



IV Simposio de Vulcanismo e Ambientes Associados
Foz do Iguaçu, PR – 08 a 11/04/2008.

**CARACTERIZAÇÃO DAS ROCHAS VULCÂNICAS E
VULCANOCLÁSTICAS METAMORFISADAS NAS FÁCIES XISTO AZUL E
XISTO VERDE DA PRAIA DE *INFERNILLO*, CORDILHEIRA DA COSTA
DOS ANDES CENTRAIS DO CHILE**

Thaís Nogueira Hyppolito¹, Caetano Juliani¹, Francisco Hervé², Paul Duhart³, Jorge Muñoz Bravo³

¹Departamento de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências, USP, Rua do Lago, 562 – Cidade Universitária. CEP 0112006-230. São Paulo, SP. E-mail: thaishyppolito@yahoo.com.br ; cjuliani@usp.br

²Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21. Santiago, Chile. E-mail: fherve@cec.uchile.cl

³Servicio Nacional de Geología e Minería, Gobierno de Chile. Avda. La Paz 406, Casilla 613. Puerto Varas – X Región – Chile. E-mail: pduhart@sernageomin.cl ; jmunoz@sernageomin.cl.

Resumo – Este trabalho tem como objetivo apresentar os estudos petrográficos, geotermobarométricos e geoquímicos realizados nos metabasitos constituintes de uma seqüência vulcanossedimentar da praia de *Inférnillo* (cidade de Pichilemu), metamorfisada na fácies xisto azul e xisto verde. Essas rochas são parte da Cordilheira da Costa dos Andes Centrais, a qual é caracterizada como um complexo de subducção pré-andino (Paleozóico) bem preservado, ao passo que no Norte do Chile esse complexo foi fortemente retrabalhado pela contínua atividade ao longo da margem convergente. Na praia de *Inférnillo* os correspondentes metamorfisados de basaltos e andesitos, tufos cineríticos, tufos máficos, lápili-tufos e aglomerados vulcânicos têm associados metacherts com riebeckita, metassedimentos ferruginosos e sulfetados, metapelitos comumente carbonosos e, subordinadamente, mármore e metaconglomerados. Essa seqüência vulcanossedimentar é predominantemente subaquática, com eventuais exposições subaéreas. A litoquímica das metavulcânicas mostra predominância de rochas cálcio-alcalinas formadas num do arco de ilhas. Estudos petrográficos e geotermobarométricos (TWQ 1.02) mostram que os metabasitos da fácies xisto azul foram retrometamorfisados para a fácies xisto verde, num intervalo bórico calculado entre 10,5 e 5,2 kbar e a temperaturas em torno de 400 °C.

Palavras-Chave: Seqüência vulcanossedimentar, fácies xisto azul, Andes Centrais.

Abstract – The aim of this research shows petrographical, geothermobarometrical and geochemical data obtained to metabasites of a volcano sedimentary sequence metamorphosed in blueschist and greenschist facies, which is preserved at Coastal Cordillera in Central Chile close to Pichilemu city, located in the coastal region in *Inférnillo* Beach. The Coastal Cordillera in Central Chile is characterized by the well preservation of the Paleozoic subduction complex. Whereas this complex was strongly overprinted by the continuous activity of subduction along the convergent margin in North of Chile, the pre-Andean subduction occurs well preserved in Central Chile. At *Inférnillo* Beach the product of metamorphism of basalts, andesites, ash tuffs, mafic tuffs, lapilli-tuffs and volcanic agglomerates are associated to metacherts with riebeckite mineral, ferruginous sediments, carbonaceous meta-pelites and minor to marbles and metaconglomerates. This volcano sedimentary sequence is mainly subaquatic with occasionally subaerial exposures. Metavolcanic lithochemistry show calc-alkaline rocks predominantly generated in an arc island environment. Geothermobarometrical data were obtained by TWQ (1.02) software and show the retrograde metamorphism from blueschist to greenschist facies, with pressures between 10.5 and 5.2 kbar and temperatures of 400 °C, approximately.

Keywords: Volcano sedimentary sequence, blueschist facies, Central Andes.

*Rochas vulcânicas
Petrografia
geoquímica
geotermobarome-
tria*

1. Introdução

A grande importância do estudo dos xistos azuis deve-se ao fato de que os cinturões metamórficos de alta pressão e baixa temperatura se relacionam às zonas de subducção e colisão entre placas litosféricas (Bowes, 1989). Essas rochas são bem caracterizadas nas zonas orogênicas meso- e cenozóicas Circum-Pacíficas, no Caribe, Alpes e Himalaia (Miyashiro, 1961; Ernst, 1972; Maruyama *et al.*, 1996), dentre outros locais. A sua gênese e evolução apresentam grande importância para o estabelecimento da evolução crustal desses ambientes. Por associar-se a antigos limites convergentes de placas tectônicas, o estudo dos eventos metamórficos e deformacionais registrados nos xistos azuis se faz fundamental para dedução do tipo de subducção, regimes colisionais e de exumação (Ernst, 1988; Smith *et al.*, 1999). Usualmente são metamorfisados na fácies xisto azul a crosta e *plateaus* oceânicos, mas rochas de arcos de ilhas pouco evoluídos podem também ser incorporadas ao continente durante a subducção e exumação. Devido ao metamorfismo e à deformação, especialmente durante a exumação, à qual se associam grandes zonas de cisalhamento, a preservação das texturas e estruturas das rochas vulcânicas e vulcanoclásticas é prejudicada, o que torna difícil o reconhecimento dos protólitos das rochas metamórficas, bem como do seu ambiente de formação. Entretanto, na região de Pichilemu, apesar do forte cisalhamento, os metabasitos e metavulcanoclásticas da fácies xisto azul e xisto verde e litotipos associados mostram-se ainda relativamente bem preservados, permitindo a identificação dos seus protólitos vulcanosedimentares, objeto desse trabalho. Essas rochas estão geneticamente vinculados à orogênese paleozóica dos Andes do Sul (Hervé *et al.*, 1981).

2. Localização da área

A área de ocorrência dos xistos azuis localiza-se na Cordilheira da Costa, na VI Região do Chile, nas proximidades da cidade de Pichilemu. O acesso à área pode ser feito através da rodovia que liga a capital do Chile (Santiago) a San Fernando, e dessa, até o município de Pichilemu, onde as rochas afloram na costa oceânica e na zona rural do município.

3. Metabasitos – Relações de campo

Os metabasitos são representados por metamorfitos em fácies xisto verde com relíquias de metamorfitos em fácies xisto azul. Constituem uma seqüência vulcanosedimentar tectonicamente deformada que aflora ao longo de aproximadamente 1200 m na costa da praia de *Infernillo*. Tufitos em fácies xisto azul e xisto verde encontram-se freqüentemente intercalados em bandas com decímetros de espessura (Foto 1). O aspecto geral característico dessas bandas dá-se pela intercalação de camadas milimetricamente laminadas de anfibólio azulado muito fino e *metachert* com bandas homogêneas de material tufítico esverdeado, de aspecto xistoso e foliação penetrativa. Leitões de tufo cinerítico são comuns e ocorrem intercalados nos tufos (Foto 2). Com isso, foram observadas as variações metamórficas de tufos, lápili-tufos e aglomerados vulcânicos (Fotos 2, 3, 4 e 5).

Estruturas de *pillow* lavas também foram observadas nessas rochas (Foto 6): apresentam de 20 a 30 cm de diâmetro e podem apresentar fraturas radiais em direção ao núcleo da *pillow*, eventualmente preenchidas por calcita. A *pillow* pode ainda ocorrer fragmentada definindo leitões métricos de *pillow breccias*. É muito comum a presença de camadas ou zonas monominerálicas irregulares com centímetros a decímetros de espessura constituídas por epidoto e clorita, assim como veios de quartzo, albita, calcita e mais localmente anfibólio azulado \pm albita. Os veios podem ocorrer concordantes com a foliação principal, ou ainda de forma discordante, truncando sub-verticalmente a foliação.

Em geral, a seqüência vulcanosedimentar em estudo é estratigraficamente caracterizada por leitões de *pillow* lavas e *pillow breccias* na base, seguidos de leitões constituídos por aglomerados vulcânicos, lápili-tufos, tufos finos e tufos cineríticos, com intercalações de metapelitos carbonosos cada vez mais freqüentes em direção ao topo, onde neste, tornam-se o litotipo predominante e podem ocorrer associados a leitões de *metachert*, metapelitos ferruginosos e sulfetados. A seqüência observada se dá por diversos leitões constituídos de aglomerados vulcânicos que gradacionalmente passam para lápili-tufos, que por sua vez gradam para tufos finos e cineríticos. Os contatos podem ser interdigitados ou ainda há presença de leitões erosivos na base de lápili-tufos e aglomerados vulcânicos. Foi também registrado a presença de marcas de sola na base das camadas de depósitos de granulação mais grossa sobrejacentes. Essa seqüência representa diversos ciclos de deposição e retrabalhamento, possivelmente por procesos gravitacionais de materiais vulcanoclásticos e sedimentares clásticos e químicos.

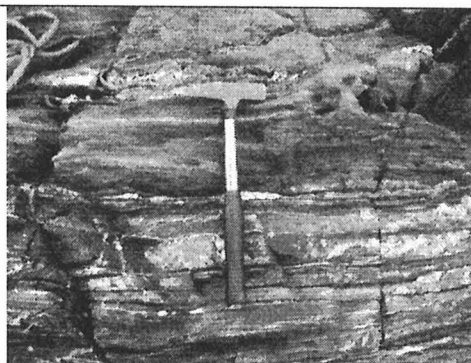


Foto 1: Intercalação de bandas de metatufos em fácies xisto verde e xisto azul.

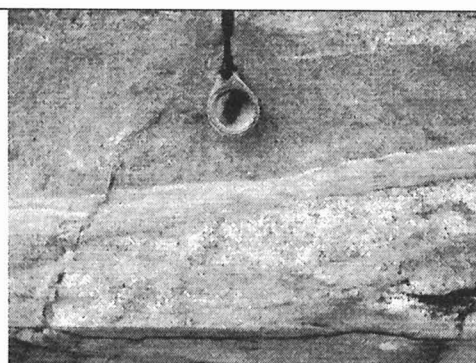


Foto 2: Meta-tufo verde-escuro (porção inferior da foto) e leito de meta-tufo cinerítico de cor verde-amarelado (centro da foto) intercalado em tufo grosso.



Foto 3: Variação metamórfica de lápili-tufo com superfície ondulada.



Foto 4: Variação metamórfica de lápili-tufo.

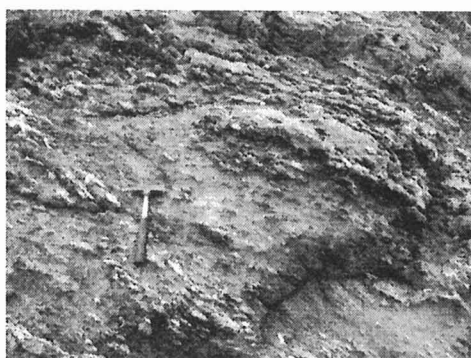


Foto 5: Variação metamórfica de aglomerado vulcânico em contato gradacional com lápili-tufo (leito próximo à parte superior do martelo), e com tufo fino (canto superior direito da foto).



Foto 6: Pillow lava com material inter-pillow azulado.

4. Petrografia e Química Mineral

Macroscopicamente os metabasitos caracterizam-se por apresentarem cor cinza-esverdeada a cinza-azulada e granulação variando de muito fina a fina. São rochas com a foliação S_n bem definida pelos leitos nematoblásticos, granoblásticos, e lepidoblásticos, e eventualmente, são observadas crenulações incipientes a mais intensas com transposição da foliação S_n para a foliação milonítica S_{n+1} , bem caracterizada nos xistos verdes. Dentre as amostras selecionadas é possível distinguir rochas com textura predominantemente grano-nematoblástica, onde há alternância de leitos nematoblásticos constituídos por anfíbólios verde-azulados, com leitos granoblásticos quartzo-feldspáticos. Os leitos lepidoblásticos são caracterizados pela presença de mica branca e clorita, sendo essa última principalmente associada aos anfíbólios esverdeados. Microscopicamente é possível dividir os metabasitos em três grupos: metabasitos em fácies xisto azul, metabasitos “transicionais” (entre as fácies xisto azul e xisto verde) e metabasitos em fácies xisto verde. O primeiro grupo apresenta textura predominantemente grano-nematoblástica com intercalações de anfíbólios sódicos de cor azulada e granulação muito fina com leitos quartzo-feldspáticos constituídos por quartzo e plagioclásio. Por vezes, observa-se textura porfiroblástica com cristais fibrorradiados de estilpnomelano em leitos monominerálicos ou associados ao anfibólio sódico. Nos metabasitos “transicionais” os anfíbólios azulados apresentam suas bordas substituídas por anfibólio sódico-cálcico de cor azul-esverdeada, ou ainda ocorrem cristais verdes e verde-azulados

intercrescidos. Já os xistos verdes apresentam textura lépido–nematoblástica onde é comum leitos monominerálicos de clorita intercalados com leitos de anfibólio cálcico de cor esverdeada. Nos xistos verdes é possível observar a cloritização dos anfibólios, bem com o desenvolvimento da paragênese clorita + epidoto em bandas biminerálicas. Foram realizadas em microsonda eletrônica as análises químicas pontuais de 7 litotipos com as paragêneses mais adequadas aos estudos geotermobarométricos. As principais fases minerais analisadas são constituintes dos metabasitos que compreendem os litotipos em fácies xisto azul e xisto verde, são elas: anfibólio, mica branca, plagioclásio, clorita e epidoto. Os anfibólios sódicos azulados correspondem ao ferro–glaucofânio e magnésio–riebeckita, característicos da fácies xisto azul; o plagioclásio corresponde à albita pura em todas as amostras analisadas; os anfibólios verde azulados, típicos dos xistos azuis transicionais, correspondem à winchita; e por fim, os anfibólios cálcicos correspondem à actinolita e tremolita.

5. Geotermobarometria

Os cálculos geotermobarométricos foram realizados mediante o uso do *software* TWQ (versão 1.02 com calibrações de Berman, 1991). Os dados foram obtidos a partir dos minerais de três secções delgadas analisadas em microsonda eletrônica, quais sejam: anfibólio, mica branca, plagioclásio, epidoto e clorita. As análises utilizadas incluem as paragêneses minerais e/ou cristais de um mesmo domínio microestrutural para aumentar a possibilidade de um equilíbrio termodinâmico e maior coerência nos cálculos das condições P–T às quais foram submetidos os litotipos em estudo. As paragêneses que envolvem o anfibólio sódico registram as razões P–T mais elevadas e correspondem ao campo de estabilidade da fácies xisto azul. O intervalo bórico calculado está entre 9,5 e 10,5 kbar, com temperaturas que variam entre 355 e 420 °C. Já as paragêneses que envolvem o anfibólio sódico–cálcico representam a associação transicional característica entre a fácies xisto azul e xisto verde com decompressão calculada em torno de 6,3 e 8,0 kbar e temperaturas entre 390 e 405 °C. Nos xistos verdes as paragêneses observadas correspondem aos pares anfibólio–clorita, clorita–mica branca e à associação anfibólio–clorita–mica branca–albita, associados ao desenvolvimento da S_{n+1} . Os cálculos geotermobarométricos mostram um intervalo bórico mais amplo entre 5,3 e 7,8 kbar, com temperatura de aproximadamente 390 °C.

6. Geoquímica

Com base nos estudos petrográficos foram selecionadas 15 amostras de rochas da praia de *Infernillo* para análises químicas envolvendo elementos maiores (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , e P_2O_5), traço (Ba, Rb, Sr, Zr, Nb, Y, Ta, U, P, Ni e Ti) (com Ti calculado) e terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb e Lu). Os elementos maiores e menores foram obtidos por ICP-ES e os elementos traço, incluindo terras raras, por ICP-MS. Segundo a classificação de Cox *et al.* (1979) 11 amostras distribuem-se no campo dos basaltos e hawáitos transicionais entre saturados e supersaturados em sílica, e 4 amostras adentram o campo das rochas vulcânicas de composições intermediárias saturadas em sílica (andesito, traquiandesito e dacito). A tendência evolutiva transicional dessas rochas é observada pela proximidade à linha que separa os campos alcalino e subalcalino segundo a classificação de Irvine & Baragar (1971). Entretanto, não se descarta que a tendência alcalina verificada pode ser devida a enriquecimento em álcalis, em especial de sódio, durante as alterações hidrotermais em fundo oceânico geradoras de espilitos.

Quando lançadas no diagrama AFM de Irvine & Baragar (1971), as amostras de xistos verdes, xistos azuis transicionais e xistos azuis mostram uma tendência evolutiva compatível com uma série cálcio–alcalina, traduzida pelo aumento progressivo de álcalis acompanhado por razões FeO^*/MgO praticamente constantes. Para a determinação da afinidade geoquímica e do ambiente tectônico de formação de rochas básicas utilizou-se a classificação de Pearce & Cann (1973) e Pearce & Norry (1979), baseada em elementos traço: Zr vs Ti e $\log \text{Zr vs } \log \text{Zr/Y}$, respectivamente. Os xistos verdes incidem próximos ao campo dos basaltos de fundo oceânico, ao passo que as amostras de xistos azuis sugerem assinatura de basaltos cálcio–alcalinos, em conformidade com os resultados obtidos no diagrama AFM. Com relação ao paleoambiente de formação 14 amostras analisadas revelam afinidade geoquímica intraplaca, com apenas uma amostra de xisto verde indicando caráter transicional para ambiente de fundo oceânico.

7. Conclusões

Na área em estudo afloram litotipos correspondentes a uma seqüência vulcanossedimentar constituída essencialmente por tufos máficos, lápili-tufos, tufos cineríticos, basaltos, andesitos e aglomerados vulcânicos, metamorfisados em fácies xisto azul e xisto verde, associados tectonicamente a *metacherts*, meta-sedimentos ferruginosos e sulfetados, metapelitos comumente grafitosos, e leitos restritos de mármore e metaconglomerados; todos muito deformados por dobras macroscópicas e crenulações diversas, além da presença de zonas de brechas (*e.g. pillow breccias*, quartzitos brechóides) e falhas. Essa associação mostra a presença de um ambiente de vulcanismo oceânico situado nas proximidades de um centro vulcânico, onde ocorrem corpos de basaltos com *pillow-lavas* e abundantes camadas de lápili-tufos com aglomerados e brechas vulcânicas, indicativos de formação na base de tálus, possivelmente do próprio edifício vulcânico. O ambiente redutor é atestado pela presença de metapelitos carbonosos e os leitos de *metachert* e de metapelitos ferruginosos e sulfetados, (em parte com clastos de sulfetos), são indicativos de atividades

exalativas vulcanogênicas. Retrabalhamentos das rochas vulcanoclásticas e depósitos com sulfetos por escorregamentos são comuns e a presença de leitos de meta-conglomerados e de leitos de meta-sedimentos mais grossos com estratificação cruzadas de pequeno porte e de marcas onduladas indicam exposições subaéreas locais e eventuais. Os estudos petrográficos aliados aos cálculos geotermobarométricos apresentam resultados coerentes com as observações feitas em campo, onde é possível observar que os xistos azuis são apenas relíquias em meio ao litotipo predominante, caracterizado por metabasitos em fácies xisto verde. Ademais, pode-se dizer que associado ao evento retrometamórfico principal está o desenvolvimento da foliação milonítica (S_{n+1}) bem evidente nos xistos verdes, enquanto que os xistos azuis ocorrem em geral como litotipos finamente laminados com aspecto filítico ("filitos glaucofânicos"). No conjunto dos diagramas geoquímicos obtidos, as dispersões ao redor das tendências evolutivas, em especial dos elementos mais móveis, reforçam a presença de efeitos de alterações hidrotermais e metassomáticas nessas rochas. A despeito desta possibilidade é possível concluir que a tendência evolutiva do protolito dos xistos azuis, xistos azuis transicionais e xistos verdes é compatível com uma série cálcio-álcalina, traduzida pelo aumento progressivo de álcalis acompanhado por razões FeO^*/MgO praticamente constantes. A associação de fatores como: ausência (nos diagramas de classificação de ambiente tectônico) de assinaturas geoquímicas correspondentes a basaltos tipo MORB; afinidade geoquímica intraplaca das amostras analisadas; predominância da tendência evolutiva cálcio-álcalina; e presença de meta-sedimentos ferruginosos, permite, por ora, admitir que o paleoambiente de geração das rochas vulcânicas é parte de um arco de ilha retrabalhado pela zona de subducção paleozóica, por sua vez representado por uma seqüência vulcanossedimentar subaquática (meta-tufos, meta-lápiili-tufos e meta-aglomerados vulcânicos) com eventual exposição subaérea.

8. Referências Bibliográficas

- BERMAN, R.G., 1991. Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: a new technique, with petrological applications. *The Canadian Mineralogist*, **29**: 833–855.
- BOWES, D.R., 1989. The encyclopedia of igneous and metamorphic petrology. Van Nostrand Reinhold, pp. 184–187.
- COX, K. G., BELL, J. D., PANKHURST, R. J., 1979: The Interpretation of Igneous Rocks. London. *George Allen & Unwin*, 450p.
- ERNST, W.G., 1972. Occurrence and mineralogic evolution of blueschist belts with time. *American Journal of Science*, **272**, 657–668.
- ERNST, W.G., 1988. Tectonic history of subduction zones inferred from retrograde blueschist P–T paths. *Geology*, **16**: 1081–1084.
- HERVÉ, F., DAVIDSON, J., GODOY, E., MPODOZIS, C., COVACEVIC, V., 1981. The Late Paleozoic in Chile: stratigraphy, structure and possible tectonic framework. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, **53**: 361–373.
- IRVINE, T.N. & BARAGAR, W.R.A – 1971 - A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, **8**: 523–547.
- PEARCE, J. A., CANN, J. R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**, 290–300.
- PEARCE, J.A., NORRY, M. J., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **69**, 33–47.
- MARUYAMA, S., LIOU, J.G., TERABAYASHI, M., 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geology Review*, **38**: 485–594.
- MIYASHIRO, A., 1961. Evolution of metamorphic belts. *Journal of Petrology*, **2**: 277–311.
- RICHTER, R.P., RING, U., WILLNER, P. A., LEISS, B., 2007. Structural contacts in subduction complexes and their tectonic significance: the Late Paleozoic coastal accretionary wedge of central Chile. *Journal of Geological Society, London*, **164**: 203–214.
- SMITH, C.A., SISSON, V.B., AVÉ-LALLEMANT, H.G., COPELAND, P., 1999. Two contrasting pressure–temperature–time paths in the Villa de Cura blueschist belt, Venezuela: Possible evidence for Late Cretaceous initiation of subduction in the Caribbean. *Geological Society of America Bulletin*, **111**: 831–848.