



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Caracterização petrológica, química e isotópica do edifício
3 do Complexo Vulcânico La Hoyada e suas implicações
para o vulcanismo nos Andes Centrais, Puna Austral,
Catamarca

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº396

GABRIEL DE SOUZA FRANCO

Orientador: Prof. Dr. Massimo Matteini

BRASÍLIA-DF

JUNHO DE 2017



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Caracterização petrológica, química e isotópica do edifício
3 do Complexo Vulcânico La Hoyada e suas implicações
para o vulcanismo nos Andes Centrais, Puna Austral,
Catamarca

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Autor: GABRIEL DE SOUZA FRANCO

Orientador: Prof. Dr. Massimo Matteini

BANCA EXAMINADORA:

Presidente da banca: Prof Dr Nilson Francisquini Botelho

Examinador Interno: Prof Dr Valmir da Silva Souza

Examinador Externo: Prof Dr Jose Araújo Nogueira Neto (UFG)

Examinador Interno: Prof^a Dr^a Catarina Laboure Bemfica Toledo (suplente)

Brasília-DF

junho de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha pequena família que encolheu ainda mais durante o curso deste mestrado. Minha mãe Luiza e minha avó Conceição foram indispensáveis tanto no apoio quanto financiando não apenas da passagem e estadia em Salta, como até mesmo duas amostras que foram enviadas para geoquímica.

Em segundo lugar quero agradecer a meu orientador, que apesar de barreiras de saúde, me orientou.

Em terceiro lugar, agradeço aos professores Natalia e Nilson pelo auxílio na conclusão desta dissertação. Agradeço ainda à professora Catarina pelo provimento de uma amostra que foi utilizada para calibrar o método empregado na medição de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em minerais.

Gostaria de estender meus agradecimentos aos amigos que me apoiaram e acreditaram mesmo quando as situações foram extremamente adversas. Aqui se destacam Gabrielle, Karen, Kellin, Lilia e Hammel.

Em seguida, menciono as pessoas ligadas à academia que acreditaram no meu potencial como geólogo e, desta forma, foram fonte de perseverança para a conclusão desta dissertação.

Friso também a importância das pessoas diretamente responsáveis pela obtenção dos dados aqui discutidos Karin e Geane na Geocronologia, Francisca, Raimundo, Adalgisa e Edna na Laminação e Isabela, Jacqueline, Iris, Federico, Pedro e Nilson na Microsonda.

Sumário

| | |
|--|----|
| Capítulo 1 - Introdução..... | 1 |
| 1.1 - Estruturação..... | 1 |
| 1.2 - Objetivos e motivações..... | 1 |
| 1.3 - Localização e vias de acesso..... | 2 |
| 1.4 - Os Andes..... | 4 |
| 1.5 - A Puna..... | 6 |
| 1.6 - Delaminação litosférica..... | 7 |
| Capítulo 2 - Geologia da área de estudo..... | 9 |
| 2.1 - Estratigrafia da região e unidades adjacentes..... | 9 |
| 2.2 - O Complexo Vulcânico La Hoyada..... | 11 |
| Capítulo 3 - Mineral Chemistry, Geochemistry, Sr and Nd isotopes in La Hoyada Volcanic Complex and the implications for Miocene-Pliocene magmatism in the Southern Puna, Catamarca, Argentina..... | 16 |
| 3.1 - Introduction..... | 16 |
| 3.2 - Materials and Methods..... | 17 |
| 3.2.1 - Geochemistry..... | 17 |
| 3.2.2 - Electronic Microprobe..... | 17 |
| 3.2.3 - Thermal Ionisation Mass Spectrometer..... | 18 |
| 3.2.4 - Plagioclase and clinopyroxene Sr isotopes..... | 18 |
| Capítulo 4 - Results..... | 20 |
| 4.1 - Sample description..... | 20 |
| 4.2 - Geochemistry..... | 22 |
| 4.3 - Mineral chemistry..... | 28 |
| 4.4 - Sr and Nd isotopes..... | 42 |
| 4.5 - Plagioclase and clinopyroxene Sr isotopes..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Capítulo 5 - Discussions..... | 47 |
| 5.1 - General aspects..... | 47 |
| 5.2 - Petrographic aspects..... | 47 |
| 5.3 - Geochemistry..... | 48 |
| 5.4 - Source considerations..... | 52 |
| 5.5 - Sr and Nd isotopes..... | 53 |
| 5.6 - Modelling..... | 54 |
| 5.7 - Plagioclase and clinopyroxene Sr isotopes..... | 56 |
| Capítulo 6 - Conclusions..... | 58 |
| Capítulo 7 - References..... | 60 |
| Anexo I - Petrografia..... | I |
| Anexo II - Química mineral..... | XV |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Caminho de Salta até a região do Complexo Vulcânico La Hoyada, na Província de Catamarca. Em detalhe, a localização de Salta, assinalada em vermelho, na República Argentina. Fonte: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNESA, USDA FSA, USGS, AEX, Get mapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo and the GIS User Community..... | 3 |
| Figura 2: Subdivisão das zonas de atividade magmática nos Andes, com indicações de profundidade da placa tectônica que mergulha. Adaptado de Ramos & Aleman (2000)..... | 5 |
| Figura 3: Os dois modelos mais aceitos de delaminação litosférica a) Descolamento da base com marcação da região mais sujeita a sofrer deformações b) Drip (Adaptado de Göğüş & Pysklywek,2008)..... | 8 |
| Figura 4: Mapa geológico da região. Adaptado de Montero López et al. (2010b)..... | 10 |
| Figura 5: Complexo Vulcânico La Hoyada. Adaptado de Montero López (2010b)..... | 11 |
| Figura 6: Estratigrafia do Complexo Vulcânico La Hoyada. Adaptado de Bustos (2015)..... | 13 |
| Figura 7: Distribuição areal do Complexo Vulcânico La Hoyada com suas respectivas datações obtidas até o momento. Adaptado de Bustos (2015)..... | 15 |
| Figure 8: Stratigraphic positions of the samples that have undergone mineral chemistry analyses..... | 21 |
| Figure 9: Classification diagrams for La Hoyada volcanic rocks a) after Le Bas et al. (1986) with division between alkaline and subalkaline domains by Irvine & Baragar (1971) b) into orogenic suites after Pecерillo & Taylor (1976)..... | 22 |
| Figure 10: Harker diagrams using SiO ₂ as the differentiation index for all major and minor elements..... | 23 |
| Figure 11: Harker diagrams using SiO ₂ as the differentiation index for trace elements..... | 25 |
| Figure 12: Rare earth element patterns by volcanic edifice in the La Hoyada Volcanic Complex using the CI chondrite by Sun & McDonough (1989) as the normalization factor. E-MORB and N-MORB compositions McDonough & Sun (1995)..... | 26 |
| Figure 13: Rare earth element a) Gd _N /Yb _N vs. La _N /Sm _N b) Gd _N /Yb _N vs. La _N /Yb _N c) La _N /Sm _N vs. La _N /Yb _N | 27 |
| Figure 14: a) Diagram to classify olivine crystals with regards to their forsterite and fayalite contents. b) Forsterite contents vs. NiO(%)..... | 28 |
| Figure 15: Sample Mg# vs. forsterite content to analyze equilibrium between crystals and the rock. The middle black line is the ideal equilibrium. The upper and lower lines show the | |

| | |
|---|-----|
| boundaries of equilibrium compositions accepted $Kd(Fe-Mg)=0.3\pm 0.03$ after Roeder & Emslie (1970)..... | 29 |
| Figure 16: a) Trioctahedral mica b) TiO_2 vs. Mg^* showing the high TiO_2 content of the glomerocryst analyzed..... | 30 |
| Figure 17: Classification of amphibole grains from La Hoyada after Leake et al. (1997)..... | 31 |
| Figure 18: Geothermobarometric results after Ridolfi et al. (2009) from a) edifice 3 b) edifices 2, 4 and 6..... | 35 |
| Figure 19: Classification of pyroxenes according to their alkaline character after Morimoto et al. (1988)..... | 36 |
| Figure 20: Half triangular diagram displaying pyroxene composition after Morimoto et al. (1988)..... | 37 |
| Figure 21: Clinopyroxene equilibrium between the crystals and the whole-rock compositions. The black lines show the equilibrium limits after Roeder & Emslie (1970)..... | 37 |
| Figure 22: Plagioclase compositions..... | 39 |
| Figure 23: T_{DM} ages of LHVC. The blue C line represents the CHUR and the red DM represents the depleted mantle evolution..... | 42 |
| Figure 24: Incompatible element spidergrams for La Hoyada separated by rock type using the chondrite by Thompson et al. (1982) as the normalization factor. E-MORB and N-MORB compositions McDonough & Sun (1995)..... | 49 |
| Figure 25: SiO_2 vs Ta/Nb showing the fractionation that is coeval with magmatic differentiation..... | 50 |
| Figure 26: a) Zr/Nb vs. Ba/Nb b) Fe_2O_3 vs. La/Sr c) Nb vs. Nb/Ta | 51 |
| Figure 27: a) Incompatible element spidergram using the chondrite by Thompson (1982) as the normalizing factor b) REE spidergram using the CI chondrite by Sun & McDonough (1989) as the normalizing factor. E-MORB and N-MORB compositions McDonough & Sun (1995)..... | 52 |
| Figure 28: a) SiO_2 vs. $^{87}Sr/^{86}Sr$ b) SiO_2 vs. $^{143}Nd/^{144}Nd$ c) $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs. $^{143}Nd/^{144}Nd$ displaying the composition of mantle reservoirs..... | 54 |
| Figure 29: Modelling of the isotopic variation on account of wall-rock assimilation by the La Hoyada volcanic rocks. The longest lines correspond to AFC having GLOSS as the contaminant, whereas the shortest have Sia 70/2. Initial compositions are LHN273 and LHE13. The partition coefficients are from Ronov & Yaroshevskiy (1976). Cerro Galán compositions were taken from Francis et al. (1989)..... | 55 |
| Figura 30: a) Fenocristal de olivina. b) Fenocristal de plagioclásio com núcleo reabsorvido. c) Aglomerado de plagioclásio e piroxênio..... | I |
| Figura 31: a) Amostra macroscópica do traquiandesito LH 181. b) Fenocristal de ortopiroxênio. c) Fenocristal de plagioclásio com interface reabsorvida. d) Fenocristal de olivina com corona de ortopiroxênio, visivelmente situado na porção de vidro mais escura..... | III |

- Figura 32: a) Biotita com plagioclásio de bordas reabsorvidas ao lado. b) Seção de biotita com corona de anfibólio em meio a xenocristal de quartzo e fenocristais de plagioclásio tanto com borda em peneira quanto homogêneo e sem zonação. c) Fenocristal de olivina com corona de piroxênio. d) Cristal de titanita. e) Cristais de plagioclásio com bordas reabsorvidas.....IV
- Figura 33: a) Amostra macroscópica do andesito LHE12B. b) Cristal de ortopiroxênio. c) Cristal de plagioclásio exibindo a intensa zonação.....V
- Figura 34: a) Amostra macroscópica do dacito LHE12D. b) Cristal de ortopiroxênio.....VI
- Figura 35: a) Amostra macroscópica do andesito LHE12G. b) Estrutura com cristais de clinopiroxênio nas bordas. c) Cristal de anfibólio. d) Cristal de plagioclásio com núcleo reabsorvido.....VII
- Figura 36: a) Cristal de plagioclásio com núcleo reabsorvido. b) Aglomerado de anfibólio e plagioclásio. c) Cristal de anfibólio o lado de um cristal de olivina. d) Cristal de olivina com borda oxidada e corona de plagioclásio. e) Aglomerado de plagioclásio, anfibólio e piroxênio.....VIII
- Figura 37: a) Cristais de anfibólio. b) Cristal de plagioclásio com núcleo reabsorvido.....IX
- Figura 38: a) Amostra macroscópica do traquiandesito LHE302. b) Cristal de clinopiroxênio. c) Cristais de plagioclásio com núcleos e bordas limpos.....X
- Figura 39: a) Amostra macroscópica do andesito LHE303. b) Cristal de piroxênio. c) Cristal de clinopiroxênio associado a cristais de plagioclásio.....XI
- Figura 40: a) Fenocristal de clinopiroxênio de núcleo esverdeado. b) Fenocristal de anfibólio com plagioclásio ao redor. c) Fenocristal de olivina de bordas oxidadas. d) Fenocristal de ortopiroxênio. e) Fenocristal de plagioclásio com bordas reabsorvidas.....XII
- Figura 41: a) Biotita repleta de inclusões opacas. b) Cristal de clinopiroxênio ao lado de fenocristais limpos de plagioclásio. c) Fenocristal de anfibólio com corona de ortopiroxênio. d) Fenocristal de plagioclásio limpo e homogêneo.....XIII
- Figura 42: a) Aglomerado de hornblenda, plagioclásio e clinopiroxênio. b) Aglomerado de clinopiroxênio. c) Fenocristal plagioclásio com intensa zonação.....XIV
- Figura 43: a) Amostra macroscópica do traquiandesito LHN21E. b) Fenocristais de hornblenda. c) Fenocristal de plagioclásio com núcleo reabsorvido.....XV

RESUMO

Aqui são apresentados dados de química mineral, geoquímica e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de grãos de plagioclásio e clinopiroxênio do Complexo Vulcânico La Hoyada. La Hoyada se localiza na borda sul do Planalto Puna-Altiplano, na Zona Vulcânica Central, na Cordilheira dos Andes, NW da Argentina and abrange 5.66Ma, assim sendo ideal para estudo das mudanças químicas na Puna de 7.04My até 1.38My, um intervalo no qual vulcanismo bimodal apareceu nesta região. O complexo é dividido em seis edifícios vulcânicos com distintos períodos de duração. A sequência basal abarca o primeiro edifício e a primeira litologia do edifício 4, com composições mais evoluídas. Há 4.63My, isto passou à sequência intermediária, durante a qual a maioria dos edifícios coexistiram e o magmatismo migrou em sentido norte, amostrando rochas mais pobres em sílica. Por volta de 1.73My, o regime extensional se instalou na Puna Sul, facilitando a amostragem de alguns mamás parentais por meio do uso da estrutura já existente. Atividade magmática continuou a migrar em direção norte e todo o registro termina abruptamente com o vulcanismo explosivo do Complexo Cerro Blanco, que corta La Hoyada e culmina em magmatismo bimodal associado aos basaltos andesíticos encontrados no topo estratigráfico de La Hoyada. A multitude de minerais apresenta amplos intervalos composicionais e muito pouco padrão composicional ou zonação regular. Não somente xenólitos de quartzo, como também fenocristais desequilibrados permeiam estas rochas com estruturas em corona e peneira. Quanto mais alto estratigraficamente, mais comum se torna olivina e mais altos Mg# e TiO₂ dos minerais máficos. Geotermobarômetros em anfibólio e clinopiroxênio estão em desacordo com os aspectos texturais, reforçando magma mixing e assimilação da encaixante. O caráter cálcio-alcálico de alto K do complexo, no entanto, permaneceu intacto. Os dados geoquímicos mostram dois grupos distintos com diferentes magmas parentais que convergem composicionalmente para os espécimes mais ricos em SiO₂, novamente corroborando mistura entre estes dois grupos em estágios de diferenciação distintos. Contudo, AFC é clara nas rochas menos evoluídas também. Um terceiro magma parental é sugerido, porém os únicos espécimes encontrados têm SiO₂ maior que os supracitados.

ABSTRACT

Here are presented mineral chemistry, geochemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data of plagioclase and clinopyroxene crystals of the La Hoyada Volcanic Complex. La Hoyada sits on the southernmost edge of the Puna-Altiplano Plateau, in the Central Volcanic Zone, in the Andes, NW Argentina and spans 5.66Ma, thus being ideal to probe the chemical changes in the Puna from 7.04My through 1.38My, an interval in which volcanic bimodalism emerged in this region. Divided in six volcanic edifices with distinct time spans, its basal sequence comprises the first edifice and the first lithology of edifice 4, with more evolved compositions. At 4.63My, this grades into the middle sequence, during which the majority of the edifices coexisted and magmatism moved northwards sampling silica-poorer rocks. Around 1.73My, extensional regimen started in the southern Puna facilitating the sampling of some parental magmas through the use of the previously existing structure. Magmatic activity kept migrating northwards and all the record ends abruptly with the cross-cutting explosive acidic volcanism in Cerro Blanco Complex, culminating in bimodal magmatism with the associated La Hoyada basaltic andesites. The plethora of minerals show broad composition intervals and very little compositional pattern or regular zoning. Not only quartz xenocrysts, but also unequilibrated phenocrysts permeate these rocks with sieve and corona textures. The higher we go in the stratigraphy, the more common olivine becomes and the higher Mg# and TiO₂ contents mafic minerals have. Amphibole and clinopyroxene geothermometers do not follow textural aspects, thus reinforcing wall-rock assimilation and magma mixing. The high-K calc-alkaline character of the complex, however, remained unchanged. The geochemistry data shows two distinct groups with different parental magmas that compositionally converge towards the silica-richest specimens, again supporting mixing between these two groups in distinct differentiation stages. Nevertheless AFC is crystal clear from the least evolved rocks as well. A third parental magma is elusive, but the only samples found have higher SiO₂ contents than the abovementioned ones.

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Estruturação

Esta dissertação é composta pelos dois primeiros capítulos, que foram redigidos em português, com vistas a introduzir o objeto de estudo, o Complexo Vulcânico La Hoyada (CVLH). O primeiro destes discorre sobre questões genéricas tais como localização e aspectos gerais dos Andes. O seguinte capítulo trata do complexo vulcânico em si e das rochas estratigraficamente sobrepostas e sotopostas a este.

Em seguida, a dissertação passa ao formato de artigo com intenção de organizar um documento a ser submetido para Lithos. Os cinco capítulos que se sucedem são formados respectivamente pela metodologia empregada, resultados obtidos, discussões associadas, conclusões e referências bibliográficas.

Por último, encontram-se em anexo as descrições petrográficas das únicas catorze amostras disponibilizadas pela Universidad de Salta seguidas pelos resultados de química mineral aqui obtidos.

Cabe ainda ressaltar que diversos dados de geoquímica e isótopos de Sr e Nd de rocha total foram obtidos anteriormente na situação da tese de mestrado de Emilce Bustos, ainda que não tenham sido empregados corretamente. Grande parte destas análises de geoquímica de rocha total e todas as análises de isótopos de Sr e Nd foram pagas pela Universidade de Brasília devido ao projeto 255/14 do Programa CAPES/MINCYT TRADICIONAL, no edital 37/2013, tendo o Prof Dr Massimo Matteini como coordenador brasileiro e o Prof Dr José Germán Viramonte como coordenador argentino.

O Complexo Vulcânico La Hoyada, objeto de estudo desta dissertação, se situa no extremo sul da Puna Austral. As altitudes entre 3500 e 4500m aliadas ao clima inóspito com baixa pluviosidade, tornam a região de difícil acesso e portanto o conhecimento é ainda limitado.

Sua verdadeira identificação é iniciada em Seggiaro et al. (2000), seguida por individualização de diversas unidades adjacentes na Cordilheira de San Buenaventura por Montero Lopez (2009) e agregação de outros edifícios próximos por Bustos (2015).

1.2 - Objetivos e motivações

Este trabalho visa a apresentar as características petrológicas e geoquímicas do Complexo Vulcânico La Hoyada, bem como discutir as implicações genéticas e de processos magmáticos envolvidos nestas rochas encontradas na Zona Vulcânica Central (ZVC) dos Andes. Neste processo, destaca-se a aquisição dos primeiros dados de química mineral desta unidade litológica.

A importância decorre deste ser um centro vulcânico de longa duração que, ao longo de seus 8Ma, passou por variações composicionais e de regimes deformacionais que ilustram a conjuntura na Puna Austral ao longo deste período. Além disto, também se tem por objetivo contribuir para o entendimento da gênese dos magmas basálticos a basáltico-andesíticos no contexto dos últimos 8Ma na região supracitada. A importância disto decorre do fato que neste

período houve brusca mudança composicional destes magmas, marcados então por bimodalismo em um contexto de flare-up.

A escassez de dados na região é ainda agravada pelo acesso dificultado e o clima inóspito encontrado na região.

Por último, a reavaliação da estratigrafia do complexo se torna essencial, uma vez que sua definição começou há meramente 17 anos e poucos trabalhos foram desenvolvidos.

1.3 - Localização e vias de acesso

O Complexo Vulcânico La Hoyada está situado na Província de Catamarca, no Noroeste da República Argentina, entre 67°49' e 67°52'W a 26°50' e 26°52'S.

Para chegar à região de estudo a partir de Salta, localizada na província homônima, faz-se necessário viagem de aproximadamente 10 horas.

Esta viagem consiste em seguir a RN 68 em sentido Sul até Cafayate, seguido de tomar a RN 40 também em sentido Sul até Hualfín. Em seguida, toma-se a RP 43 em sentido Noroeste até El Peñon, passando por Puerta e Vila Vil.

A partir de El Peñon, é possível chegar à região do complexo vulcânico por meio de rota não pavimentada em direção sudoeste, passando pelo Campo da Pedra Pomez e chegando às imediações da Caldeira de Cerro Blanco e da área de estudo.

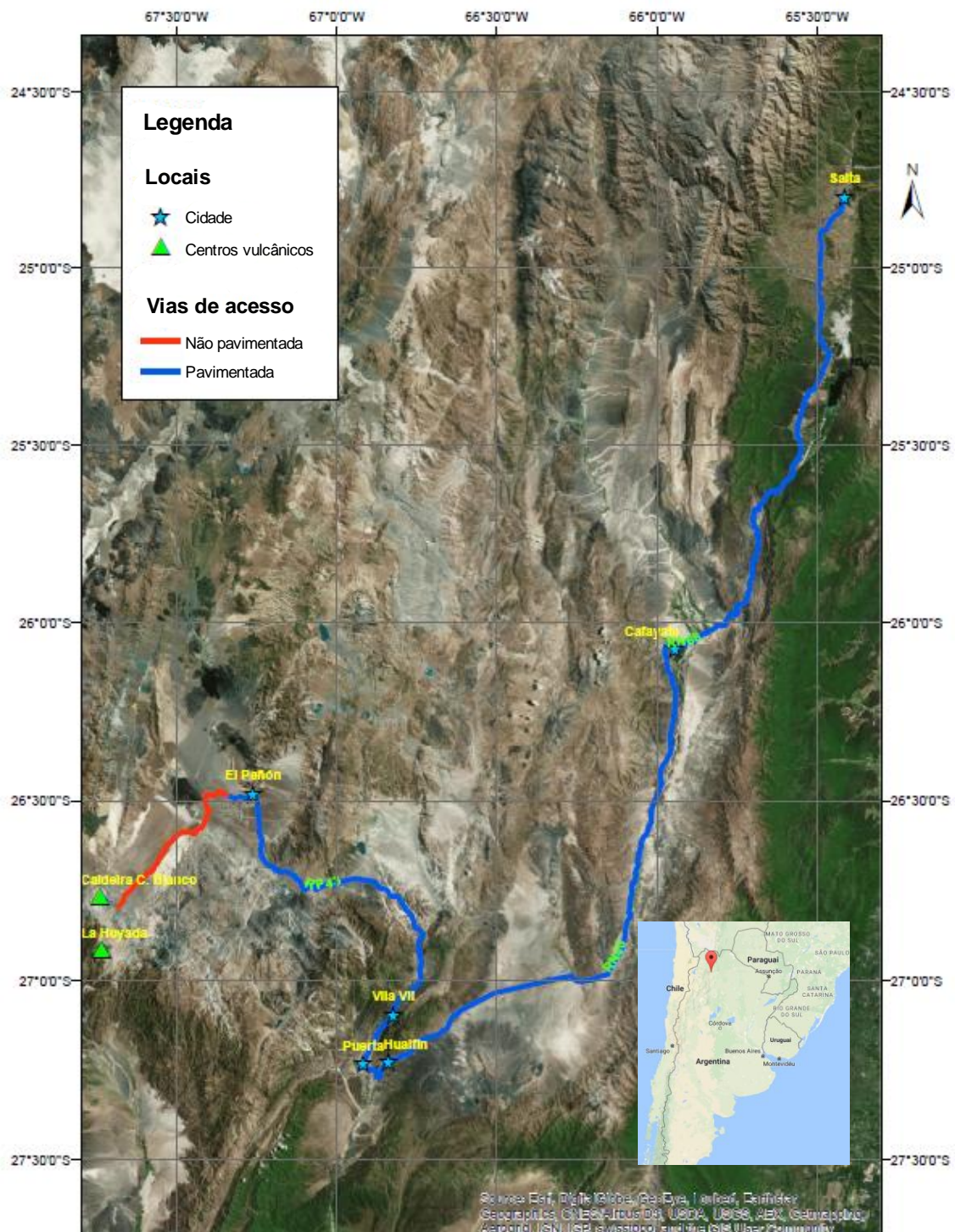


Figura 1: Caminho de Salta até a região do Complexo Vulcânico La Hoyada, na Província de Catamarca. Em detalhe, a localização de Salta, assinalada em vermelho, na República Argentina. Fonte: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNESA, USDA FSA, USGS, AEX, Get mapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo and the GIS User Community.

1.4 - Os Andes

Os Andes se estendem por 8000km ao longo da borda oeste do continente sul-americano (Jaillard et al., 2000)

Em linhas gerais, observa-se, ao longo dos Andes, migração em direção leste tanto da atividade magmática quanto da deformação. Sua configuração atual corresponde a uma reorganização das placas que se deu durante o Oligoceno tardio, ainda que a orogênese Andina se processe desde o Mesozóico (Tebens & Cande, 1997).

A atividade magmática é descontínua e subdividida em quatro segmentos, a saber, Zona Vulcânica Norte (5°N - 2°S), Zona Vulcânica Central (14°S - 27°S), Zona Vulcânica Sul (33°S - 46°S) e Zona Vulcânica Austral (49°S - 55°S). Entre estas regiões se situam segmentos, onde a atividade magmática atualmente é ausente, a saber, o Segmento de Flat-Slab Peruano (2°S - 14°S), o Segmento de Flat-Slab Pampeano (27°S - 33°S) e o Gap Vulcânico Patagônico (46°S - 49°S). Nos casos de flat-slab, o magmatismo é ausente em decorrência da horizontalização da placa em subducção, ao passo que no último a subducção já se processa na dorsal mesoocênica (Stern, 2004) (Fig. 2).

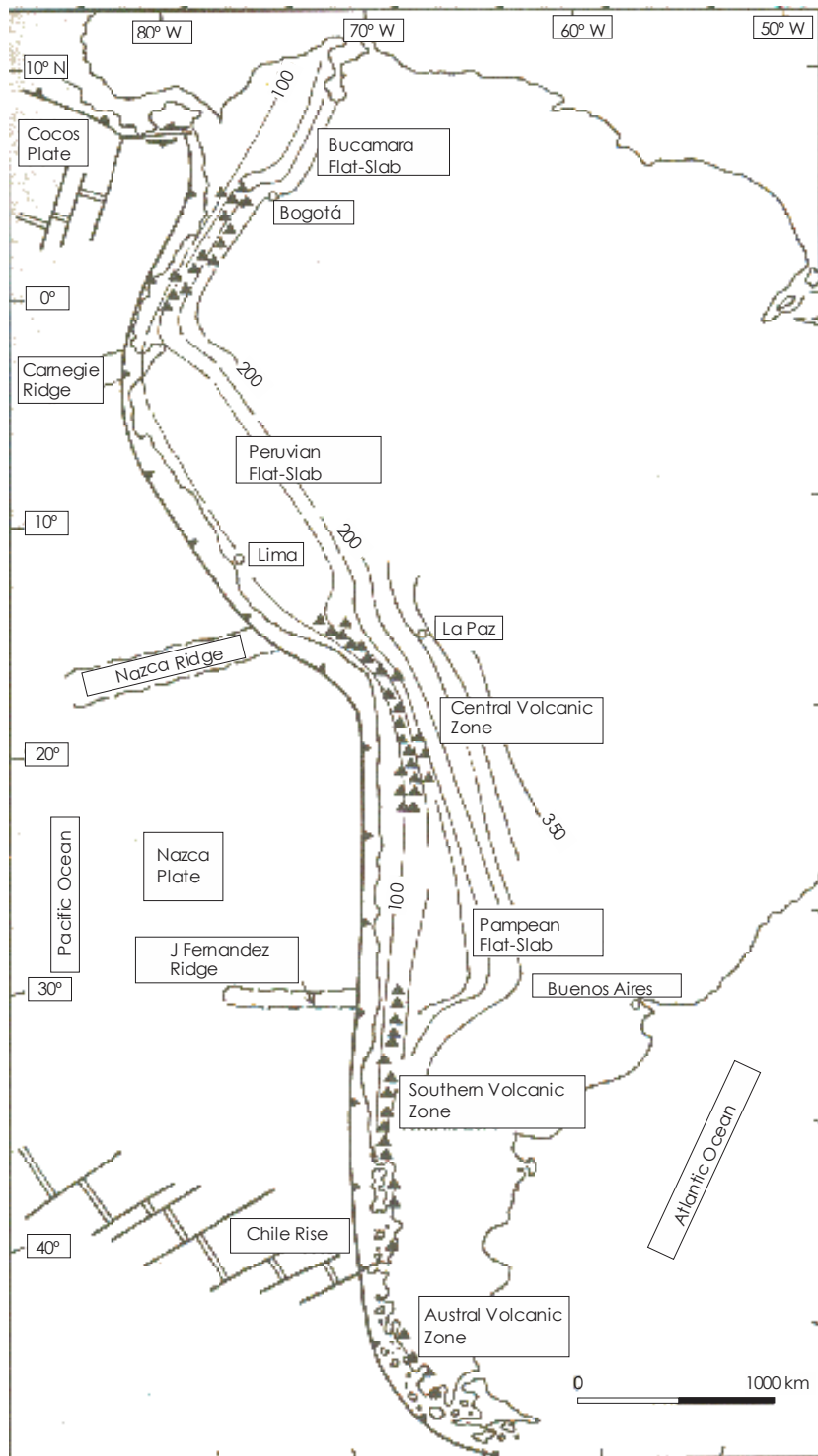


Figura 2: Subdivisão das zonas de atividade magmática nos Andes, com indicações de profundidade da placa tectônica que mergulha. Adaptado de Ramos & Aleman (2000).

São esperadas variações internas ao longo da cadeia, como observa-se entre o domínio Altiplano-Puna com Cordilheira Ocidental e Oriental, em contraste com as regiões a sul, onde há apenas o equivalente à Cordilheira Ocidental e elevações do embasamento. Os Andes Colombianos, a norte, também diferem, em razão de apresentarem um arco acrescido a oeste do equivalente à Cordilheira Ocidental (Gregory-Wodzicki, 2000).

Mais especificamente, os Andes Centrais podem ser subdivididos em Altiplano (15-22°S), Puna (22-28°S).

1.5 - A Puna

Com aproximadamente 100000km² no noroeste argentino, o Plateau Altiplano-Puna é também o segundo maior planalto orogênico, sendo menor apenas que o Planalto do Tibet (Montero Lopez et al., 2010c; Allmendinger et al., 1997). Contudo, sua espessura crustal também é considerável, alcançando 75km. Apresenta também uma altitude média de 4000m, chegando próximo a 6000m em algumas partes (James & Sacks, 1999).

A Puna é um dos domínios dos Andes Centrais e trata-se em um plateau elevado desenvolvido a leste da cordilheira principal. Foi definida por Turner (1972) como um domínio dos Andes, configurando a porção sul do Plateau Central Andino e sendo limitada a norte pelo Altiplano (a porção norte do Plateau Central Andino), a sul pelas Serras Pampeanas, a sudeste pelo Sistema Santa Barabara, a leste pela Cordilheira Oriental e a oeste pela Cordilheira Ocidental, onde principalmente se concentra a atividade magmática atual. Encontra-se a sul de 22°S e a região conhecida como Puna Sul, a sul de 24°S, sendo separada pelo Lineamento Calama-Olacapato-El Toro (Allmendinger et al., 1997).

Todavia, a Puna é possível de ser diferenciada do Altiplano pela sua topografia mais elevada e seu relevo mais acidentado com diversas bacias em seu interior. Isto é esperado em razão de seu soerguimento ter se dado posterior ao do Altiplano.

Heterogeneidades internas a Puna ainda indicam que os níveis crustais mais profundos estão expostos no sul, o que é exemplificado pelas rochas metamórficas de grau médio a alto e graníticas (Alonso et al., 1984).

Estruturalmente, há neste domínio diversos lineamentos de orientação NE-SW pontuados por centros de emissão vulcânica de idades que vão do Mioceno ao Recente, contexto no qual se enquadra o Complexo Vulcânico La Hoyada (Allmendinger et al., 1997).

Há diversas falhas normais no interior e bordas do Planalto da Puna, comumente deslocando rochas piroclásticas ou relacionadas a diques, cones e fluxos magmáticos, o que permite estimar a idade das movimentações e, conseqüentemente, o início da instauração do regime distensivo recente na região (Montero Lopez et al., 2010c).

Na região de Pasto Ventura, a sudeste do Salar de Antofalla, Zhou et al. (2013) identificaram, com base em deslocamentos de cones de cinzas, a existência de essencialmente dois tipos de falhas, sendo o primeiro de falhas Quaternárias normais ou *strike-slip* e o segundo de falhas reversas com reativação Quaternária de natureza normal. Também mostra que esta extensão se dá há ao menos 0.5Ma, embora mostre taxas realmente baixas de 0.02-0.08mm/yr. Todavia, Allmendinger et al. (1997) sugerem predominância do regime distensivo nos últimos 1-2Ma.

Contudo, Montero Lopez et al. (2010c) estendem o período de duração do regime distensivo até pelo menos 5Ma e sugere início entre 4.14Ma e 7.17Ma com base em idades Ar-Ar realizadas em grãos de biotita e hornblenda, além de correlacionar com estruturas semelhantes nas partes central e norte do Plateau. Caffè et al. (2002) sugerem 8Ma, o que exemplifica a incerteza sobre o real instauração deste regime.

Ademais, acredita-se que o Planalto da Puna tenha sido soerguido há aproximadamente 10Ma, o que está de acordo com a Falha de Pasto Ventura que afeta rochas continentais clásticas de 10.04 ± 0.05 Ma e tem reativação com movimentação normal em lavas basálticas de 1.3 ± 0.6 Ma (Montero Lopez et al., 2010c). Assim sendo, observa-se a extensão durante o Mioceno Superior, ainda que não se tenha notado um padrão de migração destas movimentações sobre o planalto, apenas um caráter ubíquo na Puna.

Por fim, segundo Zhou et al. (2013), percebe-se que esta região está sendo submetida a extensão horizontal NE-SW a NNE-SSW. Contudo, a direção de encurtamento permanece em aberto, sendo mais provável que seja vertical, visto que não se encontra falhas reversas ou de empurrão que justifiquem encurtamento horizontal. Montero Lopez et al. (2010), por outro lado, defendem extensão N-S por todo o Planalto como um evento importante do Plioceno Inferior.

Ademais, acredita-se que o motivo para a extensão que se processa nesta região não se resume a apenas um, mas sim a uma combinação de fatores que podem incluir delaminação litosférica e cisalhamento simples do Planalto, gerando encurtamento WNW-ESE e extensão NNE-SSW. Neste contexto, o Salar de Antofalla se encaixaria no grupo de falhas de *strike-slip* resultantes destas movimentações. Contudo, outros motivos também são propostos pelo autor, tais como mudança na convergência de placas e colapso gravitacional. Todavia, Zhou et al. (2013) são os únicos a propor cisalhamento simples, já que isto não é previsto nem pelos modelos de delaminação crustal supracitados.

Cabe ainda ressaltar que Guzmán et al. (2014) encontraram direções semelhantes no alinhamento de depósitos piroclásticos, corroborando a estruturação da região.

Estruturalmente desde o Mioceno na Puna, foram produzidos 3 principais associações vulcânicas, a saber, ignimbritos ácidos, estratovulcões e vulcões monogenéticos (Kay & Coira, 2009). O Complexo Vulcânico La Hoyada se enquadra no segundo, devido a sua história de longa duração, ainda que haja muito pouca preservação do edifício.

Quanto ao embasamento Pré-Andino nos Andes Centrais, especialmente na Puna, acredita-se que este se estenda desde o sul Peru e é composto por rochas ígneas e metamórficas Proterozóicas a Paleozóicas com dois ciclos tectono-metamórficos conhecidos, a saber: Pampeano do Pré-Cambriano Superior ao Cambriano Inferior e Famatiniano de Cambriano Superior ao Siluriano Inferior. Em se tratando das rochas aqui abordadas, cabe ainda mencionar o Andino, do Cretáceo ao presente.

1.6 - Delaminação litosférica

Delaminação litosférica tem se difundido na literatura como um processo que pode ser responsável por reciclagem de crosta continental e que os modelos indicam se processar sob a Puna. Há diversas explicações para tal, como por exemplo extremo encurtamento da litosfera. Todavia, para isto ocorrer, faz-se necessário que a litosfera se torne mais densa que a astenosfera abaixo, permitindo que aquela se torne instável e afunde nesta. Os mecanismos para tal ainda são muito debatidos, entretanto é aceito que ocorre por meio de dois principais: a instabilidade de Rayleigh-Taylor semelhante a um gotejamento (drip) e o descolamento.

Imagina-se drip como um processo mais dúctil que o descolamento, de modo que o segundo seria um destacamento da base da litosfera, especialmente ao longo da Descontinuidade de Mohorovicic (Fig. 3). Segundo os modelos de Göğüş & Pysklywek (2008), diversas diferenças

são previstas para os dois mecanismos, sendo que o drip prevê uma subsidência seguida de soerguimento e uma topografia simétrica, ao passo que descolamento gera uma propagação de subsidências acopladas com soerguimentos que culminam em topografia assimétrica.

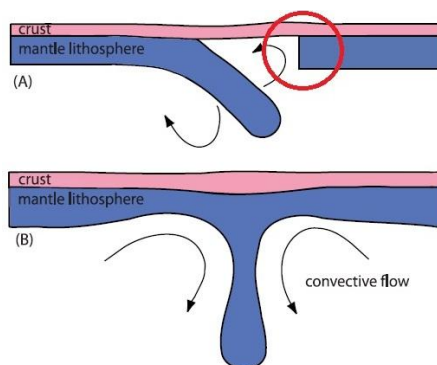


Figura 3: Os dois modelos mais aceitos de delaminação litosférica a) Descolamento da base com marcação da região mais sujeita a sofrer deformações b) Drip (Adaptado de Göğüş & Pysklywek, 2008).

Já na Puna, tomografia de atenuação da onda realizada por Liang et al. (2014) mostra uma zona de intensa atenuação de ondas abaixo do Cerro Galán que poderia representar heterogeneidades na litosfera ou regiões de fusão parcial. Contudo, a localização concentrada apenas abaixo da caldeira torna a primeira hipótese muito improvável. Também é identificada uma região de atenuação entre a litosfera e a placa subductada. Acredita ainda que está ligada à ascensão astenosférica principalmente a norte de 27.5°S e a fusão parcial incipiente a sul deste limite, onde é possível que o ângulo de mergulho esteja aumentando, sendo que estes dois domínios são diferenciados pelo quão marcantes são as anomalias de baixo Q.

Bianchi et al. (2013) apresentam resultados similares, inclusive com identificação do bloco abaixo do Cerro Galán e uma anomalia de baixa velocidade adjacente a oeste, atualmente aceita como o Southern Puna Magma Body (SMPB) (Fig. 6b). Esta anomalia coincide com uma região de intensa atividade magmática, corroborando a interpretação, porém sua composição é incerta, sendo mais provável que sejam as fusões parciais de material crustal responsáveis pelas erupções de caldeiras tais como Cerro Galán e Cerro Blanco.

Evidências estruturais observadas em superfície são principalmente o alinhamento de caldeiras posterior a 2.5Ma identificado por Guzmán et al. (2014). O fato deste alinhamento coincidir com a maior profundidade da Descontinuidade de Mohorovicic é interpretado como decorrente de regiões com a base da litosfera mais instável e, portanto, mais suscetível ao desprendimento.

Por último, acredita-se que isto seja responsável pelo caráter bimodal de composições das rochas no sul da Puna a partir de 8Ma. Neste sentido, os andesitos basálticos e traquiandesitos basálticos de La Hoyada se enquadram nos membros menos evoluídos deste bimodalismo.

Capítulo 7 - References

- ALLMENDINGER, R. W., JORDAN, T. E., KAY, S. M. & ISACKS, B. L. 1997. The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, n.25, pp.139-174.
- ALONSO, R., VIRAMONTE, J. & GUTIERREZ, R. 1984. Puna Austral. Bases para el subprovincialismo geológico de la Puna Argentina. IX Congreso Geológico Argentino, Bariloche, ActasI: 43-63.
- BÁEZ, W., ARNOSIO, M., CHIODI, A., ORTIZ-YÁÑEZ, A., VIRAMONTE, J. G., BUSTOS, E., GIORDANO, G. & LÓPEZ, J. F. 2015. Estratigrafía y evolución del Complejo Volcánico Cerro Blanco, Puna Austral, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. v.32, n.1, pp.29-49.
- BARTH, M. G., MCDONOUGH, W. F., RUDNICK, R. L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. *Chemical Geology*. v.165, pp.197-213.
- BIANCHI, M., HEIT, B., JAKOLEV, A., YUAN, X., KAY, S. M., SANDVOL, E., ALONSO, R. N., COIRA, B., BROWN, L., KIND, R. & COMTE, D. 2013. Teleseismic tomography of the southern Puna plateau in Argentina and adjacent regions. *Tectonophysics*. v.586, pp.65-83.
- BLUNDY, J. D. & WOOD, B. J. 1991. Crystal-chemical controls on the partitioning of Sr and Ba between plagioclase feldspar, silicate melts and hydrothermal solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. v.55, n.1, pp.193-209.
- BUSTOS, E. 2015. Estudio estratigráfico y morfológico del Complejo Volcánico La Hoyada, Puna Austral. Reconstrucción de la historia eruptiva. Tese de Doutorado. 331pp.
- CAFFE, P. J., TRUMBULL, R. B., COIRA, B. L. & ROMER, R. L. 2002. Petrogenesis of early Neogene magmatism in the Northern Puna; implications for magma genesis and crustal processes in the Central Andean Plateau. *Journal of Petrology*. v.43, n.5, pp.907-942.
- DAVIDSON, J. P. & DE SILVA, S. L. 1995. Late Cenozoic magmatism of Bolivian Altiplano. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. v.119 pp.387-408.
- DUCEA, M. 2011. Fingerprinting orogenic delamination. *Geology*. v.39, n.2, pp.191-192.
- FAURE, G. & MENSING, T. 2003. *Isotopes*. 3rd Edition. 928pp.
- FRANCIS, P. W., SPARKS, R. S. J., HAWKESWORTH, C. H., THORPE, R. S., PYLE, D. M., TAIT, S. R., MANTOVANI, M. S., MCDERMOTT, F. 1989. Petrology and geochemistry of volcanic rocks of the Cerro Galán caldera, northwest Argentina. *Geological Magazine*. v.126, pp.515-547.
- GIOIA, S. M. & PIMENTEL, M. M. 2000. The Sm-Nd isotopic method in the geochronology laboratory of the Universidade de Brasília. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. v.72, n.2, pp.219-245.
- GÖĞÜŞ, O. H. & PYSKLYWEK, R. N. 2008. Near-surface diagnosis of dripping or delamination lithosphere. *Journal of Geophysical Research*. v.113, B11404, 11pp.

- GREGORY-WODZICKI, K. M. 2000. Uplift history of the Central and North Andes: A review. *Geological Society of America Bulletin*. v.112, n.7, pp.1091-1105.
- GUZMÁN, S. R., PETRINOVIC, I. A. & BROD, J. A. 2006. Pleistocene mafic volcanoes in the Puna-Cordillera Oriental boundary, NW Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. v.158, pp.51-69.
- GUZMÁN, S., GROSSE, P., MONTERO-LÓPEZ, C. M., HONGN, F., PILGER, R., PETRINOVIC, I., SEGGIARO, R. & ARAMAYO, A. 2014. Spatial-temporal distribution of explosive volcanism in the 25-28°S segment of the Andean Central Volcanic Zone. *Tectonophysics*. v.636, pp.170-189.
- HARKER, A. 1909. *The natural history of igneous rocks*. Methuen & Co. London.
- HILDRETH, W. MOORBATH, S. 1988. Crustal contaminations to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. v.98, pp.455-489.
- IRVINE, T. N. & BARAGAR, W. R. A. 1971. A guide to the chemical classification of volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*. v.8, pp.523-548.
- JAILLARD, E., HÉRAIL, G., MONFRET, T., DÍAZ-MARTÍNEZ, E., BABY, P., LAVENU, A. & DUMONT, J. F. 2000. Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and Northernmost Chile. In: CORDANI, U. G., MILANI, E. J., THOMAZ FILHO, A. & CAMPOS D. A. *Tectonic Evolution of South America*. pp.481-559.
- JAMES, D. E. 1982. A combined O, Sr, Nd and Pb isotopic and trace element study of crustal contamination in Central Andean Lavas, I: Local geochemical variations. *Earth and Planetary Science Letters*. v.57, n.1, pp.47-62.
- JAMES, D. E. & SACKS, I. S. 1999. Cenozoic formation of the Central Andes: A geophysical perspective. In: SKINNER, B. F. *Geology and ore deposits of the Central Andes*, Special Publication n.7, Society of Economic Geologists. pp.1-25.
- KAY, S. M. & COIRA, B. 2009. Shallowing and steepening subduction, continental lithospheric loss, magmatism and crustal flow under the central Andean Altiplano-Puna plateau. In: KAY, S. M., RAMOS, V. A., DICKINSON, W. S. *Backbone of the Americas. Shallow Subduction, Plateau Uplift and Ridge and Terrane Collision*. Geological Society of America Memoirs 204. pp.229-260.
- KAY, S. M., COIRA, B. & MPODOZIS, C. 2006. Late Neogene volcanism in the Cerro Blanco region of the Puna Austral, Argentina (26,5°S 67,5°W). 11° Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Actas 2, pp.499-502.
- KAY, S. M., COIRA, B. & VIRAMONTE, J. G. 1994. Young mafic back arc volcanic rocks as indicators of continental lithospheric delamination beneath the Argentine Puna Plateau, Central Andes. *Journal of Geophysical Research*, v.99, pp.323-339.
- KAY, S. M., COIRA, B., WOERNER, G., KAY, R. W. & SINGER, B. S. 2011. Geochemical, isotopic and single-crystal $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the evolution of Cerro Galán ignimbrites. *Bulletin of Volcanology*. v.73, pp.1487-1511.

KRAEMER, B., ADELMANN, D., ALTEN, M., SCHNURR, W., ERPENSTEIN, K., KIEFER, E., VAN DEN BOGAARD, P. & GÖRLER, K. 1999. Incorporation of the Paleogene foreland into the Neogene Puna Plateau, the Salar de Antofalla area, NW Argentina. *Journal of South America Earth Sciences*, v.12, pp.157-182.

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., LINTHOUT, K., LAIRD, J., MARESCH, W. V., NICKEL, E. H., SCHUMACHER, J. C., SMITH, D. C., STEPHENSON, N. C. N., UNGARETTI, L., WHITTAKER, E. J. W. & YOUZHI, H. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*. v.35, pp.219-246.

LEAKE, B. E., WOOLLEY, A. R., BIRCH, W. D., BURKE, E. A. J., FERRARIS, G., GRICE, J. D., HAWTHORNE, F. C., KISCH, H. J., KRIVOVICHEV, V. G., SCHUMACHER, J. C., STEPHENSON, N. C. N. & WHITTAKER, E. J. W. 2004. Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature. *American Mineralogist*. v.89, pp.883-884.

LE BAS, M. J., LE MAITRE, R. W., STRECKEISEN, A. & ZANETTIN, B. 1986. A Chemical Classification of volcanic rocks based on the Total Alkali Silica diagram. *Journal of Petrology*, v.27, n.3, pp.745-750.

LI, L., XIONG, X. L. & LIU, X. C. 2017. 2017. Nb/Ta fractionation by amphibole in hydrous basaltic systems. Implications for arc magma evolution and continental crust formation. *Journal of Petrology*, v.58, n.2, pp.1-26.

LIANG, X., SANDVOL, E., KAY, S., HEIT, B., YUAN, X., MULCAHY, P., CHEN, C., BROWN, L., COMTE, D. & ALVARADO, P. 2014. Delamination of southern Puna lithosphere revealed by body wave attenuation tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v.119, pp.549-566.

LUGMAIR, C. H., VOCKE, R. D., HANSON, G. N. & HART, S. R. 1977. A general mixing equation with application to Icelandic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*. v.37, pp.380-392.

MCDONOUGH, W. F. & SUN, S. S. 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*. v.120, pp.223-253.

MONTERO LÓPEZ, M. C. 2009. Estructura y magmatismo Neógeno-Cuaternarios en la Sierra de San Buenaventura (Catamarca): su vinculación con la terminación austral de la Puna. Tese de Doutorado. 271pp.

MONTERO LÓPEZ, M. C., HONGN, F., SEGGIARO, R., BROD, J. A. & MARRETT, R. 2010a. Estratigrafía y geoquímica del volcanismo de composición intermedia (Mioceno Superior-Plioceno) en el extremo oriental de la Cordillera de San Buenaventura (Puna Austral). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v.67, n.1, pp.112-129.

MONTERO LÓPEZ, M. C., HONGN, F., BROD, J. A., SEGGIARO, R., MARRETT, R. & SUDO, M. 2010b. Magmatismo ácido del Mioceno Superior-Cuaternario en el área de Cerro

Blanco-La Hoyada, Puna Austral. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v.67, n.3, pp.329-348.

MONTERO LÓPEZ, M. C., HONGN, F. D., STRECKER, M. R., MARRETT, R., SEGGIARO, R. & SUDO, M. 2010c. Late Miocene-Early Pliocene onset of N-S extension along the southern margin of the Central Andean Altiplano Puna Plateau: evidence from magmatic, geochronological and structural observations. *Tectonophysics*, v.494, pp.48-63.

MONTERO LÓPEZ, M. C., GUZMÁN, S. & BARRIOS, F. 2015. Late Miocene ignimbrites at the southern Puna - northern Sierras Pampeanas border (~27°S): Stratigraphic correlation. *Journal of South American Earth Sciences*, v.62, pp.80-91.

MORIMOTO, M., FABRIES, J., FERGUSSON, A. K., GINZBURG, I. V., ROSS, M., SEIFERT, F. A., ZUSSMAN, J., AOKI, K. & GOTTARDI, G. 1988. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, v.73, pp.1123-1133.

NELSON, S. T. & MONTANA, A. 1992. Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist*, v.77, pp.1242-1249.

NIMIS, P. & TAYLOR, W. R. 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for peridotites. Part I: Calibration and testing of a Cr-in-cpx barometer and an enstatite-in-cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.139, pp.541-554.

PECERILLO, A. & TAYLOR, S. R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.58, pp.189-202.

PENCK, W. 1920. Der Sudrand der Puna de Atacama. *Abh. Math. Phys. Klasse der Sächsischen. Akad. Der Wissenschaften*. v. 37, n.1.

PLANK, T. & LANGMUIR, C. H. 1998. The geochemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, v. 145, pp.325-394.

PROFETA, L., DUCEA, M. N., CHAPMAN, J. B., PATERSON, S. R., GONZALES, S. M. H., KIRSCH, M., PETRESCU, L. & DECELLES, P. G. 2015. Quantifying crustal thickness over time in magmatic arcs. *Nature Scientific Reports*. 5:17786.

PROSERPIO, C. A., RICCI, H., PEZZUTTI, N., GODEAS, M. SEGAL, S. 1989. Area La Hoyada. Dirección Nacional de Minería y Geología, inédito. Buenos Aires.

PUTIRKA, K. D. 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems. In: PUTIRKA, K. D. & TEPLEY, F. *Minerals, inclusions and volcanic processes: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v.69, pp.61-120.

RAMOS, V. A. & ALEMÁN, A. 2000. Tectonic Evolution of the Andes. In: CORDANI, U. G., MILANI, E. J., THOMAZ FILHO, A. & CAMPOS, D. A. *Tectonic Evolution of South America*. International Geological Congress. n.31, pp.635-685.

RICCI, H. I., VALLADARES CARRILLO, H., PEZZUTTI, N., GODEAS, M. & SEGAL, S. J. 1999. Distrito Minero La Hoyada, Catamarca. In: *Recursos Minerales de la República Argentina* (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35, pp.1627-1636.

- RICHARD, P. SHIMIZU, N. & ALLÉGRE, C. J. 1976. $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$, a natural tracer: An application to oceanic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 31, pp.269-278.
- RIDOLFI, F., RENZULLI, A. & PUERINI, M. 2009. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.160, n.1, pp.45-66.
- RISSE, A., TRUMBULL, R. B., COIRA, B., KAY, S. M. & VAN DEN BOGAARD, P. 2008. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of basaltic volcanism in the back-arc region of the Puna plateau, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, v.26, pp.1-15.
- RISSE, A., TRUMBULL, R. B., KAY, S. M. COIRA, B. & ROMER, R. L. 2013. Multi-stage Evolution of Late Neogene Mantle-derived Magmas from the Central Andes Back-arc in the Southern Puna Plateau of Argentina. *Journal of Petrology*, v.54, n.10, pp.1963-1995.
- ROEDER, P. L. & EMSLIE, R. F. 1970. Olivine-liquid equilibrium. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.29, pp.275-289.
- RONOV, A. B., YAROSHEVSKIY, A. A. 1976. A new model for the chemical structure of the Earth's crust. *Geochemistry International*, v.13, n.6, pp.89-121.
- SCHOENBOHM, L. M., CARRAPA, B., MCPHERSON, H. M., PRATT, J. R., BYWATER-REYES, S. & MORTIMER, E., 2015. Climate and tectonics along the southern margin of the Puna Plateau, NW Argentina: Origin of the Puna Schotter conglomerates. In: DECELLES, P. G., DUCEA, M. N., CARRAPA, B. & KAPP, P. A. *Geodynamics of a Cordilleran Orogenic System: The Central Andes of Argentina and Northern Chile*. Geological Society of America Memoir 212, pp.251-260.
- SEGGIARO, R., HONGN, F., FOLGUERA, A. & CLAVERO, J. 2000. Hoja Geológica 2769 - II. Paso San Francisco. Boletín 294, Programa Nacional de Cartas Geológicas. 1:250000. SEGEMAR.
- SIEBEL, W., SCHNURR, W. B. W., HAHNE, K., KRAEMER, B., TRUMBULL, R. B., VAN DEN BOGARD, P. & EMMERMANN, R. 2001. Geochemistry and isotope systematics of small- to medium-volume Neogene-Quaternary ignimbrites in the southern Central Andes: evidence for derivation from andesitic magma sources. *Chemical Geology*. v.171, pp.213-237.
- SOBOLEV, A. V., HOFMAN, A. W., KUZMIN, D. V., YAXLEY, G. M., ARNDT, N. T., CHUNG, S.-L., DANYUSCHEVSKY, L. V., ELLIOTT, T., FREY, F. A., GARCIA, M. O., GURENKO, A. A., KAMENETSKY, V. S., KERR, A. C., KRIVOLUTSKAYA, N. A., MATVIENKOF, V. V., NIKOGOSIAN, I. K., ROCHOLL, A., SIGURDSSON, I. A., SUSHCHEVSKAYA, N. M. & TEKLAY, M. 2007. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science* (80), v.316, pp.412-417.
- STERN, C. R. 2004. Active Andean Volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geologica de Chile*. v.31, n.2, pp.161-206.
- SUN, S. S., MCDONOUGH, W. F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes. In: SAUNDERS, A. D. & NORRY, M. J.

Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications 42, pp.313-345.

TEBENS, S. F. & CANDE, S. C. 1997. Southeast Pacific tectonic evolution from Early Oligocene to Present. *Journal of Geophysical Research*, v.102, pp.12061-12084.

THOMPSON, R. N. 1982. Magmatism of the British Tertiary Province. *Scottish Journal of Geology*, v.18, pp.49-107.

TURNER, J. M. 1972. Puna. *Geología General Argentina*. Academia Nacional de Ciencias. 91-116. Córdoba.

VANCE, J. A. 1965. Zoning in igneous plagioclase: patchy zoning. *The Journal of Geology*, v.73, n.4, pp.636-651.

ZHOU, R., SCHOENBOHM, L. M., COSCA, M. 2013. Recent slow normal and strike-slip faulting in the Pasto Ventura region of the southern Puna Plateau, NW Argentina. *Tectonics*, v.32, pp.19-33.