de pico (lilás) e de retrometamorfismo (laranja).

A reintegração de *melt* na composição residual foi realizada para a estimativa da trajetória P-T progressiva (White et al., 2004), utilizando a técnica *single step melt reintegration* descrita em Bartoli (2017), através da reintegração de 25mol% de *melt* na composição. A composição do *melt* reintegrado foi obtida através do software Theriak para condições aproximadas às do pico metamórfico (Groppo et al., 2013) de 950°C e 15 kbar e está demonstrada na **Tabela 3**.

(wt%)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O
Melt composition	62,85	1,22	19,04	8,43	0,08	1,46	0,31	0,31	4,37	1,93
NESG-72X (FRX)	62,07	1,53	20,45	10,25	0,09	1,80	0,30	0,21	3,01	1,13
NESG-72U (XMapTools)	48,86	2,21	17,77	11,95	0,17	4,43	11,48	2,00	0,68	0,45

Tabela 3 – Composição de *melt* utilizada para a reintegração extraída em 950°C a 15 kbar e composições utilizadas para os diagramas de fase em equilíbrio das amostras NESG-72X e NESG-72U.

O diagrama de fases em equilíbrio obtido com 25mol% de *melt* reintegrado (**Fig 19**), combinado aos valores de X_{Grs} , X_{Prp} e X_{Alm} do núcleo do porfiroblasto de granada (**Fig 20**), estima condições de ca. 750°C e 9 kbar para o metamorfismo progressivo, próximas às condições obtidas para o estágio retrometamórfico (**Fig 18**).

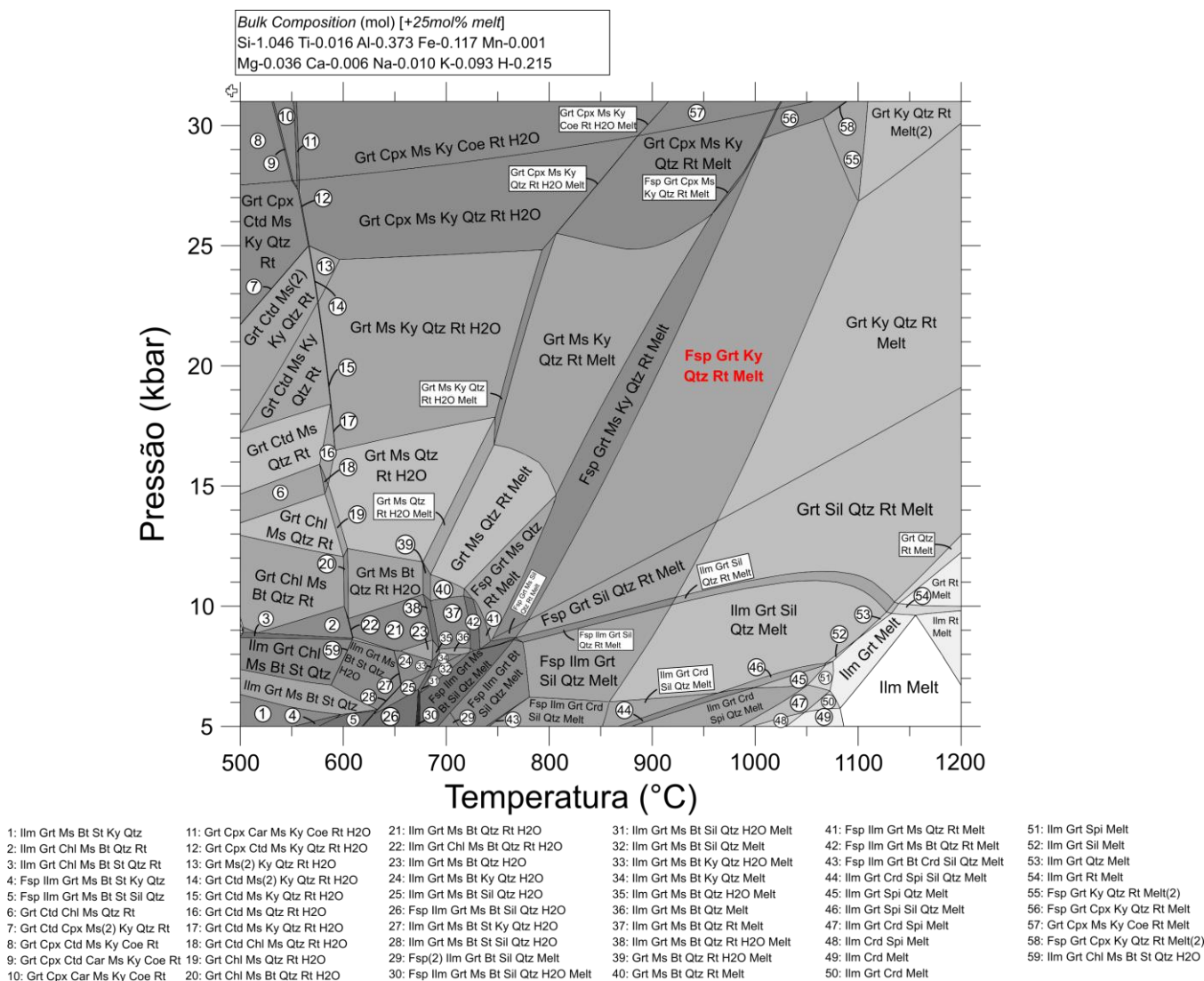


Figura 19 – Diagrama de fases em equilíbrio no sistema MnNCKFMASHTO para a amostra NESG-72X com 25mol% *melt* reintegrado.

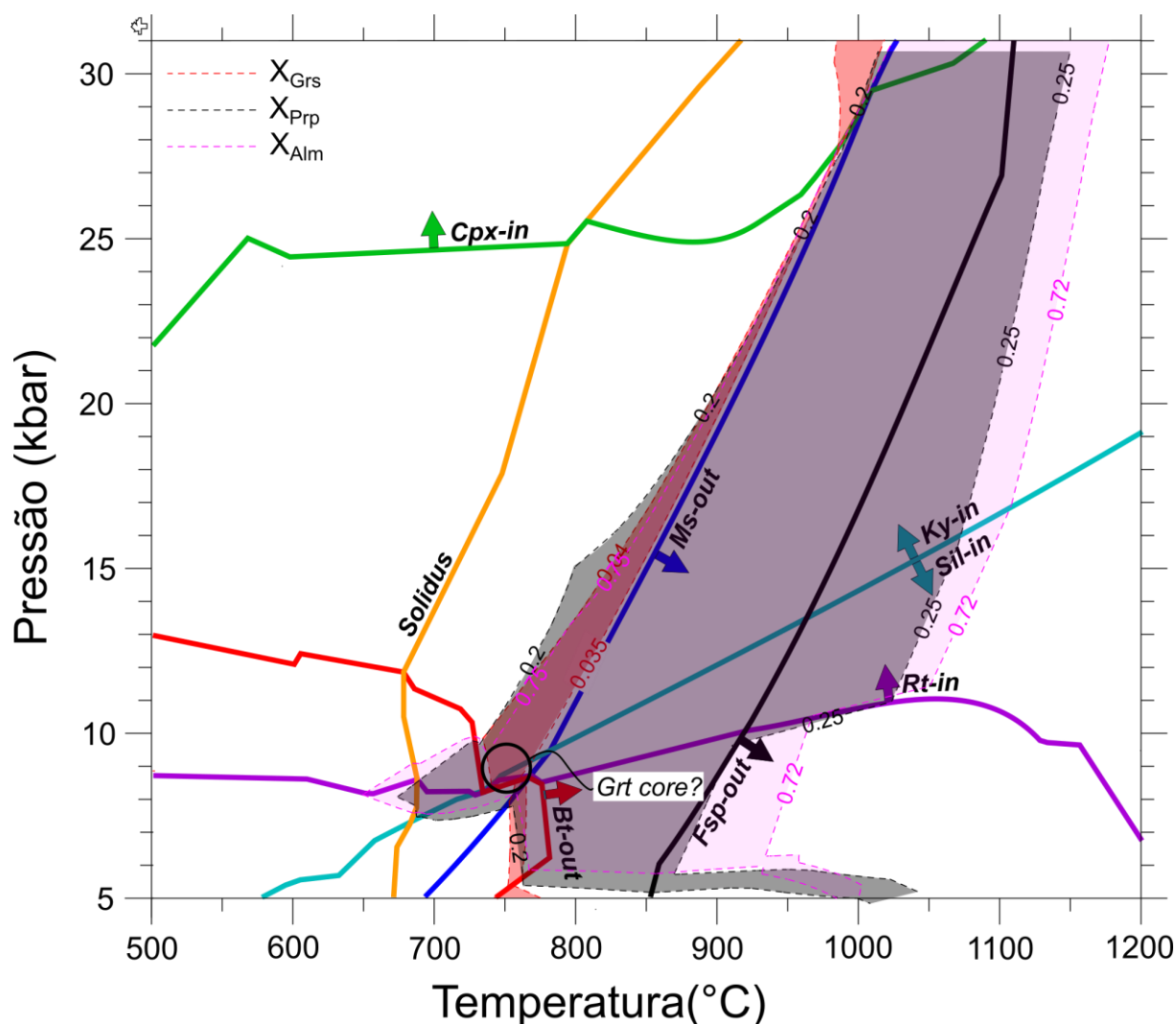


Figura 20 – Sobreposição de isopletas de granada (grossulária, almandina e piropo) representativas do núcleo de granada nos mapas composicionais e possível condição de protólito.

5.3.2 Rutilo-titanita-hornblenda-granada gnaiss – NESG-72U

O diagrama de fases em equilíbrio para a amostra NESG-72U foi calculado para o sistema NCKFMASHTO através do *software* Theriak-Domino (**Fig 21**). A composição utilizada na modelagem corresponde à composição média local (*local bulk composition*) extraída do mapa composicional quantitativo via *software* XMapTools, considerada a mais adequada para a modelagem termodinâmica desta amostra. O banco de dados ds62 (Holland & Powell, 2011) foi utilizado para os cálculos, assim como as seguintes soluções sólidas: clinopiroxênio, anfibólio e líquido (Green et al., 2016); ortopiroxênio, granada, ilmenita e biotita (White et al., 2014); olivina e epidoto (Holland & Powell, 2011); feldspatos (Holland & Powell, 2003); e espinélio (incluindo magnetita) (White et al., 2002). Um valor ordinário de $X_{Fe^{3+}}$ de 0,1 (Diener & Powell, 2010) foi considerado para os cálculos (segundo $O = 0,0083$). O conteúdo de H_2O utilizado foi obtido através da análise FRX da rocha ($LOI = 0,44\text{wt\%}$) pois o baixo conteúdo de água indicado pelos diagramas binários T-X ($\sim 0,23\text{ wt\%}$) calculados a partir da composição

média local inibiam o aparecimento das assembleias minerais observadas no litotipo nos diagramas calculados.

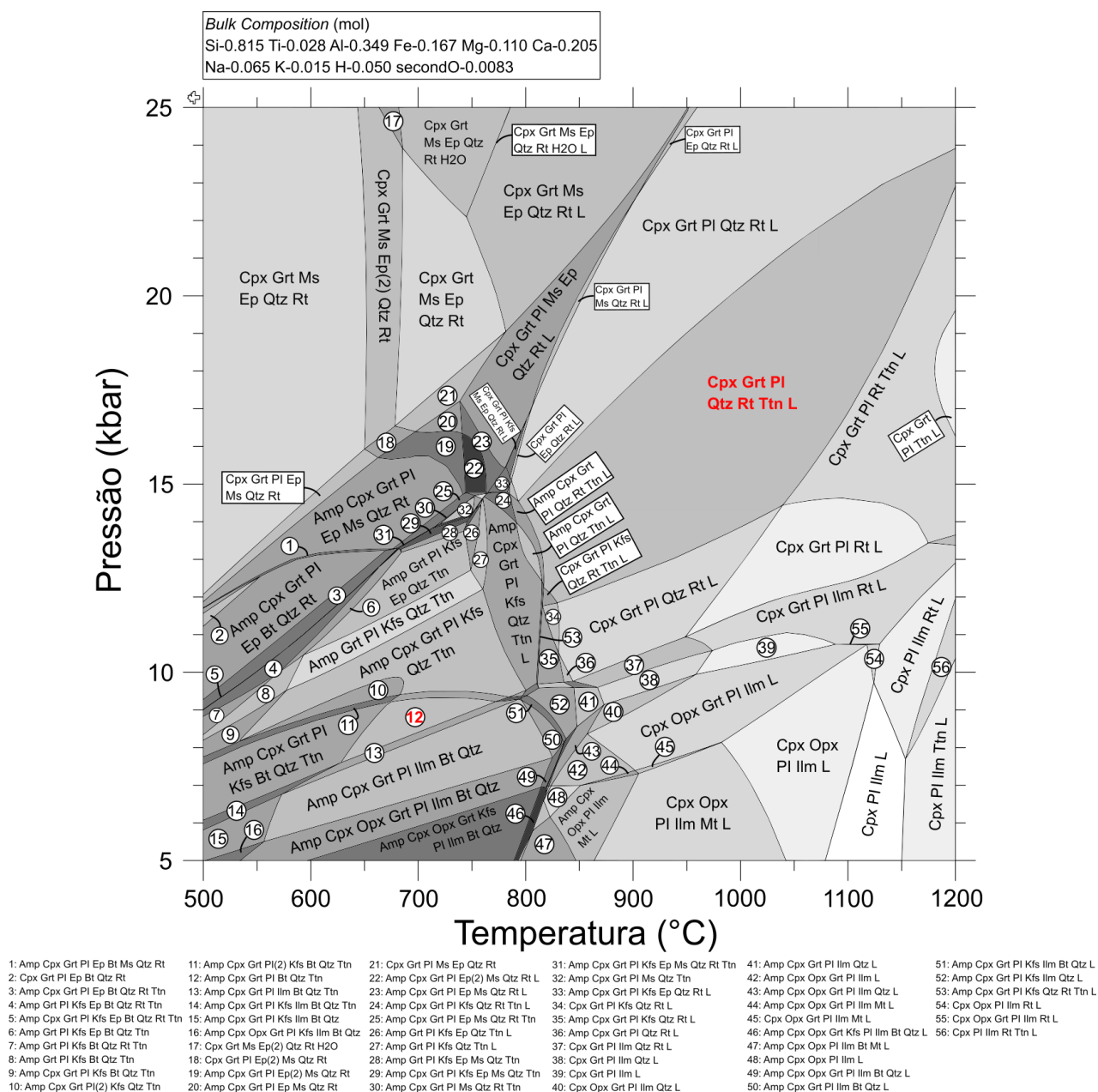


Figura 21 – Diagrama de fases em equilíbrio para o sistema NCKFMASHTO para a amostra NESG-72U. Assembleias de pico metamórfico e retrometamorfismo destacadas em vermelho.

A estabilidade da assembleia de pico metamórfico (Grt+PI+Qtz+Rt+Ttn+Cpx+L), prevista como um campo heptavariante estável entre 800-1200°C e 12-24 kbar. Apesar da amostra analisada não apresentar clinopiroxênio, a presença desse mineral na assembleia do pico metamórfico é reportada na literatura (Campos Neto & Caby, 1999). A estabilidade da assembleia mineral em equilíbrio no retrometamorfismo (Amp+Cpx+Grt+PI+Bt+Qtz+Ttn) é estimada entre 630-750°C e 7-9 kbar. Valores de X_{Grs} , X_{Prp} e X_{Alm} do núcleo e borda dos porfiroblastos de granada são compatíveis tanto com o campo de estabilidade da assembleia mineral de pico quanto com o campo de estabilidade da assembleia retrometamórfica (**Fig**

22). Isopletas de X_{Mg} em anfibólio calculadas para esta amostra restringem as condições metamórficas em 625-750°C em ca. 7,5-9,5 kbar. Valores de X_{An} em plagioclásios da matriz também são compatíveis com o campo de estabilidade da assembleia de pico e com o campo de assembleia retrometamórfica.

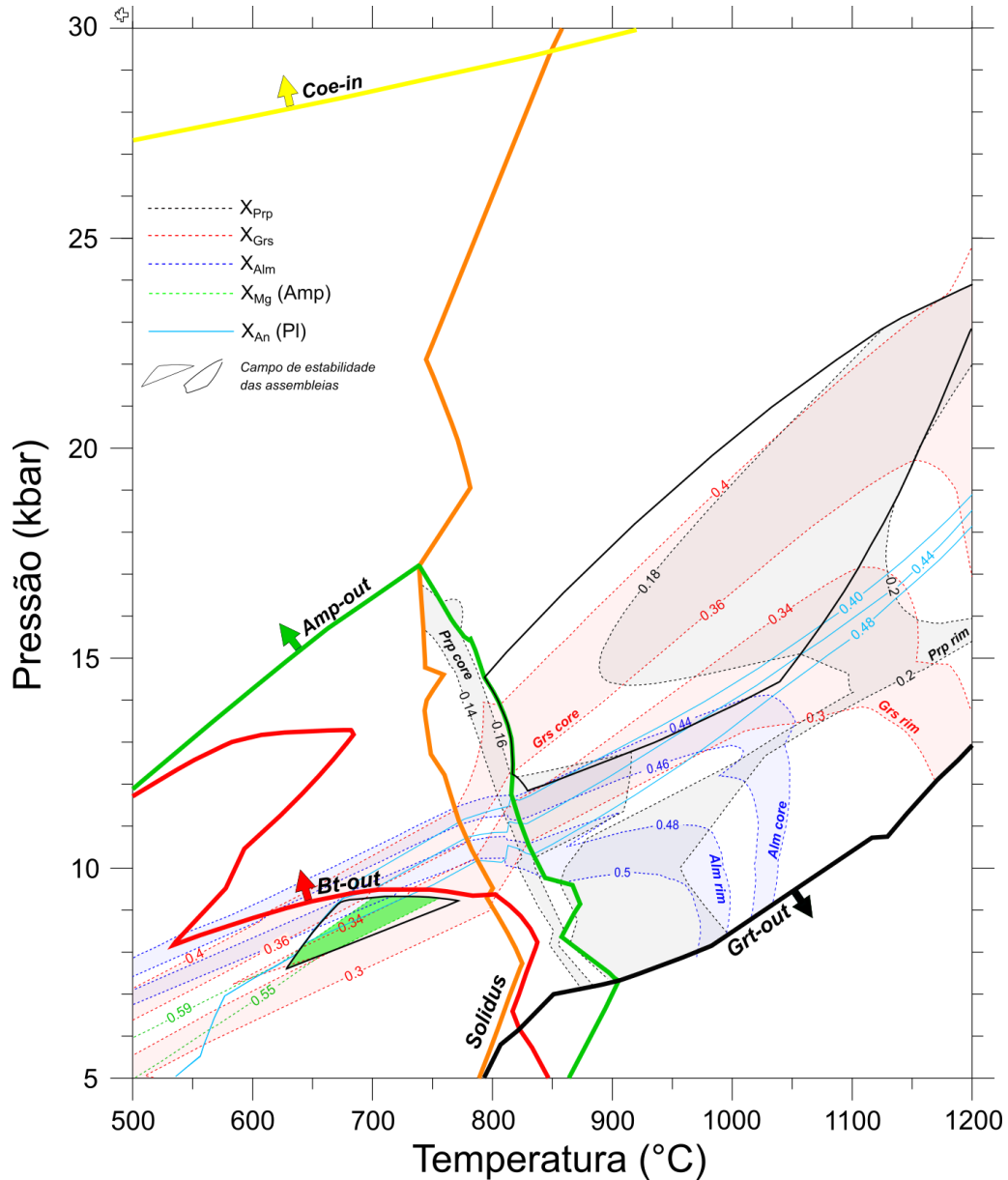


Figura 22 - Sobreposição de isopletras de granada (grossulária, almandina e piropo) e X_{Mg} em anfibólio nos campos de estabilidade de pico e retrometamórfico.

6. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através de modelagem termodinâmica direta para a amostra do rutilo-cianita-granada-quartzo-feldspato granulito (NESG-72X) estão de acordo com as trajetórias P-T estimadas por Campos Neto & Caby (1999, 2000), Garcia & Campos Neto (2003), Reno et al. (2009), Campos Neto et al. (2010) e Motta & Moraes (2017) através métodos termobarométricos clássicos nas rochas da NTPV. Adicionalmente, a trajetória inferida por Benetti et al. (2024) através de modelagem termodinâmica para rochas análogas

da Nappe Pouso Alto também coincide com a trajetória inferida neste trabalho (**Fig 23**). No entanto, os diagramas de fases em equilíbrio e isopletras composicionais (granada e feldspato) calculadas para esta amostra estimam pressões máximas de aproximadamente 31 kbar. Tais resultados, maiores do que aqueles reportados na literatura, sugerem que a mineralogia principal da rocha registra condições de UHP em profundidades mantélicas como reportadas em Campos Neto et al. (2024).

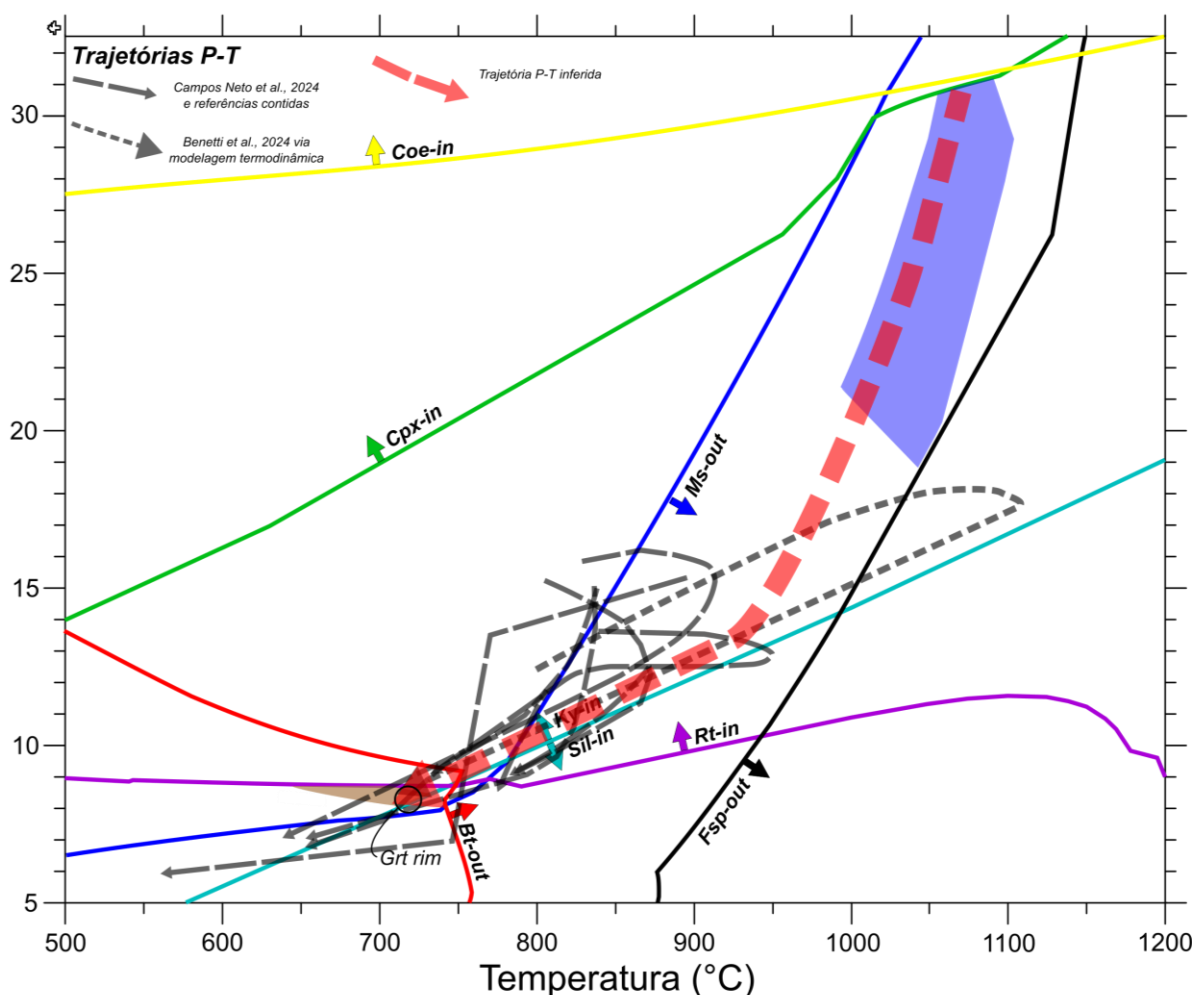


Figura 23 - Trajetórias P-T inferidas na literatura (Campos Neto et al., 2024 e referências contidas) para rochas da NTPV e de Benetti et al. (2024) para granulitos da Nappe Pouso Alto em comparação com a trajetória inferida neste trabalho. Campo em lilás representa o campo de intersecção de isopletras com campo de estabilidade da paragenese de pico e campo em marrom representa o campo de intersecção de isopletras e campo de estabilidade da assembleia retrometamórfica.

Resultados obtidos na reintegração do *melt* para estimar condições do metamorfismo progressivo para a amostra NESG-72X foram considerados inconclusivos, principalmente quando comparados a condições estimadas via modelagem termodinâmica para rochas análogas na Nappe Pouso Alto (Benetti et al. 2024). Adicionalmente, o núcleo do porfiroblasto de granada desta amostra é apenas evidente nos mapas composicionais nos membros-finais de grossulária e almandina. Desta forma, é possível que as composições obtidas não representem mais a composição do início da cristalização do porfiroblasto de granada devido

à processos de difusão química durante o metamorfismo progressivo (Spear & Florence, 1992; Caddick et al., 2010). Portanto, nesse trabalho é apenas considerado a trajetória retrogressiva.

Campos de estabilidade das assembleias de pico metamórfico e de retrometamorfismo estimados para a amostra do rutilo-titanita-hornblenda-granada gnaiss (NESG-72U) (**Fig 24**) reportam condições semelhantes às estimadas para a amostra NESG-72X (**Fig 25**). No entanto, ao contrário da amostra NESG-72X, as isopletras composicionais de granada calculadas são inconclusivas e não restringem as condições P-T de pico e retrometamorfismo. Processos de difusão química durante metamorfismo progressivo e reequilíbrio químico em condições retrometamórficas podem ter afetado a composição química dos porfiroblastos, apagando registros composicionais de pico metamórfico (Spear & Florence, 1992, Caddick, et al., 2010). Valores composicionais próximos para núcleo e borda e condizentes com as condições estimadas para a assembleia mineral retrometamórfica argumentam em favor desta hipótese. Por outro lado, cristais de anfibólio retrometamórfico restringem as condições de metamorfismo retrogressivo entre 625-750°C e ca. 7,5-9,5 kbar.

Portanto, a trajetória P-T estimada para este litotipo considera apenas os campos de estabilidade das assembleias minerais de pico metamórfico e de retrometamorfismo, combinadas aos valores de X_{Mg} em anfibólio (**Fig 24**).

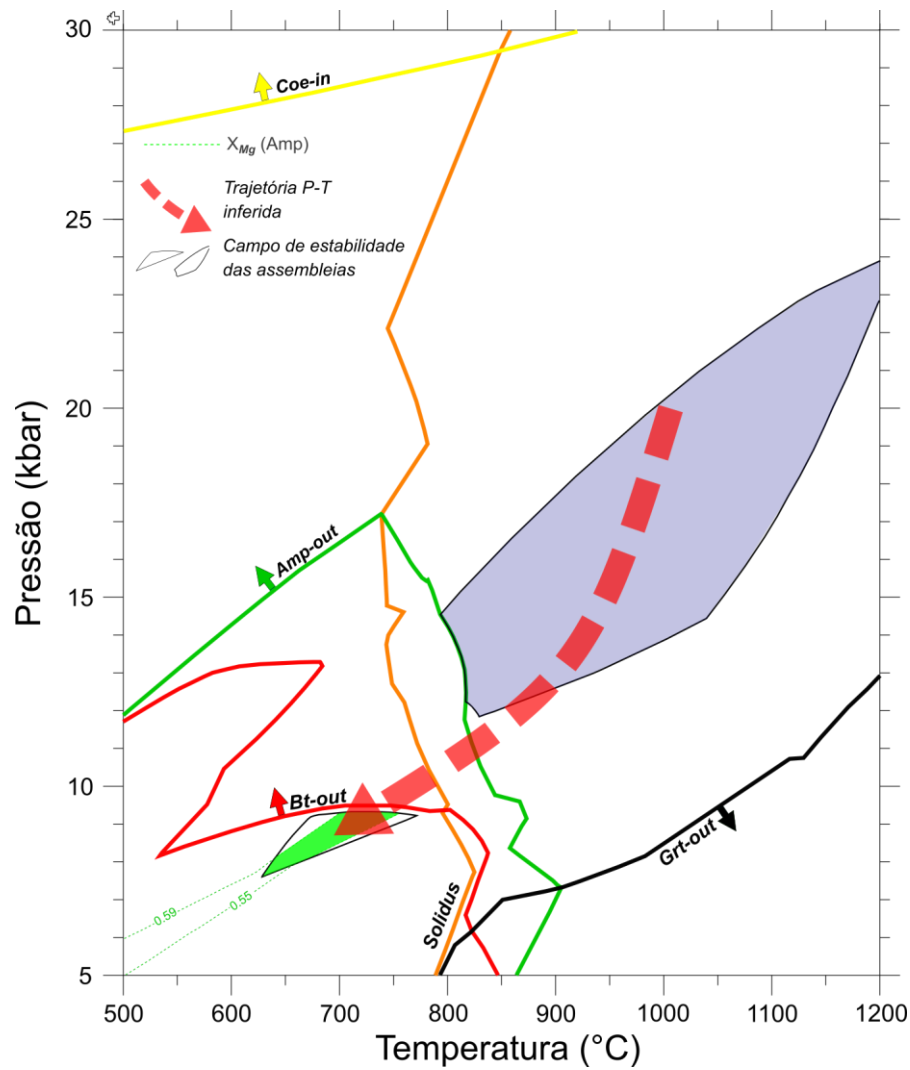


Figura 24 – Trajetória P-T inferida para a amostra NESG-72U com base no campo de estabilidade da paragénese de pico e de retrometamorfismo, esta última sobreposta com isopletras de X_{Mg} em anfibólio para restrição do campo de estabilidade.

A trajetória inferida para a amostra NESG-72U, apesar de menos precisa nas condições de pico, fornecem resultados compatíveis com a trajetória inferida para a amostra NESG-72X e com aquelas documentadas na literatura para os mesmos litotipos (Campos Neto & Caby 1999, 2000; Garcia & Campos Neto, 2003; Reno et al., 2009; Campos Neto et al., 2010 e Motta & Moraes, 2017) (**Fig 25**).

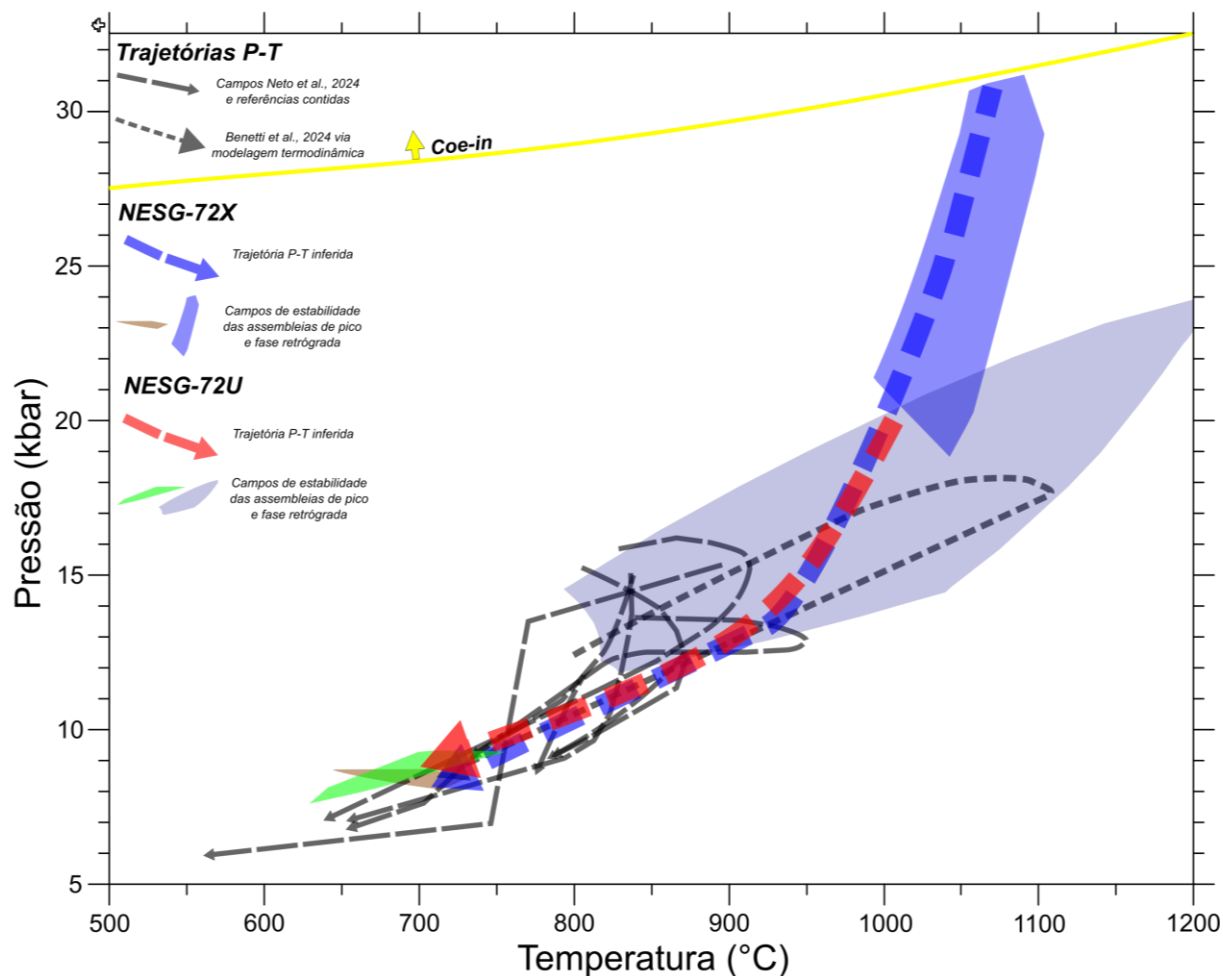


Figura 25 – Trajetórias P-T documentadas na literatura (Campos Neto & Caby 1999, 2000; Garcia & Campos Neto, 2003; Reno et al., 2009; Campos Neto et al., 2010; Motta & Moraes, 2017; Benetti et al., 2024) com trajetórias estimadas para as amostras deste trabalho.

7. CONCLUSÕES

Com base em descrições petrográficas, mapas composicionais quantitativos e modelamento termodinâmico das rochas da NTPV, pode-se concluir que:

- Porfiroblastos idio- a subidioblásticos de granada do granulito félsico (NESG-72X) possuem zoneamento composicional concêntrico seguindo um padrão de borda-zona intermediária-núcleo marcado pelos membros-finais de grossulária, almandina e piropo;
- Diagramas de fases em equilíbrio combinado com as composições de membros finais da zona intermediária de granada e de X_{San} em feldspato da amostra NESG-72X restringem o campo de estabilidade de pico metamórfico entre 1000-1100°C e 19-31 kbar;
- Composições de membros finais da borda de granada restringem o campo de estabilidade do retrometamorfismo em ca. 650-715°C e 8-9kbar;

- Composições obtidas para o núcleo de granada provavelmente não refletem a composição do mineral durante metamorfismo progressivo devido à possíveis processos de difusão química durante a trajetória P-T;
- Porfiroblastos xenoblásticos de granada da amostra NESG-72U possuem zoneamento composicional concêntrico que segue padrão núcleo-borda marcado pelo empobrecimento no membro-final de grossulária e espessartita e enriquecimento em almandina e piropo do núcleo para borda;
- O modelamento termodinâmico estima condições de aproximadamente 800-1200°C e 12-24 kbar para a assembleia mineral de pico metamórfico da amostra NESG-72U;
- Composições de membros finais de granada não forneceram resultados conclusivos para a trajetória P-T dessa amostra, provavelmente afetada por processos de difusão química durante a trajetória P-T que apagaram registros composicionais dos diferentes estágios do metamorfismo. A composição do núcleo e borda dos cristais são compatíveis com as condições estimadas para a assembleia mineral retrometamórfica, o que argumenta em favor dessa possibilidade;
- Condições do estágio retrometamórfico foram restritas a 625-750°C a 7,5-9,5 kbar a partir dos valores de X_{Mg} de anfibólio, condições semelhantes à obtidas na amostra NESG-72X;
- Trajetórias estimadas neste trabalho através de modelagem termodinâmica para as rochas da NTPV são condizentes com as trajetórias reportadas na literatura através de métodos termobarométricos clássicos e modelagem termodinâmica em rochas análogas da NPA. No entanto, modelagem termodinâmica do rutilo-cianita-granada-quartzo-feldspato granulito sugere que a mineralogia principal da rocha registra condições de UHP em profundidades mantélicas como as reportadas por Campos Neto et al. (2024).

8. REFERÊNCIAS

- Baldwin, J.A., Powell, R., Brown, M., Moraes, R., Fuck, R.A. 2005. Modelling of mineral equilibria in ultra-high temperature metamorphic rocks from the Anápolis-Itauçu Complex, central Brazil. *Journal of Metamorphic Geology* 23(7), 511-531.
- Bartoli, O. 2017. Phase equilibria modeling of residual migmatites and granulites: An evaluation of the melt-reintegration approach. *Journal of Metamorphic Geology*, 35, 919-942.
- Benetti, B., Campos Neto, M.C., Carosi, R., Iaccarino, S., Luvizotto, G.L., Montomoli, C., Langone, A. Continental subduction and exhumation of the lower crust in a hot orogen: Insights from high-pressure (ultra) high-temperatura granulite in the Pouso Alto Nappe, Southeast Brasil. *Lithos* 482-483. doi: 10.1016/j.lithos.2024.107720
- Brown, M., Johnson, T. 2018. Secular change in metamorphism and the onset of global plate tectonics. *Am. Mineralogist*. 103, 181 – 196. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6166>

- Belém, J., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Carlos, L., Armstrong, R., Fleck, A., Gradim, C., Queiroga, G., 2011. Bacia precursora versus bacias orogênicas: exemplos do Grupo Andrelândia com base em datações U-Pb (LA-ICP-MS) em zircão e análises litoquímicas. *Geonomos* 19, 224–243.
- Caby, R., 1994. Precambrian coesite from northern Mali: first record and implications for plate tectonics in the trans-Saharan segment of the Pan-African belt. *Eur. J. Mineral.* 6, 235–244. doi:10.1127/ejm/6/2/0235
- Caddick, M.J., Konopásek, J., Thompson, A.B. 2010. Preservation of Garnet Growth Zoning and the Duration of Prograde Metamorphism. *Journal of Petrology*, 51 (11). 2327-2347. Doi:10.1093/petrology/egg059
- Campos Neto, M.C., Basei, M.A.S., Janasi, V.A., Moraes, R., 2011. Orogen migration and tectonic setting of the Andrelândia Nappe system: An Ediacaran western Gondwana collage, south of São Francisco craton. *J. South Am. Earth Sci.* 32, 393–406.
- Campos Neto, M.C., Basei, M.A.S., Vlach, S.R.F., Caby, R., Szabó, G.A.J., Vasconcelos, P., 2004. Migração de orógenos e superposição de orogêneses: um esboço da colagem brasileira no sul do Cráton do São Francisco, SE - Brasil. *Geol. USP - Série Científica* 4, 13–40.
- Campos Neto, M.C., Caby, R., 1999. Neoproterozoic high-pressure metamorphism and tectonic constraint from the nappe system south of the São Francisco Craton, southeast Brazil. *Precambrian Res.* 97, 3–26.
- Campos Neto, M.C., Caby, R., 2000. Lower crust extrusion and terrane accretion in the Neoproterozoic nappes of southeast Brazil. *Tectonics* 19, 669–687.
- Campos Neto, M.C., Cioffi, C.R., Moraes, R., Motta, R.G., Siga Jr., O., Basei, M.A.S., 2010. Structural and metamorphic control on the exhumation of high-P granulites: the Carvalhos Klippe example, from the oriental Andrelândia Nappe System, southern portion of the Brasília Orogen, Brazil. *Precambrian Res.* 180, 125–142. doi:10.1016/j.precamres.2010.05.010
- Campos Neto, M.C., Cioffi, C.R., Westin, A., Rocha, B.C., Frugis, G.L., Tedeschi, M., Pinheiro, M.A.P., 2020. O Orógeno Brasília Meridional, in: Bartorelli, A., Teixeira, W., Brito-Neves, B.B. (Eds.), *Geocronologia e Evolução Tectônica Do Continente Sul-Americano: A Contribuição de Umberto Giuseppe Cordani*. Solaris Edições Culturais, pp. 146–180.
- Campos Neto, M.C., Frugis, G.L., Westin, A., Caby, R., Nobre, A.G., Brugier, O., and Ando, R.A., 2024. Passive continental margin subducted to mantle depths: Coesite-bearing metasedimentary rocks from the Neoproterozoic Brasília Orogen, West Gondwana margin: *Precambrian Research*, v. 410, p. 107469, doi: 10.1016/j.precamres.2024.107469.
- Campos Neto, M.C., Janasi, V.A., Basei, M.A.S., Siga Junior, O., 2007. Sistema de Nappes Andrelândia, setor oriental: Litoestratigrafia e posição estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências* 37 (4-suplemento), p47-60.
- Chopin, C., 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences. *Contrib. Mineral. Petrol.* 86, 107–118. <https://doi.org/10.1007/BF00381838>.
- Cioffi, C.R., Campos Neto, M.C., Möller, A., Rocha, B.C., 2016a. Tectonic significance of the Meso- to Neoproterozoic complexes in the basement of the southern Brasília Orogen. *Precambrian Res.* 287, 91–107. doi:10.1016/j.precamres.2016.10.009
- Cioffi, C.R., Campos Neto, M.C., Rocha, B.C. da, Moraes, R., Henrique-Pinto, R., 2012. Geochemical signatures of metasedimentary rocks of high-pressure granulite facies and their relation with partial melting: Carvalhos Klippe, Southern Brasília Belt, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 40, 63–76. doi: 10.1016/j.jsames.2012.09.007
- Cioffi, C.R., Campos Neto, M.C., Möller, A., Rocha, B.C., 2016b. Paleoproterozoic continental crust generation events at 2.15 and 2.08 Ga in the basement of the southern Brasília Orogen, SE Brazil. *Precambrian Res.* 275, 176–196. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2016.01.007
- Coelho M.B., Trouw R.A.J., Ganade C.E., Vinagre R., Mendes J.C., Sato K. 2017. Constraining timing and P-T conditions of continental collision and late overprinting in the Southern Brasília Orogen (SE-Brazil): U-Pb zircon ages and geothermobarometry of the Andrelândia Nappe System. *Precambrian Research*, 292: p194-215.

- Del Lama, E.A., Zanardo, A., Oliveira, M.A.F., Morales, N., 2000. Exhumation of highpressure granulites of the Guaxupé complex, southeastern Brazil. *Geological Journal* 35, p231-249.
- Diener, J.F.A., Powell, R. 2010. Influence of ferric iron on the stability of mineral assemblages. *Journal of Metamorphic Geology*, 28, 599-613.
- Falci A., Caxito F.A., Seer H.J., Valeriano C.M., Dias P.H.A., Pedrosa-Soares A.C. 2018. Provenance shift from a continental margin to a syn-orogenic basin in the Neoproterozoic Araxá nappe system, southern Brasília Belt, Brazil. *Precambrian Research*, 306:209-219.
- Frugis, G.L., Campos Neto, M.C., Lima, R.B., 2018. Eastern Paranapanema and southern São Francisco orogenic margins: Records of enduring Neoproterozoic oceanic convergence and collision in the southern Brasília Orogen. *Precambrian Res.* 308, 35–57. doi:10.1016/j.precamres.2018.02.005
- Fumes R.A., Luvizotto G.L., Moraes R., Heilbron M., Vlach S.R.F. 2019. Metamorphic modeling and petrochronology of metapelitic rocks from the Luminárias Nappe, southern Brasília belt (SE Brazil). *Brazilian Journal of Geology*, 49(2).
- Fumes R.A., Luvizotto, G.L., Moraes R., Lanari, P., Valeriano, C.M., Zack, T., Caddick, M.J., Simões, L.S.A. 2021. Petrochronology of high-pressure granulite facies rocks from Southern Brasília Orogen, SE Brazil: Combining quantitative compositional mapping, single-element thermometry and geochronology. *Journal of Metamorphic Geology*.1-36. doi: 10.1111/jmg.12637
- Garcia, M.G.M., Campos Neto, M.C., 2003. Contrasting metamorphic conditions in the Neoproterozoic collision-related Nappes south of São Francisco Craton, SE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 15, 853–870.
- Garcia, M.G.M., Campos Neto, M.C., Janasi, V.A., 2004. Proveniência e ambientação tectônica de metassedimentos de alto grau: Nappe Três Pontas-Varginha, sul do Cráton São Francisco. *Rev. Bras. Geociências* 34, 49–58. doi:10.25249/0375-7536.20043414958
- Gillet, P., Ingrin, J., Chopin, C., 1984. Coesite in subducted continental crust: P-T history deduced from an elastic model. *Earth Planet. Sci. Lett.* 70, 426–436. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)90026-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90026-8).
- Gomes, N.B., dos Santos, T.J.S., Tedeschi, M., Galante, D., Luvizotto, G.L., 2023. P-T-t reconstruction of a coesite-bearing retroeclogite reveals a new UHP occurrence in the Western Gondwana margin (NE-Brazil). *Lithos* 446–447. doi:10.1016/j.lithos.2023.107138
- Green, ECR, White, RW, Diener, JFA, Powell, R, Holland, TJB & Palin, RM. 2016. Activity-composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 34, 845-869. doi:10.1111/jmg.12211
- Groppo, C., Rolfo, F., Mosca, P. 2013. The cordierite-bearing anatectic rocks of the higher Himalayan crystallines (eastern Nepal): Low-pressure anatexis, melt productivity, melt loss and the preservation of cordierite. *Journal of Metamorphic Geology*, 31, 187-204.
- Holland, T.J.B., Powell, R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16. 309-343.
- Holland, T & Powell, R (2003). Activity-composition relations for phases in petrological calculations; an asymmetric multicomponent formulation. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 145, 492-501. doi: 10.1007/s00410-003-0464-z
- Holland, T.J.B., Powell, R. 2011. 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*, 29(3), 333-383. doi:10.1111/j.1525-1314.2010.00923.x
- Janasi, V.A., 1999. Petrogênese de granitos crustais na Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé (SP-MG): uma contribuição da geoquímica elemental e isotópica. Tese (Livre Docência). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 304p.
- Kuster, K., Ribeiro, A., Trouw, R.A.J., Dussin, I., Marimon, R.S., 2020. The Neoproterozoic Andrelândia group: Evolution from an intraplate continental margin to an early collisional basin south of the São Francisco craton, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 102. doi: 10.1016/j.jsames.2020.102666
- Lanari, P., Piccoli, F., 2020. New horizons in quantitative compositional mapping - Analytical conditions and data reduction using XMapTools. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 891. doi:10.1088/1757-899X/891/1/012016
- Lanari, P., Vidal, O., De Andrade, V., Dubacq, B., Lewin, E., Grosch, E.G., Schwartz, S., 2014.

- XMapTools: A MATLAB©-based program for electron microprobe X-ray image processing and geothermobarometry. *Comput. Geosci.* 62, 227–240. doi:10.1016/j.cageo.2013.08.010
- Lanari, P., Engi, M., 2017. Local bulk composition effects on metamorphic mineral assemblages, in: Kohn, M.J., Engi, M., Lanari, P. (Eds.), *Petrochronology: Methods and Applications. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, pp. 55–102.
- Lanari, P., Vho, A., Bovay, T., Airaghi, L., Centrella, S. 2019. Quantitative compositional mapping of mineral phases by electron probe micro-analyser. In: Ferrero, S., Lanari, P., Gonçalves, P. and Grosch, E.G. (Eds.) *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts*. Geological Society, London, Special Publications 478, 39-63.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthouth, K., Laird, J., Mandarino, J., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W., Youzhi, G. 1997. Nomenclature of Amphiboles; Report of the Subcommittee on Amphiboles of the Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine* 61 (405). 295-310. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13>
- Li, B., Massonne, H.-J., Hartmann, L.A., Zhang, J., Luo, T., 2021. Kyanite-garnet granulite from the Andrelândia nappe system, Brasília belt, registers two late Neoproterozoic metamorphic cycles. *Precamb. Res.* 355, 106086 <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106086>.
- Liu, F., Gerdes, A., Zeng, L., Xue, H., 2008. SHRIMP U-Pb dating, trace elements and the Lu-Hf isotope system of coesite-bearing zircon from amphibolite in the SW Sulu UHP terrane, eastern China. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 2973–3000. doi:10.1016/j.gca.2008.04.007
- Manoel, T.N., Heilbron, M., Cutts, K., Dussin, I., Marins, G., Jailane, Lobato, M., Valeriano, C.M, Bruno, H., 2022. An example of a Neoproterozoic hyperextended margin: an integrated perspective of the basic magmatism recorded in the Andrelândia Basin, central Ribeira Orogen, SE-Brazil. *Precamb. Res.* 381, 106863 <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106863>.
- Marimon, R.S., Trouw, R.A.J., Dantas, E.L., Ribeiro, A., 2020. U-Pb and Lu-Hf isotope systematics on detrital zircon from the southern São Francisco Craton's Neoproterozoic passive margin: Tectonic implications. *J. South Am. Earth Sci.* 100. doi:10.1016/j.jsames.2020.102539
- Martins, L., Vlach, S.R.F., Janasi, V.A., 2009. Reaction microtextures of monazite: correlation between chemical and age domains in the Nazaré Paulista migmatite, SE Brazil. *Chemical Geology* 261, p271-285.
- Mora C.A.S., Campos Neto M.C., Basei M.A.S. 2014. Syn-collisional lower continental crust anatexis in the Neoproterozoic Socorro-Guaxupé Nappe System, southern Brasília Orogen, Brazil: constraints from zircon U-Pb dating, Sr-Nd-Hf signatures and whole-rock geochemistry. *Precambrian Research*, 255:847-864.
- Motta, R.G., Moraes, R., 2017. Pseudo- and real-inverted metamorphism caused by the superposition and extrusion of a stack of nappes: a case study of the Southern Brasília Orogen, Brazil. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)* 106, 2407–2427. doi:10.1007/s00531-016-1436-7
- Oliveira, M.A.F., Negri, F. de A., Zanardo, A., 2019. Archean and paleoproterozoic crust generation events, Amparo complex and Serra Negra orthogneiss in southern Brasília Orogen, SE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 90, 137–154. doi: 10.1016/j.jsames.2018.11.029
- Paciullo F.V.P., Ribeiro A., Andreis R.R., Trouw R.A.J. 2000. The Andrelândia basin, a Neoproterozoic intraplate continental margin, southern Brasilia belt. *Rev. Bras. Geoc.*, 30:200-202.
- Parkinson, C.D., Motoki, A., Onishi, C.T., Maruyama, S., 2001. Ultrahigh-pressure pyrope-kyanite granulites and associated eclogites in Neoproterozoic nappes of southeast Brazil, in: UHPM Workshop. Waseda, Tokyo, pp. 87-90.
- Reno, B.L., Brown, M., Kobayashi, K., Nakamura, E., Piccoli, P.M., Trouw, R.A.J., 2009. Eclogite-high-pressure granulite metamorphism records early collision in West Gondwana: new data from the Southern Brasilia Belt, Brazil. *J. Geol. Soc. London.* 166, 1013–1032. doi:10.1144/0016-76492008-140
- Reno, B.L., Piccoli, P.M., Brown, M., Trouw, R.A.J., 2012. In situ monazite (U-Th)-Pb ages from the Southern Brasilia Belt, Brazil: constraints on the high-temperature retrograde

- evolution of HP granulites. *J. Metamorph. Geol.* 30, 81–112. doi:10.1111/j.1525-1314.2011.00957.x
- Ribeiro A., Paciullo F.V.P., Andreis R.R. 1990. Evolução policíclica ao sul do Cráton do São Francisco: análise da região de São João Del Rei e Andrelândia, MG, In: XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia. Natal, SBG, Anais, p. 2605-2614.
- Rocha, B.C., Campos Neto, M.C., Cioffi, C.R., Westin, A., Alves, A., Salazar-Mora, C.A., Egydio-Silva, M., Moraes, R., Souza, S.D.S., Maurer, V.C., 2024, The passive margin of the southern São Francisco paleocontinent, metamorphic record and implications for the assembly of West Gondwana: Evidence from the Lima Duarte Nappe, Ribeira Orogen (SE Brazil): *Precambrian Research*, v. 404, doi:10.1016/j.precamres.2024.107338.
- Rocha B.C., Moraes R., Möller A., Cioffi C.R., Jercinovic M.J. 2017. Timing of anatexis and melt crystallization in the Socorro-Guaxupé Nappe, SE Brazil: Insights from trace element composition of zircon, monazite and garnet coupled to U-Pb geochronology. *Lithos*, 277:337-355.
- Rocha B.C., Moraes R., Möller A., Cioffi C.R. 2018. Magmatic inheritance vs. UHT metamorphism: zircon petrochronology of granulites and petrogenesis of charnockitic leucosomes of the Socorro-Guaxupé Nappe, SE Brazil. *Lithos*, 314-315:16-39.
- Santos, L.P. 2004. Trajetórias metamórficas de ambientes colisionais: Domínios frontais das Nappe Aiuruoca-Andrelândia e Lima Duarte, borda sul do Cráton do São Francisco, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 90 p.
- Santos, T.J.S., Amaral, W. da S., Ancelmi, M.F., Pitarello, M.Z., Fuck, R.A., Dantas, E.L., 2015. U-Pb age of the coesite-bearing eclogite from NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for western Gondwana assembly. *Gondwana Res.* 28, 1183–1196. doi:10.1016/j.gr.2014.09.013
- Schertl, H.P., Schreyer, W., Chopin, C., 1991. The pyrope-coesite rocks and their country rocks at Parigi, Dora Maira Massif, Western Alps: detailed petrography, mineral chemistry and PT-path. *Contrib. to Mineral. Petrol.* 108, 1–21.
- Sobolev, N. V., Shatsky, V.S., 1990. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks: A new environment for diamond formation. *Nature* 343, 742–746. doi:10.1038/343742a0
- Spear, F.S., Florence, F.P., 1992. Thermobarometry in granulites: pitfalls and new approaches. *Precambrian Research*, 55. 209-241. Doi:10.1016/0301-9268(92)90025-J.
- Silva M.P. 2010. Modelamento metamórfico de rochas das fácies xisto-verde e anfibolito com o uso de pseudosseções: exemplos das rochas da Klippe Carrancas, sul de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 145 p.
- Tedeschi M., Lanari P., Rubatto D., Pedrosa-Soares A., Hermann J., Dussin I., Pinheiro M.A.P., Bouvier A.S., Baumgartner L. 2017. Reconstruction of multiple P-T-t stages from retrogressed mafic rocks: Subduction versus collision in the Southern Brasília orogen (SE Brazil). *Lithos*, 294-295:283-303.
- Tedeschi M., Pedrosa-Soares A., Dussin I., Lanari P., Novo T., Pinheiro M.A.P., Lana C., Peters D. 2018. Protacted zircon geochronological record of UHT garnet-free granulites in the Southern Brasília Orogen (SE Brazil): Petrochronological constraints on magmatism and metamorphism. *Precambrian Research*, 316:103-126.
- Trouw C.C. 2008. Mapeamento da Folha Virgínia– MG, Geocronologia U-Pb (SHRIMP) em zircões e interpretação geotectônica. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 127.
- Trouw, R.A.J., Heilbron, M., Ribeiro, A., Paciullo, F.V.P., Valeriano, C.M., Almeida, J.C.H., Tupinambá, M., Andreis, R.R., 2000. The central segment of the Ribeira Belt, in: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*. 31 International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 335–365.
- Trouw, R.A.J., Paciullo, F.V.P., Ribeiro, A., 1998. Tectonic significance of Neoproterozoic high pressure granulites in southern Minas Gerais. In: *International Conference on Basement Tectonics*, vol. 14, p 69-71. Ouro Preto.
- Trouw, R.A.J., Peternel, R., Ribeiro, A., Heilbron, M., Vinagre, R., Duffles, P., Trouw, C.C., Fontainha, M., Kussama, H.H., 2013. A new interpretation for the interference zone

- between the southern Brasília belt and the central Ribeira belt, SE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 48, 43–57.
- Trouw R.A.J., Ribeiro A., Paciullo F.V.P. 1980. Evolução estrutural e metamórfica de uma área a SE de Lavras - Minas Gerais, In: XXXI Congresso Brasileiro de Geologia. Balneário de Camboriú, SBG, Anais, p. 2773-2784.
- Trouw R.A.J., Ribeiro A., Paciullo F.V.P., 1983. Geologia estrutural dos Grupos São João Del Rei, Carrancas e Andrelândia, Sul de Minas Gerais. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, 55(1):71-85.
- Valladares C.S., Machado N., Heilbron M., Gauthier G. 2004. Ages of detrital zircon from siliciclastic successions south of the São Francisco Craton, Brazil: implications for the evolution of Proterozoic basins. *Gondwana Research*, 7:913-921.
- Valeriano C.M., Machado N., Simonetti, A., Valladares C.S., Seer H.J., Simões L.S.A. 2004. U-Pb geochronology of the southern Brasília belt (SE-Brazil): Sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of West Gondwana. *Precambrian Res.*, 130:27-55.
- Walters, J.B., 2022. MinPlot: a mineral formula recalculation and plotting program for electron probe microanalysis. *Mineralogia* 53, 52–67. <https://doi.org/10.2478/mipo-2022-0005>.
- Westin, A., Campos Neto, M.C., 2013. Provenance and tectonic setting of the external nappe of the Southern Brasília Orogen. *J. South Am. Earth Sci.* 48, 220–239.
- Westin, A., Campos Neto, M.C., Cawood, P.A., Hawkesworth, C.J., Dhuime, B., Delavault, H., 2019. The Neoproterozoic southern passive margin of the São Francisco craton: insights on the pre-amalgamation of West Gondwana from U-Pb and Hf-Nd isotopes. *Precambrian Res.* 320, 454–471. doi: 10.1016/j.precamres.2018.11.018
- Westin, A., Campos Neto, M.C., Hawkesworth, C.J., Cawood, P.A., Dhuime, B., Delavault, H., 2016. 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 Res.* 276, 178–193. doi:10.1016/j.precamres.2016.02.004
- Westin, A., Campos Neto, M.C., Hollanda, M.H.B.M., Salazar-Mora, C.A., Queiroga, G., Frugis, G.L., de Castro, M.P., 2021. The fast exhumation pattern of a Neoproterozoic nappe system built during West Gondwana amalgamation: insights from thermochronology. *Precambrian Res.* 355, 106115
- Westin, A., Tedeschi, M., Campos Neto, M.C., Luvizotto, G.L., Motta, R.G., Nobre, A.G., Ando, R.A. Pressure-Temperature-time paths from metapelites reveal Neoproterozoic continental crust underthrusting related to the West Gondwana amalgamation. *Submetido ao periódico Lithos*.
- White, RW, Powell, R & Clarke, GL. 2002. The interpretation of reaction textures in Fe-rich metapelitic granulites of the Musgrave Block, central Australia: constraints from mineral equilibria calculations in the system K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 41-55.
- White, R.W., Powell, R., Halpin, J.A. 2004. Spatially-focussed melt formation in aluminous metapelites from Broken Hill, Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 22, 825-845.
- White, RW, Powell, R & Holland, TJB (2007) Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*, 25, 511-527.
- White, RW, Powell, R, Holland, TJB, Johnson, TE & Green, ECR. 2014. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. *Journal of Metamorphic Geology*, 32, 261-286. doi: 10.1111/jmg.12071
- Whitney, D.L., Cooke, M.L., Du Frane, S.A., 2000. Modeling of radial microcracks at corners of inclusions in garnet using fracture mechanics. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 105, 2843–2853. <https://doi.org/10.1029/1999JB900375>.

ANEXO I – Química mineral (análises WDS) das amostras NESG-72X e NESG-72U

Análises químicas de granada – NESG-72X

Sample	Grt_1	Grt_2	Grt_3	Grt_4	Grt_5	Grt_6	Grt_7	Grt_8	Grt_9	Grt_10	Grt_11	Grt_12	Grt_13	Grt_14	Grt_15	Grt_16	Grt_17
SiO2	37.6	37.48	37.32	37.37	37.5	37.51	37.60	37.46	37.45	37.52	37.44	37.56	37.65	37.34	37.68	37.38	37.50
TiO2	0.0687	0.0258	0.0168	0.0039	0	0.0289	0.0208	0.0134	0.0267	0.0189	0.0317	0.0249	0.0072	0.0113	0.0148	0.0196	0.0130
Al2O3	21.22	21.3	21.18	20.9	20.96	21.04	20.99	21.16	21.12	21.11	21.05	21.17	21.09	21.20	21.01	21.12	21.16
FeO	33.84	34.49	34.09	34.3	34.21	34.27	34.29	34.50	34.14	33.86	34.15	34.27	33.73	34.27	34.04	34.49	33.86
MnO	0.33	0.38	0.3646	0.4033	0.4707	0.4395	0.4561	0.5120	0.5401	0.4928	0.5124	0.5427	0.4929	0.4193	0.4029	0.3985	0.4106
MgO	5.38	5.49	5.46	5.44	5.36	5.37	5.38	5.46	5.32	5.28	5.22	5.27	5.40	5.48	5.44	5.50	5.41
CaO	1.49	0.97	0.858	0.759	0.623	0.590	0.656	0.791	0.950	1.047	1.039	1.006	0.926	0.769	0.745	0.789	1.198
Total	99.93	100.14	99.29	99.18	99.12	99.25	99.39	99.90	99.55	99.33	99.44	99.84	99.30	99.49	99.33	99.70	99.55
Formula	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)
Si	2.988	2.978	2.986	2.997	3.006	3.002	3.006	2.984	2.991	2.999	2.995	2.992	3.007	2.984	3.010	2.983	2.991
Ti	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
Al	1.987	1.994	1.997	1.975	1.980	1.985	1.977	1.987	1.988	1.989	1.984	1.988	1.985	1.996	1.978	1.987	1.989
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe++	2.249	2.292	2.281	2.300	2.293	2.294	2.292	2.299	2.281	2.264	2.284	2.283	2.253	2.290	2.274	2.302	2.259
Mn	0.022	0.026	0.025	0.027	0.032	0.030	0.031	0.035	0.037	0.033	0.035	0.037	0.033	0.028	0.027	0.027	0.028
Mg	0.637	0.650	0.651	0.650	0.640	0.641	0.641	0.648	0.633	0.629	0.622	0.626	0.643	0.653	0.648	0.654	0.643
Ca	0.127	0.083	0.074	0.065	0.054	0.051	0.056	0.068	0.081	0.090	0.089	0.086	0.079	0.066	0.064	0.067	0.102
Total	8.014	8.024	8.015	8.015	8.004	8.004	8.005	8.021	8.013	8.005	8.011	8.013	8.000	8.018	8.001	8.022	8.013

Sample	Grt_18	Grt_19	Grt_20	Grt_21	Grt_22	Grt_23	Grt_24	Grt_25	Grt_26	Grt_27	Grt_28	Grt_29	Grt_30	Grt_31	Grt_32
SiO2	37.68	37.63	37.90	37.55	37.67	37.57	37.78	37.37	37.61	37.44	37.45	37.27	37.58	37.40	37.65
TiO2	0.0000	0.0277	0.0155	0.0000	0.0124	0.0067	0.0000	0.0498	0.0114	0.0087	0.0386	0.0000	0.0000	0.0172	0.0145
Al2O3	21.17	21.30	21.15	21.20	21.25	21.22	21.08	21.15	21.11	21.04	21.24	21.22	21.12	21.23	21.36
FeO	33.60	33.16	33.47	33.46	33.45	33.74	34.07	33.92	34.44	33.91	33.93	34.74	34.44	34.38	33.98
MnO	0.3514	0.3258	0.3358	0.2882	0.3695	0.3584	0.3411	0.3271	0.3734	0.3523	0.4458	0.4140	0.4076	0.3751	0.3822
MgO	5.36	5.35	5.40	5.40	5.41	5.43	5.61	5.62	5.51	5.42	5.37	5.36	5.36	5.45	5.59
CaO	1.331	1.700	1.630	1.680	1.580	1.131	0.599	0.582	0.853	1.186	1.173	0.704	0.691	0.820	1.001
Total	99.49	99.49	99.90	99.58	99.74	99.46	99.48	99.02	99.91	99.36	99.65	99.71	99.60	99.67	99.98
Formula	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)
Si	3.002	2.995	3.006	2.991	2.994	2.996	3.010	2.993	2.993	2.993	2.986	2.978	2.999	2.983	2.988
Ti	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001
Al	1.988	1.998	1.977	1.990	1.991	1.994	1.979	1.996	1.980	1.982	1.996	1.998	1.986	1.996	1.998
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe++	2.239	2.207	2.220	2.229	2.224	2.250	2.270	2.272	2.292	2.267	2.262	2.321	2.298	2.294	2.255
Mn	0.024	0.022	0.023	0.019	0.025	0.024	0.023	0.022	0.025	0.024	0.030	0.028	0.028	0.025	0.026
Mg	0.637	0.635	0.639	0.641	0.641	0.645	0.666	0.671	0.654	0.646	0.638	0.638	0.638	0.648	0.661
Ca	0.114	0.145	0.139	0.143	0.135	0.097	0.051	0.050	0.073	0.102	0.100	0.060	0.059	0.070	0.085
Total	8.004	8.004	8.004	8.014	8.010	8.007	8.000	8.006	8.017	8.015	8.014	8.023	8.008	8.018	8.013

Sample	Grt_33	Grt_34	Grt_35
SiO2	37.56	37.52	37.69
TiO2	0.0175	0.0000	0.0209
Al2O3	21.14	21.13	21.28
FeO	33.85	33.89	33.65
MnO	0.3608	0.3758	0.3634
MgO	5.08	5.21	5.26
CaO	1.313	1.480	1.570
Total	99.32	99.61	99.83

Formula	12(O)	12(O)	12(O)
Si	3.003	2.993	2.995
Ti	0.001	0.000	0.001
Al	1.992	1.987	1.993
Cr	0.000	0.000	0.000
Fe++	2.263	2.261	2.236
Mn	0.024	0.025	0.024
Mg	0.605	0.620	0.623
Ca	0.112	0.127	0.134
Total	8.001	8.013	8.007

Análises químicas de K-feldspato – NESG-72X

Sample	Fds_1	Fds_2	Fds_3	Fds_4	Fds_5	Fds_6	Fds_7	Fds_8	Fds_9	Fds_10	Fds_11	Fds_12	Fds_13	Fds_14	Fds_15	Fds_16
SiO2	64.50	64.94	65.05	65.37	64.80	65.08	64.52	65.20	65.60	64.85	64.96	65.12	65.19	64.78	65.00	64.97
TiO2	0.053	0.016	0.000	0.000	0.000	0.044	0.022	0.022	0.000	0.067	0.045	0.000	0.055	0.000	0.010	0.026
Al2O3	18.66	18.55	18.67	18.76	18.56	18.63	18.48	18.38	18.63	18.59	18.68	18.50	18.35	18.40	18.68	18.32
FeO	0.065	0.020	0.054	0.094	0.065	0.056	0.059	0.085	0.009	0.027	0.004	0.034	0.000	0.012	0.000	0.006
MnO	0.003	0.006	0.000	0.004	0.000	0.000	0.009	0.010	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.008	0.000	0.011	0.000	0.005
CaO	0.1335	0.1147	0.1051	0.0646	0.0772	0.0342	0.0981	0.0335	0.1877	0.1049	0.2556	0.0809	0.0519	0.0704	0.1389	0.1277
Na2O	2.30	2.15	2.30	1.95	1.56	1.29	1.20	1.07	3.28	2.69	2.67	2.02	1.85	1.75	2.69	1.76
K2O	13.80	14.00	13.82	14.28	14.78	15.30	15.26	15.35	12.44	13.20	13.23	14.15	14.41	14.51	13.19	14.41
TOTAL	99.51	99.80	100.00	100.52	99.84	100.44	99.65	100.15	100.15	99.54	99.85	99.91	99.91	99.53	99.71	99.62
Oxygens	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.977	2.988	2.985	2.987	2.988	2.988	2.987	3.000	2.991	2.984	2.981	2.993	2.998	2.993	2.985	2.997
Al	1.015	1.006	1.010	1.011	1.009	1.008	1.008	0.997	1.001	1.008	1.010	1.002	0.995	1.002	1.011	0.996
Ti	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001
Fe	0.002	0.001	0.002	0.004	0.003	0.002	0.002	0.003	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
Ca	0.007	0.006	0.005	0.003	0.004	0.002	0.005	0.002	0.009	0.005	0.013	0.004	0.003	0.003	0.007	0.006
Na	0.206	0.192	0.205	0.173	0.139	0.115	0.108	0.095	0.290	0.240	0.238	0.180	0.165	0.157	0.240	0.157
K	0.813	0.822	0.809	0.832	0.869	0.896	0.901	0.901	0.723	0.775	0.774	0.830	0.845	0.855	0.773	0.848
Total	5.022	5.015	5.016	5.010	5.012	5.012	5.013	4.999	5.015	5.017	5.018	5.011	5.008	5.012	5.015	5.007

Sample	Fds_17	Fds_18	Fds_19	Fds_20	Fds_21	Fds_22
SiO2	65.00	64.75	65.06	64.76	64.35	64.71
TiO2	0.048	0.068	0.032	0.000	0.063	0.013
Al2O3	18.39	18.35	18.53	18.35	18.30	18.43
FeO	0.000	0.000	0.052	0.026	0.051	0.037
MnO	0.016	0.026	0.002	0.017	0.022	0.004
MgO	0.000	0.000	0.009	0.012	0.016	0.012
CaO	0.0901	0.1320	0.0599	0.0538	0.0387	0.0421
Na2O	1.74	1.54	1.98	1.44	1.29	0.90
K2O	14.49	14.78	14.20	15.04	15.28	15.93
TOTAL	99.77	99.65	99.92	99.70	99.41	100.07

Oxygens	8	8	8	8	8	8
---------	---	---	---	---	---	---

Si	2.995	2.992	2.991	2.994	2.988	2.990
Al	0.999	0.999	1.004	1.000	1.002	1.004
Ti	0.002	0.002	0.001	0.000	0.002	0.000
Fe	0.000	0.000	0.002	0.001	0.002	0.001
Mn	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000
Mg	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
Ca	0.004	0.007	0.003	0.003	0.002	0.002
Na	0.155	0.138	0.176	0.129	0.116	0.080
K	0.852	0.871	0.833	0.887	0.905	0.939
Total	5.008	5.010	5.011	5.014	5.019	5.018

Análises químicas de biotita – NESG-72X

Sample	Bt_01	Bt_02	Bt_03	Bt_04	Bt_05	Bt_06	Bt_07	Bt_08	Bt_09	Bt_10	Bt_11	Bt_12	Bt_13	Bt_14	Bt_15
SiO2	35.67	35.66	35.75	35.64	35.97	35.92	35.63	35.67	35.91	36.18	36.21	35.96	36.05	36.24	35.44
TiO2	3.46	3.51	4.02	3.63	3.97	3.91	3.66	3.70	3.92	3.52	2.78	2.84	3.00	1.85	3.18
Al2O3	18.76	18.55	18.79	18.10	18.56	18.41	18.91	18.74	19.17	18.62	19.33	19.43	18.95	19.39	18.55
FeO	20.07	19.70	18.92	18.74	18.53	18.23	18.70	18.94	18.42	18.96	13.91	14.41	14.42	14.18	18.94
MnO	0.046	0.000	0.000	0.003	0.025	0.000	0.000	0.018	0.010	0.000	0.025	0.000	0.002	0.025	0.017
MgO	8.24	8.11	8.69	9.60	9.05	8.89	8.99	8.94	8.86	8.89	13.67	12.93	13.77	13.84	9.80
CaO	0.012	0.000	0.020	0.027	0.018	0.023	0.019	0.005	0.014	0.018	0.004	0.000	0.000	0.026	0.041
Na2O	0.069	0.079	0.067	0.095	0.080	0.044	0.069	0.064	0.077	0.069	0.217	0.231	0.342	0.159	0.094
K2O	9.82	9.90	9.85	9.66	9.75	9.84	9.80	9.90	9.83	9.84	9.46	9.56	9.02	9.42	9.17
TOTAL	96.15	95.51	96.11	95.49	95.95	95.27	95.78	95.98	96.21	96.10	95.61	95.36	95.55	95.13	95.23
Oxygens	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Si	2.703	2.717	2.695	2.704	2.709	2.723	2.692	2.695	2.695	2.725	2.672	2.669	2.665	2.689	2.690
Al	1.676	1.666	1.670	1.618	1.648	1.645	1.684	1.669	1.696	1.653	1.681	1.700	1.651	1.696	1.660
Ti	0.197	0.201	0.228	0.207	0.225	0.223	0.208	0.210	0.221	0.199	0.154	0.159	0.167	0.103	0.182
Fe	1.272	1.255	1.193	1.189	1.167	1.156	1.182	1.197	1.156	1.194	0.859	0.895	0.892	0.880	1.202
Mn	0.003	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.001
Mg	0.931	0.921	0.977	1.086	1.016	1.005	1.013	1.007	0.991	0.998	1.504	1.431	1.518	1.531	1.109
Ca	0.001	0.000	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003
Na	0.010	0.012	0.010	0.014	0.012	0.006	0.010	0.009	0.011	0.010	0.031	0.033	0.049	0.023	0.014
K	0.949	0.962	0.947	0.935	0.937	0.951	0.945	0.954	0.941	0.945	0.890	0.905	0.851	0.892	0.888
Total	7.742	7.735	7.721	7.754	7.716	7.711	7.735	7.742	7.712	7.727	7.794	7.791	7.792	7.817	7.749

Sample	Bt_16	Bt_17	Bt_18
SiO2	36.60	35.75	35.93
TiO2	3.50	3.02	1.73
Al2O3	18.76	18.55	19.85
FeO	17.23	16.88	18.73
MnO	0.000	0.000	0.015
MgO	10.12	10.92	9.53
CaO	0.021	0.013	0.021
Na2O	0.070	0.103	0.060
K2O	9.87	9.88	9.90
TOTAL	96.17	95.12	95.77

Oxygens	11	11	11
---------	----	----	----

Si	2.729	2.700	2.710
Al	1.649	1.651	1.765
Ti	0.196	0.172	0.098
Fe	1.075	1.066	1.182
Mn	0.000	0.000	0.001
Mg	1.125	1.229	1.072
Ca	0.002	0.001	0.002
Na	0.010	0.015	0.009
K	0.939	0.952	0.952
Total	7.724	7.786	7.790

Análise químicas de granada – NESG-72U

Sample	Grt_01	Grt_02	Grt_03	Grt_04	Grt_05	Grt_06	Grt_07	Grt_08	Grt_09	Grt_10	Grt_11	Grt_12	Grt_13	Grt_14	Grt_15
SiO2	38.42	38.18	38.36	38.62	38.48	38.51	38.31	38.54	38.45	38.6	38.26	38.28	38.48	38.07	38.2
TiO2	0.1271	0.1196	0.1407	0.0845	0.0624	0.0935	0.1198	0.1016	0.0887	0.068	0.1685	0.1197	0.0533	0.1811	0.1043
Al2O3	20.77	20.75	20.66	20.83	20.96	20.74	20.79	20.79	20.89	21.11	20.58	20.49	21.24	20.44	20.63
FeO	23.34	23.3	23.23	24.07	23.82	22.71	22.92	23.31	22.98	23.9	23.52	23.24	23.79	21.60	21.21
MnO	0.2977	0.3183	0.3058	0.3003	0.3123	0.2988	0.3034	0.2723	0.2608	0.3068	0.289	0.309	0.306	0.361	0.351
MgO	5.34	5.36	5.12	5.11	5.56	5.19	5.28	5.39	5.44	5.41	5.30	5.26	5.55	4.41	4.49
CaO	10.87	12.01	12.51	11.82	10.88	12.59	12.49	12.37	11.95	10.7	11.87	12.33	10.97	14.67	14.44
Total	99.16	100.04	100.33	100.83	100.07	100.13	100.21	100.77	100.06	100.09	99.99	100.03	100.39	99.73	99.43
Formula	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)
Si	3.011	2.978	2.986	2.993	2.994	2.995	2.981	2.984	2.990	3.000	2.987	2.988	2.983	2.982	2.992
Ti	0.007	0.007	0.008	0.005	0.004	0.005	0.007	0.006	0.005	0.004	0.010	0.007	0.003	0.011	0.006
Al	1.918	1.908	1.895	1.902	1.922	1.901	1.906	1.897	1.915	1.934	1.894	1.885	1.941	1.887	1.904
Fe++	1.530	1.520	1.512	1.560	1.550	1.477	1.491	1.509	1.494	1.553	1.536	1.517	1.543	1.415	1.389
Mn	0.020	0.021	0.020	0.020	0.021	0.020	0.020	0.018	0.017	0.020	0.019	0.020	0.020	0.024	0.023
Mg	0.624	0.623	0.594	0.590	0.645	0.602	0.612	0.622	0.631	0.627	0.617	0.612	0.641	0.515	0.524
Ca	0.913	1.004	1.043	0.981	0.907	1.049	1.041	1.026	0.996	0.891	0.993	1.031	0.911	1.231	1.212
Total	8.023	8.061	8.059	8.051	8.042	8.049	8.059	8.062	8.048	8.029	8.056	8.062	8.043	8.064	8.050

Sample	Grt_16	Grt_17	Grt_18	Grt_19	Grt_20	Grt_21	Grt_22	Grt_23	Grt_24	Grt_25	Grt_26	Grt_27	Grt_28	Grt_29	Grt_30
SiO2	38.29	38.47	38.45	38.37	38.11	38.38	38.34	38.52	38.47	38.49	38.36	38.38	38.5	38.5	39.23
TiO2	0.1161	0.1037	0.0945	0.0987	0.2140	0.1619	0.0960	0.1378	0.1780	0.1230	0.1569	0.1476	0.0959	0.1115	0.0862
Al2O3	20.76	20.94	20.79	20.83	20.03	20.53	20.55	20.83	20.42	20.95	20.60	20.68	20.86	20.69	20.77
FeO	22.71	22.90	23.65	22.99	21.91	23.22	22.78	23.25	22.99	23.23	21.95	23.06	22.62	23.62	23.59
MnO	0.321	0.302	0.294	0.365	0.406	0.344	0.400	0.391	0.348	0.348	0.350	0.280	0.324	0.316	0.273
MgO	4.99	5.32	5.35	5.02	4.87	4.98	4.69	4.75	4.85	5.15	4.34	5.04	4.87	5.31	5.22
CaO	13.02	12.38	11.80	12.55	13.87	12.39	13.22	12.75	12.98	12.37	14.48	12.84	13.04	11.81	0.00
Total	100.21	100.42	100.43	100.22	99.41	100.01	100.08	100.63	100.24	100.66	100.24	100.43	100.31	100.36	89.17
Formula	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)
Si	2.982	2.984	2.988	2.986	2.994	2.996	2.993	2.990	2.998	2.983	2.989	2.984	2.991	2.993	3.291
Ti	0.007	0.006	0.006	0.006	0.013	0.010	0.006	0.008	0.010	0.007	0.009	0.009	0.006	0.007	0.005
Al	1.905	1.914	1.904	1.911	1.855	1.889	1.891	1.906	1.876	1.913	1.892	1.895	1.910	1.896	2.053
Fe++	1.479	1.485	1.537	1.496	1.440	1.516	1.487	1.509	1.498	1.505	1.430	1.499	1.470	1.536	1.655
Mn	0.021	0.020	0.019	0.024	0.027	0.023	0.026	0.026	0.023	0.023	0.023	0.018	0.021	0.021	0.019
Mg	0.579	0.615	0.620	0.582	0.570	0.580	0.546	0.550	0.564	0.595	0.504	0.584	0.564	0.615	0.653
Ca	1.086	1.029	0.982	1.047	1.168	1.036	1.106	1.060	1.084	1.027	1.209	1.070	1.086	0.984	0.000
Total	8.059	8.053	8.055	8.052	8.066	8.050	8.056	8.049	8.053	8.053	8.056	8.060	8.048	8.052	7.677

Sample	Grt_31	Grt_32	Grt_33	Grt_34	Grt_35	Grt_36
SiO2	38.5	38.42	38.51	38.62	38.53	38.54
TiO2	0.0997	0.1788	0.1570	0.1110	0.0975	0.1169
Al2O3	20.68	20.32	20.48	21.53	20.90	20.82
FeO	22.48	22.85	22.36	23.36	23.05	22.70
MnO	0.551	0.630	0.433	0.249	0.272	0.436
MgO	4.63	4.72	4.76	6.34	5.70	5.12
CaO	13.52	13.48	13.81	10.42	11.42	12.60
Total	100.46	100.60	100.51	100.63	99.97	100.33

Formula	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)	12(O)
Si	2.993	2.991	2.993	2.974	2.995	2.992
Ti	0.006	0.010	0.009	0.006	0.006	0.007
Al	1.895	1.864	1.876	1.954	1.914	1.905
Fe++	1.461	1.488	1.453	1.504	1.498	1.474
Mn	0.036	0.042	0.029	0.016	0.018	0.029
Mg	0.537	0.548	0.551	0.728	0.660	0.593
Ca	1.126	1.124	1.150	0.860	0.951	1.048
Total	8.054	8.067	8.060	8.043	8.042	8.048

Análises químicas de plagioclásio – NESG-72U

Sample	PI_01	PI_02	PI_03	PI_04	PI_05	PI_06	PI_07	PI_08	PI_09	PI_10	PI_11	PI_12	PI_13	PI_14	PI_15	PI_16
SiO2	58.32	58.06	58.27	58.48	58.74	58.95	58.68	58.35	58.28	58.60	58.01	58.95	58.83	59.65	59.53	59.43
TiO2	0.000	0.022	0.000	0.000	0.009	0.000	0.060	0.003	0.000	0.041	0.019	0.000	0.010	0.019	0.058	0.042
Al2O3	25.57	26.01	25.84	25.76	25.41	25.52	25.65	25.41	25.75	25.29	25.33	25.45	25.43	25.15	25.46	25.46
FeO	0.0103	0.0231	0.0136	0.0278	0.0183	0.0457	0.0198	0.0216	0.0265	0.0673	0.1461	0.0956	0.1100	0.0292	0.0293	0.0638
MnO	0.0012	0.0000	0.0081	0.0000	0.0000	0.0000	0.0033	0.0225	0.0000	0.0072	0.0065	0.0000	0.0000	0.0014	0.0076	0.0011
MgO	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030
CaO	8.890	9.240	9.030	9.100	8.690	8.780	8.770	8.820	8.940	8.500	8.640	8.660	8.600	0.000	0.002	0.005
Na2O	6.84	6.77	6.75	6.80	6.85	6.72	6.79	6.80	6.76	7.02	6.73	6.87	6.95	6.80	6.77	6.67
K2O	0.3709	0.2707	0.3450	0.3090	0.2605	0.3279	0.4062	0.3391	0.3376	0.3962	0.3718	0.4007	0.4292	0.0018	0.0000	0.0001
TOTAL	100.00	100.41	100.26	100.48	99.98	100.34	100.38	99.77	100.09	99.92	99.25	100.43	100.36	91.65	91.86	91.70
Oxygens	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.617	2.598	2.609	2.613	2.632	2.632	2.622	2.624	2.613	2.631	2.622	2.632	2.630	2.800	2.789	2.788
Al	1.353	1.372	1.364	1.356	1.342	1.343	1.351	1.347	1.361	1.338	1.350	1.339	1.340	1.392	1.406	1.408
Ti	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001
Fe	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.006	0.004	0.004	0.001	0.001	0.003
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
Ca	0.428	0.443	0.433	0.436	0.417	0.420	0.420	0.425	0.429	0.409	0.418	0.414	0.412	0.000	0.000	0.000
Na	0.595	0.587	0.586	0.589	0.595	0.582	0.588	0.593	0.588	0.611	0.590	0.595	0.602	0.619	0.615	0.607
K	0.021	0.015	0.020	0.018	0.015	0.019	0.023	0.019	0.019	0.023	0.021	0.023	0.024	0.000	0.000	0.000
Total	5.014	5.017	5.012	5.012	5.002	4.997	5.007	5.009	5.011	5.016	5.008	5.007	5.013	4.813	4.814	4.810

Sample	PI_17	PI_18	PI_19	PI_20	PI_21	PI_22	PI_23	PI_24	PI_25	PI_26	PI_27	PI_28	PI_29	PI_30
SiO2	58.52	58.40	58.41	55.81	57.50	57.60	57.99	57.91	58.92	59.59	59.06	58.51	58.58	58.74
TiO2	0.013	0.000	0.069	0.000	0.000	0.000	0.039	0.000	0.036	0.000	0.039	0.000	0.000	0.036
Al2O3	25.50	25.24	25.58	27.09	25.77	26.05	25.47	25.72	25.36	25.12	25.45	25.56	25.51	25.28
FeO	0.0978	0.1989	0.0247	0.0203	0.1526	0.1351	0.0792	0.2908	0.0548	0.0337	0.0132	0.0454	0.0157	0.0803
MnO	0.0000	0.0000	0.0000	0.0100	0.0000	0.0143	0.0000	0.0195	0.0112	0.0043	0.0037	0.0000	0.0000	0.0016
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.003
CaO	8.600	8.620	8.730	10.790	9.220	9.390	8.610	8.870	8.530	0.002	8.670	8.520	8.820	8.530
Na2O	6.85	6.75	6.84	5.84	6.61	6.60	6.80	6.70	6.80	6.82	7.06	7.09	6.91	7.13
K2O	0.3593	0.4903	0.3981	0.2571	0.3391	0.3201	0.3839	0.3510	0.3662	0.0007	0.1661	0.2058	0.2544	0.1790
TOTAL	99.94	99.70	100.05	99.82	99.59	100.11	99.37	99.86	100.08	91.58	100.46	99.93	100.09	99.98
Oxygens	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.626	2.629	2.619	2.524	2.596	2.588	2.618	2.606	2.637	2.800	2.633	2.624	2.624	2.633
Al	1.348	1.339	1.352	1.444	1.371	1.380	1.355	1.364	1.338	1.391	1.337	1.351	1.347	1.336
Ti	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
Fe	0.004	0.007	0.001	0.001	0.006	0.005	0.003	0.011	0.002	0.001	0.000	0.002	0.001	0.003
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.413	0.416	0.419	0.523	0.446	0.452	0.417	0.428	0.409	0.000	0.414	0.409	0.423	0.410
Na	0.596	0.589	0.595	0.512	0.579	0.575	0.595	0.585	0.590	0.621	0.610	0.617	0.600	0.620
K	0.021	0.028	0.023	0.015	0.020	0.018	0.022	0.020	0.021	0.000	0.009	0.012	0.015	0.010
Total	5.008	5.010	5.011	5.018	5.017	5.019	5.012	5.014	4.998	4.815	5.007	5.015	5.010	5.013

Análises químicas de anfibólio – NESG-72U

Sample	Anf_1	Anf_2	Anf_3	Anf_4	Anf_5	Anf_6	Anf_7	Anf_8	Anf_9	Anf_10	Anf_11	Anf_12	Anf_13	Anf_14
SiO2	39.97	40.02	39.95	40.19	40.53	40.52	40.16	40.14	40.21	40.40	40.53	40.63	40.20	40.24
TiO2	2.06	1.97	2.00	2.05	2.07	1.86	1.90	1.84	2.06	1.58	1.75	1.79	1.87	1.65
Al2O3	16.29	16.13	15.84	16.16	16.11	16.04	16.15	16.04	16.21	15.95	15.85	16.23	16.05	16.33
FeO	13.72	13.44	13.97	13.66	13.56	13.72	13.92	13.88	13.74	13.66	13.67	13.81	13.66	13.71
MnO	0.0386	0.0121	0.0339	0.0221	0.0322	0.0422	0.0417	0.0386	0.0359	0.0401	0.0539	0.0259	0.0191	0.0124
MgO	10.63	10.72	10.57	10.55	10.48	10.62	10.50	10.47	10.39	10.66	10.77	10.48	10.62	10.48
CaO	12.08	12.12	12.28	12.15	12.25	12.38	12.30	12.36	12.47	12.35	12.34	12.24	12.32	12.46
Na2O	1.52	1.41	1.32	1.46	1.45	1.40	1.36	1.36	1.30	1.46	1.37	1.41	1.40	1.31
K2O	2.17	2.12	2.17	2.29	2.22	2.24	2.24	2.18	2.14	2.08	2.13	2.25	2.07	1.99
TOTAL	98.48	97.94	98.14	98.53	98.70	98.82	98.57	98.31	98.55	98.18	98.46	98.87	98.21	98.18
Oxygens	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Si	5.931	5.959	5.959	5.960	5.991	5.990	5.960	5.971	5.960	6.006	6.008	6.000	5.975	5.978
Al	2.849	2.831	2.785	2.825	2.807	2.795	2.825	2.813	2.832	2.795	2.769	2.825	2.812	2.859
Ti	0.230	0.221	0.224	0.229	0.230	0.207	0.212	0.206	0.230	0.177	0.195	0.199	0.209	0.184
Fe	1.703	1.674	1.743	1.694	1.676	1.696	1.728	1.727	1.703	1.698	1.695	1.705	1.698	1.703
Mn	0.005	0.002	0.004	0.003	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.007	0.003	0.002	0.002
Mg	2.351	2.380	2.350	2.332	2.309	2.340	2.323	2.322	2.296	2.362	2.380	2.307	2.353	2.321
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.921	1.934	1.963	1.931	1.940	1.961	1.956	1.970	1.981	1.967	1.960	1.937	1.962	1.983
Na	0.437	0.407	0.383	0.420	0.416	0.401	0.391	0.392	0.372	0.421	0.394	0.404	0.403	0.378
K	0.411	0.403	0.413	0.433	0.419	0.422	0.424	0.414	0.405	0.394	0.403	0.424	0.392	0.377
Total	15.838	15.809	15.823	15.826	15.792	15.818	15.823	15.819	15.783	15.827	15.810	15.803	15.808	15.786

Sample	Anf_15	Anf_16	Anf_17	Anf_18	Anf_19	Anf_20
SiO2	40.45	40.23	40.46	40.42	40.56	40.52
TiO2	1.88	1.93	2.02	1.86	1.83	1.56
Al2O3	16.14	16.25	16.02	15.79	15.79	15.68
FeO	14.08	13.64	13.74	13.85	13.63	13.97
MnO	0.0134	0.0304	0.0391	0.0355	0.0382	0.0476
MgO	10.46	10.36	10.40	10.62	10.69	10.67
CaO	12.28	12.25	12.43	12.31	12.32	12.38
Na2O	1.33	1.35	1.30	1.29	1.39	1.34
K2O	2.02	2.02	2.03	2.06	2.11	1.84
TOTAL	98.65	98.06	98.44	98.24	98.36	98.01
Oxygens	23	23	23	23	23	23
Si	5.988	5.981	5.997	6.007	6.017	6.033
Al	2.816	2.848	2.799	2.766	2.761	2.752
Ti	0.209	0.216	0.225	0.208	0.204	0.175
Fe	1.743	1.696	1.703	1.721	1.691	1.740
Mn	0.002	0.004	0.005	0.004	0.005	0.006
Mg	2.308	2.296	2.298	2.353	2.364	2.368
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.948	1.952	1.974	1.960	1.958	1.975
Na	0.381	0.389	0.373	0.372	0.400	0.388
K	0.381	0.383	0.384	0.391	0.399	0.349
Total	15.776	15.765	15.757	15.783	15.798	15.785

Análises químicas de biotita – NESG-72U

Sample	Bt_01	Bt_02	Bt_03	Bt_04	Bt_05	Bt_06	Bt_07	Bt_08	Bt_09	Bt_10	Bt_11	Bt_12	Bt_13	Bt_14	Bt_15
SiO2	36.71	37.04	36.62	37.20	36.08	35.19	36.40	36.76	37.12	36.76	36.66	36.28	36.10	36.18	34.55
TiO2	3.79	3.61	3.30	3.36	3.33	2.70	2.71	2.71	2.68	2.58	2.69	2.82	2.66	2.85	3.27
Al2O3	17.11	16.97	17.10	17.29	16.90	16.92	17.53	17.31	17.33	17.70	17.45	17.13	17.21	17.38	16.16
FeO	15.42	14.96	15.18	14.68	15.36	15.08	15.25	15.03	14.72	15.20	14.96	15.67	15.82	15.48	15.18
MnO	0.021	0.023	0.000	0.000	0.000	0.014	0.024	0.005	0.010	0.016	0.027	0.024	0.016	0.021	0.019
MgO	12.92	12.97	13.25	13.18	13.70	13.39	12.99	13.19	13.61	12.87	12.80	12.88	12.96	12.46	13.40
CaO	0.0264	0.0175	0.0077	0.0124	0.0346	0.0267	0.0225	0.0000	0.0165	0.0072	0.0184	0.0461	0.0259	0.0391	0.0364
Na2O	0.081	0.080	0.053	0.021	0.069	0.039	0.021	0.027	0.035	0.000	0.039	0.040	0.028	0.024	0.037
K2O	9.70	9.71	9.63	9.69	9.37	9.74	10.31	10.03	10.03	10.00	9.74	10.10	9.80	9.75	9.65
TOTAL	95.78	95.38	95.14	95.43	94.84	93.10	95.26	95.06	95.55	95.13	94.38	94.99	94.62	94.18	92.30
Oxygens	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Si	2.731	2.759	2.739	2.762	2.711	2.703	2.731	2.753	2.760	2.751	2.760	2.734	2.729	2.741	2.686
Al	1.501	1.490	1.507	1.513	1.497	1.532	1.550	1.528	1.519	1.561	1.549	1.522	1.534	1.552	1.481
Ti	0.212	0.202	0.186	0.188	0.188	0.156	0.153	0.153	0.150	0.145	0.152	0.160	0.151	0.162	0.191
Fe	0.960	0.932	0.949	0.912	0.965	0.969	0.957	0.942	0.915	0.951	0.942	0.988	1.000	0.981	0.987
Mn	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
Mg	1.433	1.440	1.477	1.459	1.535	1.533	1.453	1.473	1.508	1.436	1.437	1.447	1.461	1.407	1.553
Ca	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.004	0.002	0.003	0.003
Na	0.012	0.012	0.008	0.003	0.010	0.006	0.003	0.004	0.005	0.000	0.006	0.006	0.004	0.004	0.006
K	0.921	0.923	0.919	0.918	0.898	0.954	0.987	0.958	0.951	0.955	0.935	0.971	0.945	0.942	0.957
Total	7.772	7.761	7.785	7.754	7.806	7.855	7.836	7.811	7.809	7.801	7.784	7.833	7.827	7.794	7.864

Sample	Bt_16	Bt_17	Bt_18	Bt_19	Bt_20
SiO2	36.29	34.58	35.46	34.14	36.36
TiO2	3.33	3.10	3.55	3.58	3.58
Al2O3	17.23	16.41	17.68	17.31	18.23
FeO	15.13	14.93	17.55	17.41	16.92
MnO	0.011	0.032	0.031	0.045	0.012
MgO	12.55	13.01	10.07	10.15	10.50
CaO	0.0357	0.0096	0.0784	0.0473	0.2665
Na2O	0.000	0.006	0.034	0.041	0.044
K2O	9.84	9.78	9.81	9.66	9.84
TOTAL	94.42	91.86	94.26	92.38	95.75
Oxygens	11	11	11	11	11
Si	2.739	2.698	2.716	2.678	2.725
Al	1.533	1.509	1.596	1.600	1.611
Ti	0.189	0.182	0.205	0.211	0.202
Fe	0.955	0.974	1.124	1.142	1.061
Mn	0.001	0.002	0.002	0.003	0.001
Mg	1.412	1.513	1.150	1.187	1.173
Ca	0.003	0.001	0.006	0.004	0.021
Na	0.000	0.001	0.005	0.006	0.006
K	0.947	0.973	0.958	0.966	0.941
Total	7.779	7.853	7.763	7.797	7.741

Análises químicas de titanita – NESG-72

Sample	Ttn_01	Ttn_02	Ttn_03	Ttn_04	Ttn_05	Ttn_06	Ttn_07	Ttn_08	Ttn_09	Ttn_10	Ttn_11	Ttn_12	Ttn_13	Ttn_14	Ttn_15
SiO2	31.54	31.43	31.76	31.22	31.18	31.59	31.20	31.33	31.48	31.64	31.40	31.38	31.74	31.58	31.45
TiO2	36.09	36.36	37.25	37.18	36.28	36.15	36.69	36.92	36.44	36.33	37.04	37.23	36.90	36.78	35.94
Al2O3	2.100	2.150	2.180	1.749	2.230	2.150	2.050	1.827	2.130	2.170	1.874	1.689	2.030	1.852	1.970
FeO	0.588	0.554	0.607	0.728	0.678	0.784	0.812	0.748	0.562	0.406	0.394	0.511	0.419	0.540	0.464
MnO	0.009	0.009	0.004	0.034	0.031	0.024	0.019	0.029	0.030	0.014	0.000	0.007	0.014	0.028	0.013
MgO	0.0036	0.0337	0.0068	0.0368	0.0266	0.012	0.0334	0.0489	0.0056	0.0111	0.0184	0.028	0.0191	0.0318	0.0112
CaO	27.81	27.77	27.55	27.14	27.32	27.46	27.58	27.13	27.51	27.68	28.01	27.66	27.70	27.59	27.79
Na2O	0.000	0.034	0.008	0.009	0.026	0.024	0.019	0.023	0.023	0.002	0.023	0.030	0.000	0.023	0.020
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	98.14	98.34	99.37	98.10	97.77	98.19	98.40	98.06	98.18	98.25	98.76	98.53	98.82	98.42	97.66
Oxygens	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Si	1.042	1.036	1.035	1.032	1.034	1.043	1.030	1.036	1.039	1.042	1.031	1.033	1.040	1.040	1.044
Al	0.082	0.084	0.084	0.068	0.087	0.084	0.080	0.071	0.083	0.084	0.073	0.066	0.078	0.072	0.077
Ti	0.896	0.902	0.913	0.924	0.905	0.897	0.911	0.918	0.904	0.900	0.915	0.922	0.909	0.911	0.897
Fe	0.016	0.015	0.017	0.020	0.019	0.022	0.022	0.021	0.016	0.011	0.011	0.014	0.011	0.015	0.013
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Mg	0.000	0.002	0.000	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Ca	0.984	0.981	0.962	0.961	0.971	0.971	0.975	0.961	0.973	0.977	0.986	0.976	0.972	0.973	0.988
Na	0.000	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	3.021	3.022	3.011	3.010	3.019	3.019	3.021	3.011	3.016	3.016	3.018	3.013	3.012	3.014	3.021

Sample	Ttn_16	Ttn_17	Ttn_18	Ttn_19	Ttn_20	Ttn_21	Ttn_22	Ttn_23	Ttn_24	Ttn_25	Ttn_26	Ttn_27
SiO2	31.61	31.46	31.67	31.71	31.59	31.49	31.92	31.93	31.37	31.58	31.96	31.50
TiO2	36.27	36.65	36.83	36.06	37.14	37.20	37.10	37.66	37.31	37.41	37.47	37.76
Al2O3	2.120	2.120	1.687	2.150	1.930	1.863	1.543	1.538	1.773	1.920	1.847	2.030
FeO	0.457	0.447	0.493	0.375	0.339	0.387	0.477	0.433	0.369	0.598	0.470	0.519
MnO	0.007	0.022	0.017	0.023	0.000	0.015	0.019	0.000	0.018	0.011	0.020	0.022
MgO	0.00	0.0032	0.0243	0.0242	0.0051	0.0083	0.0287	0.0259	0.0222	0.0214	0.0269	0.0114
CaO	27.76	27.44	27.73	27.43	28.04	27.62	27.68	28.39	28.02	27.97	28.12	27.87
Na2O	0.011	0.026	0.011	0.021	0.000	0.013	0.020	0.027	0.030	0.024	0.020	0.044
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	98.24	98.17	98.46	97.79	99.04	98.60	98.79	100.00	98.91	99.53	99.93	99.76
Oxygens	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Si	1.042	1.037	1.042	1.048	1.034	1.035	1.047	1.036	1.029	1.030	1.037	1.024
Al	0.082	0.082	0.065	0.084	0.074	0.072	0.060	0.059	0.069	0.074	0.071	0.078
Ti	0.899	0.909	0.912	0.897	0.914	0.919	0.915	0.919	0.921	0.917	0.914	0.923
Fe	0.013	0.012	0.014	0.010	0.009	0.011	0.013	0.012	0.010	0.016	0.013	0.014
Mn	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Mg	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ca	0.981	0.970	0.978	0.972	0.983	0.972	0.972	0.987	0.985	0.977	0.977	0.971
Na	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.003
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	3.018	3.013	3.013	3.014	3.015	3.011	3.010	3.016	3.017	3.017	3.015	3.015