UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

A influência da evolução de altos estruturais em sucessões aluviais: exemplos do Ediacarano e do Cambriano da Bacia Camaquã (RS)

André Marconato

Orientador: Prof. Dr. Renato Paes de Almeida

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo 2010

Resumo

Análises de proveniência sedimentar são tradicionalmente utilizadas com o objetivo de reconstruir a relação entre depósitos sedimentares e suas respectivas áreas fonte, de forma a permitir a composição do contexto tectônico regional. Uma aplicação menos explorada dos métodos de análise de proveniência sedimentar é a avaliação detalhada das variações de áreas fonte ao longo da história de preenchimento de uma bacia sedimentar e das variações locais de proveniência em intervalos estratigráficos específicos. Tais estudos podem trazer importantes inferências sobre a configuração dos alto estruturais vizinhos à bacia sedimentar, assim como informações a respeito de eventos tectônicos capazes de mudar o padrão das drenagens que alimentam a bacia sedimentar.

Na Bacia Camaquã (Ediacarano-Cambriano, RS) o Grupo Santa Bárbara e o Grupo Guaritas registram eventos de atividade de altos estruturais durante a sedimentação, responsáveis pela segmentação da bacia em sub-bacias. O Grupo Santa Bárbara compreende sucessões siliciclásticas distribuídas em três sub-bacias separadas pelos altos de Caçapava do Sul e da Serra das Encantadas. Na sub-bacia ocidental esse grupo apresenta depósitos de arenitos e conglomerados aluviais, depósitos siltoarenosos de ambientes fluviais distais e lacustres e depósitos conglomeráticos de leques aluviais, que compõem um ciclo retrogradacional inicial, seguido por dois ciclos progradacionais separados por uma superfície brusca. O Grupo Santa Bárbara na sub-bacia central, por sua vez, apresenta uma sucessão siltoarenosa com base conglomerática, que se estende até a porção média da sucessão sedimentar, quando dá lugar a depósitos conglomeráticos de leques aluviais que são depois sucedidos por nova sucessão siltoarenosa no topo da unidade. O Grupo Guaritas apresenta depósitos de rios entrelaçados na base e no topo da unidade, com interdigitação de sistemas deposicionais eólicos, de rios entrelaçados e de leques aluviais na porção intermediária da sucessão.

Os depósitos do Grupo Santa Bárbara na sub-bacia ocidental foram investigados em detalhe por meio de levantamentos sistemáticos de dados de proveniência em escala de afloramento, em lâmina delgada e por meio de análises isotópicas em zircões detríticos. Os resultados mostram áreas fonte distintas entre os depósitos aluviais da base e do topo da

unidade, sendo que em ambos a proveniência é local. Os depósitos da base têm áreas fonte a oeste e sudoeste da bacia, enquanto os depósitos do topo da unidade têm áreas fonte a leste da bacia, no alto de Caçapava da Sul, sugerindo uma mudança na configuração das áreas fonte que teria início correspondente ao primeiro nível conglomerático da sucessão aluvial intermediária da unidade. Adicionalmente os dados de proveniência indicam ausência de deslocamento entre áreas fonte e depósitos sedimentares indicando que o rejeito das falhas de borda é normal, como esperado para bacias do tipo rift. As sucessões sedimentares do Grupo Santa Bárbara na sub-bacia central foram investigadas de maneira preliminar por meio de análise de proveniência macroscópica. Os dados indicam pouca variação de áreas fonte na história da bacia, com áreas fonte predominantemente no Alto da Serra das Encantadas, que estaria então soerguido. Nos depósitos conglomeráticos superiores há uma contribuição de litoclastos atribuídos ao Alto de Caçapava do Sul.

O Grupo Guaritas teve depósitos sedimentares do topo de sua sucessão estudados por meio de análise de proveniência macroscópica em depósitos de leques aluviais e em depósitos fluviais, que cobrem os anteriores em contato erosivo. Os dados apontam para proveniência estritamente local, do Alto da Serra das Encantadas nos depósitos de leques aluviais, enquanto que os depósitos fluviais contam com áreas fonte mais distantes, sugerindo que o Alto da Serra das Encantadas sofreu subsidência e foi recoberto nesse intervalo de tempo.

Os dados indicam que o soerguimento do Alto de Caçapava do Sul, que se deu durante a deposição do Grupo Santa Bárbara e individualizou a sub-bacia ocidental, teria provocado uma progradação instantânea dos depósitos sedimentares, ao contrário do previsto em modelos tectônicos disponíveis, em consequência do aumento do aporte sedimentar pela erosão de sedimentos pouco litificados depositados sobre o Alto de Caçapava do Sul e de uma queda na taxa de subsidência das bacias provocado por um amplo domeamento antes da nucleação da falha de borda. Tal progradação está registrada nas sucessões aluviais intermediárias do Grupo Santa Bárbara nas sub-bacias ocidental e central. Após o estabelecimento da falha normal na borda leste do alto estrutural há uma passagem brusca para depósitos mais distais, na sub-bacia ocidental seguida de progradação sugerindo que o soerguimento do Alto de Caçapava do Sul tenha resultado na captura de um sistema de drenagem que alimentava toda a bacia para o graben da bacia ocidental, diminuindo assim o aporte sedimentar na sub-bacia central.

O Grupo Guaritas indica, por sua vez, uma situação inversa, com mudança nos sistemas deposicionais provocada pela subsidência do Alto da Serra das Encantadas, que teria permitido a captura de sistemas de drenagem para dentro da bacia, promovendo o aumento do aporte sedimentar e a substituição dos sistemas eólicos e de leques aluviais por sistemas fluviais entrelaçados.

Abstract

Sedimentary provenance is generally used aiming the reconstruction of the relations between sedimentary deposits and their source areas, in order to interpret the regional tectonic setting. An application that is less frequent in sedimentary provenance analysis is the detailed assessment of the changes in the source areas during the infilling history of a sedimentary basin and of the local variation of the provenance data in specific stratigraphic intervals. Such studies can result in important inferences concerning the configuration of adjacent structural highs, as well as information about tectonic events that are capable of changing the drainage network feeding the sedimentary basin.

In the Camaquã Basin (RS) the Santa Bárbara and Guaritas groups register events of syn-sedimentary movement of structural highs, which caused the segmentation of the basin into sub-basins. The Santa Bárbara Group comprises siliciclastic successions distributed in three sub-basins separated by the Caçapava do Sul and Serra das Encantadas structural highs. The western sub-basin contains alluvial sandstones and conglomerates, siltstones and sandstones of fluvial and lacustrine environments, and alluvial fan conglomerates, disposed in a initial retrogradatinoal cycle, and two overlying progradational cycles, which are separated by a abrupt flooding surface. In the central sub-basin, the Santa Bárbara Group comprises a siltstone and sandstone succession with conglomerates at its base, followed by alluvial fan conglomeratic deposits in the middle part of the sedimentary succession, which in turn is succeeded by another succession of siltstones and sandstones at the top of the group. The Guaritas Group shows braided river and alluvial fan systems in the intermediate part of the succession.

The deposits of the Santa Bárbara Group in the western sub-basin were investigated in detail through systematic studies of provenance both at the outcrop scale and in thin sections and by detrital zircon isotope analysis. The results show distinct source areas for the alluvial deposits of the base and the top of the unit, with a local sources for both of them. The lower deposits had source areas to the west and southwest of the basin, while the upper ones had source areas to the east of the basin, on the Caçapava do Sul High, suggesting a change in the configuration of the source areas, with its onset corresponding to the first conglomeratic level of the intermediate alluvial succession of the Santa Bárbara Group. The provenance data also shows that there is no significant lateral displacement deposits relative to their source areas, suggesting that the main displacement of the border faults was normal, as expected for rift basins. The sedimentary successions of the Santa Bárbara Group in the central sub-basin were preliminarily investigated through macroscopic provenance analysis. The data implies only in small changes of the source areas through the history of the basin, with source areas in the Serra das Encantadas High, which was then uplifted. In the upper conglomeratic deposits there is some contribution of lithoclasts from the Caçapava do Sul High.

The sedimentary deposits of the top of the Guaritas Group were studied through macroscopic provenance analysis in alluvial fan and fluvial deposits, the latter covering the alluvial fans in erosive contact. The data points to strictly local provenance, from the Serra das Encantadas High in the alluvial fan deposits, while the fluvial deposits had also more distant source areas. This suggests that the Serra das Encantadas High subsided during this period, and was covered by the younger fluvial deposits.

The collected data suggests that the Caçapava do Sul High uplift, which took place during the deposition of the Santa Bárbara Group and individualized the western sub-basin, triggered a progradation of the sedimentary deposits. This is not in accordance with the existing models, and could be explained as a result of both of an increase in the sedimentary input by erosion of unlithified sediments deposited on the Caçapava do Sul High and of the fall in the subsidence rates of the sedimentary basins due to a wide doming before the nucleation of the main border fault. Such progradation is registered in the alluvial successions of the Santa Bárbara Group in the western and central sub-basins. After the definition of the normal faulting in the eastern border of the structural high, an abrupt passage to distal facies took place in the occidental sub-basin, which was in turn was followed by progradation of clastic wedges on the top of the unit, while in the central sub-basin there is a retrogradation, suggesting that the uplift of the Caçapava do Sul High would have resulted in the capture of a main drainage system, that fed the entire basin, to the western basin graben, and so decreasing the sedimentary input to the central sub-basin.

The Guaritas Group in its turn indicates a change in the depositional systems caused by the subsidence of the Serra das Encantadas High, which allowed the capture of drainage systems to the basin, thus increasing the sedimentary input and the substitution of the eolian and alluvial fan systems by braided fluvial systems.

Agradecimentos

Gostaria de expressar neste espaço os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que participaram ou contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato Paes de Almeida pelo incentivo e pelo entusiasmo ao longo do desenvolvimento do projeto assim como pela oportunidade oferecida de realização de estágio no exterior.

Aos meus pais agradeço pelo suporte e pelo incentivo, sem os quais não poderia ter realizado o este trabalho.

À Jussara pela companhia e pela compreensão durante todo esse período.

Aos Professores Dr. André Oliveira Sawakuchi e Dr. Antônio Romalino Fragoso-Cesar pela companhia nas atividades de campo, assim como os pós graduandos Felipe Torres Figueiredo, Maurício G.M. dos Santos, Jorge E.S. Nóbrega, Carlos Guedes, Lucas P.S. Godinho e as graduandas Maria Carolina Catunda e Letícia F. Guimarães.

Ao meu amigo Flávio R. da Silva pelas discussões enriquecedoras.

À assistente técnica financeira Maria Ivone Basso agradeço pela cooperação na aquisição de recursos para compra de passagens aéreas para o estágio no exterior.

Aos professores Dr. Guilherme Gualda e Dr. Brendan Bream da Vanderbilt University pela oportunidade de realização de estágio no exterior e pela colaboração na aquisição de dados isotópicos de zircão detrítico, assim como agradeço à Dra. Lily Clairborne e Steven Braun pela ajuda e cooperação nas etapas de preparação de amostras de zircão e durante as análise no LA-ICPMS.

Aos colegas que me acolheram durante o estágio no exterior e que tornaram mais agradável o período longe de casa, em especial Andrew Roberts, Tamara Carley, Jonh Roseberry e Hannah Hudson.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsa de estudos (processo 07/56826-3).

Sumário

I.Considerações iniciais	1
I.1Objetivos	4
I.2Revisão bibliográfica	5
I.2.1Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental e Central	6
I.2.2Grupo Guaritas	9
I.3Métodos	12
I.3.1Análise de fácies	12
I.3.2Análise de proveniência macroscópica	12
I.3.3Pré-tratamento estatístico de dados de proveniência macroscópica	13
I.3.4Análise de proveniência microscópica	16
I.3.5Análise de proveniência isotópica em zircão detrítico	17
II.Resultados	20
II.1A influência do soerguimento de alto interno à bacia sobre os sistemas depos	icionais na
Sub-Bacia Camaquã Ocidental	20
II.1.1Análise de fácies sedimentares	20
II.1.2Proveniência macroscópica	27
II.1.3Proveniência microscópica	42
II.1.4Proveniência isotópica	46
II.1.5Discussão	50
II.2Os eventos de ativação dos altos de Caçapava do Sul e da Serra das Encantad	las e sua
influência na sedimentação dos grupo Santa Bárbara e Guaritas na sub-bacia Ca	maquã
Central	53
II.2.10 Grupo Santa Bárbara na Sub-bacia Camaquã Central	53
II.2.20 Grupo Guaritas na Sub-Bacia Camaquã Central	57
III.Conclusões	63
Referências Bibliográficas	67
ANEXO 01	
ANEXO 02	

Lista de figuras

Fig. 01: Mapa Regional da Bacia Camaquã3
Fig. 02: Prancha de fácies sedimentares generalizadas para os depósitos sedimentares do
Grupo Santa Bárbara
Fig. 03: Localização dos pontos de análise de proveniência macroscópica na Sub-Bacia
Camaquã Ocidental
Fig. 04: Seção colunar da Formação Estância Santa Fé26
Fig. 05: Prancha de fotos com os litotipos mas importantes encontrados em análise de
proveniência macroscópica
Fig: 06: Dados de proveniência sedimentar obtidos em conglomerados do Grupo Santa
Bárbara e sua correspondência entre unidades e nível estratigráfico relativo32
Fig. 07: Variação da Proveniência em área nos diferentes sítios de análise de proveniência do
Grupo Santa Bárbara e relação com as rochas fontes próximas
Fig. 08: Diagrama de espalhamento e loading plot para as análise de proveniência
macroscópicas
Fig. 09: Curvas de evolução de dados de proveniência microscópica coletados na Formação
Serra dos Lanceiros
Fig. 10: Diagramas de probabilidade de idades de zircões detríticos45
Fig. 11: Localização em planta das análises de proveniência macroscópica no Grupo Santa
Bárbara na sub-Bacia Camaquã Central53
Fig. 12: Posicionamento estratigráfico das amostras de análise de proveniência macroscópica
obtidos no Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Central54
Fig. 13: Mapa geológico do Grupo Guaritas na Sub-Bacia Camaquã Central57
Fig. 14: Dados de proveniência macroscópica obtidos nas formações Pedra das Torrinhas
(GPT) e Serra do Apertado (GSA) no Grupo Guaritas

Lista de tabelas

Tabela 01: Dados de proveniência macroscópica expressos em porcentagem	.30
Tabela 02: Dados obtidos na análise de proveniência em lâmina delgada para depósitos do	
topo da Formação Serra dos Lanceiros	.43
Tabela 03: Dados de proveniência macroscópica dos grupos Santa Bárbara e Guaritas na Su	ıb-
Bacia Camaquã Central expressos em porcentagem	.59

I. Considerações iniciais

Estudos de proveniência sedimentar são uma importante ferramenta para a reconstituição da paleogeografia e do contexto tectônico de bacias sedimentares. Estudos de proveniência por métodos convencionais, entre eles contagem de clastos em afloramento, contagem de grãos em seção delgada e em concentrados de minerais pesados, ou por métodos de análise isotópica, são geralmente utilizados para inferir a relação entre a bacia e suas áreas fonte, levando à interpretações sobre o contexto tectônico regional. Uma outra aplicação da análise de proveniência, utilizada com menos frequência, é a reconstituição detalhada das variações de áreas fonte ao longo da evolução de uma determinada bacia e das variações locais da proveniência em determinados intervalos estratigráficos. Tais estudos podem trazer importantes inferências sobre o arranjo dos altos adjacentes à bacia e sobre os eventos tectônicos modificadores dos padrões das drenagens alimentadoras, com implicações para o modelamento dos controles externos na arquitetura deposicional.

Um aspecto pouco estudado da evolução de bacias sedimentares, passível de abordagem por análise de proveniência integrada a estudos de sistemas deposicionais, é o papel da ativação de altos internos durante a sedimentação. A segmentação de bacias tectonicamente ativas por altos de embasamento pode modificar os padrões de sedimentação pela alteração da relação entre aporte sedimentar e espaço de acomodação. Tais modificações podem decorrer de incremento na produção sedimentar pelo aumento do gradiente das fontes, de modificações nas taxas de subsidência em diferentes áreas da bacia durante os eventos de ativação, e de mudanças na rede de drenagem alimentadora da bacia, com possível captura de drenagens principais para dentro ou fora de uma determinada sub-bacia. De forma análoga, a subsidência de altos internos a sistemas de bacias promove mudanças de mesma magnitude.

Visando contribuir para a compreensão dos efeitos de altos internos na sedimentação de bacias tectonicamente ativas, a presente dissertação apresenta os resultados de estudos detalhados da variação estratigráfica da proveniência sedimentar de duas sucessões do Neoproterozoico-Cambriano do sul do Brasil, pertencentes à Bacia Camaquã.

A Bacia Camaquã, localizada no centro-sul do estado do Rio Grande do Sul (Fig. 01), é a mais extensa e mais completa dentre o sistema de bacias encontrado ao longo da faixa

I.Considerações iniciais

de afloramento que se estende do Uruguai ao Sudeste do Brasil (Almeida *et al.* 2010). Essas bacias corresponde a sucessões confinadas em bacias isoladas e delimitadas por falhas, sendo importante sítios de estudos para os processos geológicos que tomaram parte do período compreendido entre o fim dos eventos orogênicos neoproterozoicos que formaram Gondwana e o início da sedimentação de sinéclises fanerozoicas, como a Bacia do Paraná. A Bacia Camaquã pode ser dividida em três sub-bacias (Ocidental, Central e Oriental) separadas pelos altos estruturais de Caçapava do Sul e da Serra das Encantadas (Fig. 01), que apresentam evidências de eventos de ativação recorrentes.

A área de estudo compreende exposições dos grupos Santa Bárbara e Guaritas da Bacia Camaquã, depositados respectivamente no fim do Ediacarano e no Eocambriano. O Grupo Santa Bárbara é encontrado nas três sub-bacias, sendo que em cada uma apresenta uma sucessão sedimentar distinta. Os depósitos encontradas na Sub-Bacia Ocidental, sua área-tipo, podem ser interpretados como depositados em ambientes continentais e compreendem sistemas deposicionais aluviais tanto proximais quanto distais, incluindo sistemas fluviais, leques aluviais, planícies aluviais de rios efêmeros e depósitos lacustres localizados, distribuídos ao longo de cinco formações, da base para o topo: Formação Estância Santa Fé, Formação Seival, Formação Serra dos Lanceiros, Formação Arroio Umbu e Formação Pedra do Segredo. Os depósitos sedimentares do Grupo Guaritas, encontrado na Sub-Bacia Camaquã Central, também representam ambientes continentais, com depósitos aluviais e eólicos divididos em cinco formações: Formação Guarda Velha, com depósitos de rios entrelaçados; Formação Pedra das Torrinhas com depósitos de leques aluviais; Formação Varzinha, com depósitos fluviais efêmeros; Formação Pedra Pintada, com depósitos eólicos; Formação Serra do Apertado, com depósitos fluviais entrelaçados.

A individualização da Sub-Bacia Camaquã Ocidental teria se dado por meio da ativação de alto estrutural interno à bacia, representado hoje pelo Alto de Caçapava do Sul. A ativação do alto estrutural teria ocorrido durante a deposição do Grupo Santa Bárbara, implicando em mudanças no padrão de preenchimento da bacia, bem como na distribuição dos sistemas deposicionais encontrados na unidade. As particularidades da ativação de um alto estrutural interno à bacia durante a sedimentação pode resultar também em padrões de preenchimento diversos dos previstos para a ativação de altos estruturais adjacentes às bacias



Fig. 01: Mapa Regional da Bacia Camaquã, com destaque para o Grupo Santa Bárbara e o Grupo Guaritas. Modificado de Almeida (2005).

sedimentares, o que confere especial interesse ao caso estudado. Os efeitos da ativação desse alto estrutural interno à bacia podem ser comparados a caso semelhante, ocorrido durante a deposição do Grupo Guaritas, com as consequências da atividade do alto estrutural da Serra das Encantadas na borda leste da Sub-Bacia Camaquã Central.

Estudos de proveniência se mostram como importante ferramenta para estudo da evolução sedimentar dos grupos Santa Bárbara e Guaritas, uma vez que estes possuem depósitos aluviais conglomeráticos em diferentes níveis estratigráficos e com considerável dispersão em área, de modo a permitir que estudos quantitativos de proveniência em escala de afloramento reconstituam não só a variação em área, mas também no tempo, das áreas fonte

da bacia. A combinação de dados de proveniência com dados de fácies sedimentares permite reconstituir a história da evolução de um alto estrutural interno simultâneo ao preenchimento de bacia sedimentar, bem como permite avaliar os efeitos que este evento pode exercer sobre a distribuição dos depósitos sedimentares em uma bacia dominada por sedimentação em ambientes continentais.

I.1 Objetivos

Os principais objetivos deste estudo envolvem o aprimoramento dos modelos de resposta sedimentar a eventos de ativação de altos estruturais, com ênfase nos casos de soerguimento de altos internos a sistemas de bacias, que resultam na individualização de subbacias durante a sedimentação. Para tanto, objetivos parciais incluíram a obtenção de dados sobre a variação estratigráfica e em área da proveniência em sucessões sedimentares dos grupos Santa Bárbara e Guaritas da Bacia Camaquã e sua integração com informações sobre a evolução estratigráfica dos sistemas deposicionais nessas unidades.

No caso do Grupo Santa Bárbara, os dados foram obtidos a partir de análise sistemática de proveniência sedimentar em conglomerados e arenitos conglomeráticos, integrados a dados de contagem em lâmina delgada e dados isotópicos de zircões detríticos obtidos em intervalos e pontos específicos da sucessão sedimentar. Essa abordagem foi realizada visando a reconstituição da evolução dos altos adjacentes a cada sub-bacia, registrada na variação de proveniência sedimentar. Dessa forma as interpretações a respeito da evolução das áreas fontes foram combinadas com dados de análise de fácies de maneira a permitir a interpretação da variação do aporte sedimentar resultantes das modificações nos sistemas de drenagem alimentadores da Sub-Bacia Camaquã Ocidental. Adicionalmente foi realizada a comparação com dados de proveniência sedimentar obtidos na Sub-Bacia Camaquã Central a fim de se complementar as inferências a respeito do evento responsável pela configuração da Sub-Bacia Camaquã Ocidental em uma calha isolada pela ativação do alto estrutural de Caçapava do Sul, bem como avaliar os efeitos deste evento tectônico sobre os sistemas deposicionais do Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental, e compará-los com os efeitos da atividade de altos estruturais inferidos nos Grupos Santa Bárbara e Guaritas na Sub-Bacia Camaquã Central.

O objetivo final foi a geração de um modelo de preenchimento de bacias de subsidência mecânica que leva em conta a reativação de altos internos ao longo da evolução da bacia sedimentar e suas particularidades, em confronto aos modelos convencionais de preenchimento de bacias de subsidência mecânica, que levam em conta apenas a ativação de altos estruturais vizinhos às calhas de sedimentação.

I.2 Revisão bibliográfica

Entre o sudeste do Brasil e o Uruguai há um cinturão de rochas de idade précambriana, que envolvem terrenos de origens variadas, como crátons e faixas móveis. Ao longo desta faixa de afloramentos há diversas ocorrências isoladas de depósitos de origem sedimentar e vulcânica, que não apresentam metamorfismo expressivo e possuem deformação essencialmente rúptil, sendo portanto posteriores aos eventos de deformação dúctil regional ocorridos no Neoproterozoico, além de serem recobertas pelos depósitos sedimentares da Bacia do Paraná, o que situa a geração desses depósitos sedimentares como ocorridos entre os eventos orogênicos Brasilianos e o surgimento das grandes bacias intracratônicas no Fanerozoico. A ocorrência desses depósitos é aparentemente condicionada por falhas de direção NE a NNE e são preenchidos por conglomerados e arenitos de ambientes continentais e marinhos costeiros, além de importante volume de rochas vulcânicas correlatas a corpos graníticos de afinidade alcalina.

Destas ocorrências, a Bacia Camaquã, localizada na região centro-sul do estado do Rio Grande do Sul sobre o Escudo Gaúcho, é reconhecida como a que detém a maior exposição em área destes depósitos, além de apresentar a coluna sedimentar mais completa.

Até meados da década de 90 o preenchimento da Bacia Camaquã foi interpretado como molássico, depositado em bacia de antepaís durante a Orogenia Brasiliana (Almeida 1967, Almeida 1969, Fragoso-Cesar 1984, Fragoso-Cesar *et al.* 1985, Fragoso-Cesar 1991). Porém ao longo da década de 90, com o avanço nos estudos dos depósitos da bacia e o aperfeiçoamento de modelos tectônicos, as sucessões da Bacia Camaquã passaram a ser considerados como depositadas em grábens durante toda sua atividade, ou ao menos durante

seus estágios finais. Dessa forma foram propostos modelos que descrevem as bacias como transcorrentes tardi a pós-orogênicas (Oliveira & Fernandes 1991, Oliveira & Fernandes 1992, Machado & Sayeg 1992), e modelos que consideram as bacias como rifts continentais, posteriores aos eventos orogênicos (*e.g.* Fragoso-Cesar *et al.* 2000, Janikian *et al.* 2003, Fambrini 2003, Almeida 2005).

As unidades compreendidas pela Bacia Camaquã podem ser agrupadas no Supergrupo Camaquã, que da base para o topo apresenta as seguintes unidades:

Grupo Maricá (siliciclástica inferior), Grupo Bom Jardim (vulcânicas básicas, intermediárias e ácidas, depósitos siliciclásticos e vulcanoclásticos), Formação Acampamento Velho (vulcânicas e vulcanoclásticas ácidas), Grupo Santa Bárbara (siliciclástica) e Grupo Guaritas (siliciclástica sobre discordância angular). Cada uma dessas unidades deve representar um evento distinto de subsidência mecânica, como sugerem as grandes espessuras de cada sucessão, de até mais de 4000 metros, e as diferenças de distribuição espacial e área de ocorrência. O supergrupo tem suas ocorrências controladas por falhas de direção NNE que isolam três sub-bacias separadas pelos altos de Caçapava do Sul e da Serra das Encantadas: as sub-bacias Camaquã Ocidental, Central e Oriental.

I.2.1 Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental e Central

A definição de Formação Santa Bárbara foi proposta por Robertson (1966) que elevou a antiga Série Camaquã (Carvalho 1929, 1932, Leinz 1939, Leinz *et al.* 1941) a grupo, dividindo-o internamente na Formação Santa Bárbara, definida na região do Vale do Santa Bárbara e correlacionada às sucessões inclinadas encontradas nos arredores das Minas do Camaquã, e na Formação Guaritas, formada por camadas horizontais em contato discordante com a unidade subjacente. Mais tarde, as sucessões consideradas por Robertson (1966) como pertencentes à Formação Santa Bárbara foram denominadas por Goñi *et al.* (1962) como Formação Camaquã.

Posteriormente, Ribeiro *et al.* (1966), seguindo proposta de Tessari & Picada (1966), baseada em atividades de mapeamento na região do Vale do Piquiri e Rincão dos Mouras, agrupam parte das sucessões reconhecidas como Formação Santa Bárbara no Grupo Bom Jardim e as denominam Formação Arroio dos Nobres, dividida em membros Mangueirão e Vargas.

Ribeiro & Lichtenberg (1978) incluem dentro do Membro Vargas os depósitos atribuídos à Formação Santa Bárbara por Ribeiro *et al.* (1966), e apresentam uma divisão informal dos depósitos clásticos da unidade em 5 níveis reconhecidos nas Minas do Camaquã: Arenito Inferior, Conglomerado Inferior, Arenito Intermediário, Conglomerado Superior e Arenito Superior.

Ribeiro & Fantinel (1978) redefinem o Grupo Bom Jardim na região das Minas do Camaquã, substituindo a Formação Arroio dos Nobres pela Formação Vargas, atribuindo a estes depósitos clásticos uma origem tectônica.

Gonzalez & Teixeira (1980), acompanham a proposta de divisão estratigráfica de Ribeiro & Lichtenberg (1978), e baseados em análise de fácies interpretam para o Membro Vargas uma origem em leques aluviais que desembocam em corpo da água, resultando em leques deltaicos, interpretação partilhada por Ribeiro *et al.* (1980) e desenvolvida posteriormente por Lavina *et al.* (1985) e Faccini *et al.* (1987).

Fragoso-Cesar *et al.* (1985) consideraram a sucessão superior do Grupo Santa Bárbara como correspondente à Formação Guaritas (sensu Robertson 1966), e realizaram análise de sistemas deposicionais para toda a sucessão da sub-bacia Camaquã Ocidental, interpretando uma origem em ambiente deltaico para as sucessões do Grupo Santa Bárbara.

Estudos de estratigrafia de sequências envolvendo toda a Bacia do Camaquã foram conduzidos por Paim *et al.* (1992, 1995), Paim (1994), subdividida em alogrupos e aloformações, com a interpretação de ambientes aluviais e de deltas lacustres e que provocaram impacto na definição das sucessões sedimentares tanto na região das Minas do Camaquã quanto no Vale do Santa Bárbara. Fambrini *et al.* (1996) por sua vez retomam o conceito de Formação Santa Bárbara para as mesmas sucessões sedimentares. Fambrini (1998), em estudo detalhado de fácies e proveniência nos depósitos na região das Minas do Camaquã, eleva a Formação Santa Bárbara à categoria de grupo, e interpreta a origem de seus depósitos como decorrente da atividade tectônica sin deposicional, que Fragoso-Cesar *et al.* (2000) reconhecem como distensiva, em contexto de bacias do tipo rift.

Paim *et al.* (2002) separam as sucessões equivalentes ao Grupo Santa Bárbara em dois alogrupos distintos, incluindo os conglomerados inferiores da unidade no topo do Alogrupo Cerro do Bugio (Aloformação Santa Fé) e as demais unidades (aloformações Serra dos Lanceiros e Pedra do Segredo) no Alogrupo Santa Bárbara.

Almeida (2001) sugeriu que os intervalos sedimentares interpretados como deltaicolacustres por Paim (1994) seriam correspondentes a planícies de marés, além de ter sido o primeiro autor a propor, apoiado em análises de paleocorrentes e de proveniência macroscópica, que o soerguimento da Alto Estrutural de Caçapava do Sul e sua consequente denudação teriam ocorrido durante a deposição das unidades superiores do Grupo Santa Bárbara. Borba *et al.* (2002) estudaram a evolução do alto estrutural com base em dados de traço de fissão de apatita, mas registram apenas eventos posteriores ao soerguimento do alto estrutural, durante o Fanerozoico, o que levou Borba & Mizusaki (2003) a considerarem o Alto Estrutural de Caçapava do Sul como soerguido desde o início da sedimentação dos depósitos que compõem o Grupo Santa Bárbara.

Fambrini (2003) apresenta proposta de correlação entre as sucessões encontradas na região das Minas do Camaquã com as sucessões do Vale do Santa Bárbara, à oeste, e do Vale do Piquiri e Rincão dos Mouras, à leste, estendendo para tais sucessões a classificação de Grupo Santa Bárbara. Fambrini *et al.* (2005) subdividem o Grupo Santa Bárbara na região das Minas do Camaquã em quatro formações, a saber: Formação Passo da Capela, com ritmitos de arenito fino e conglomerados interpretados como turbiditos; Formação Seival, com siltitos e arenitos interpretados como depósitos de planície de maré; Formação Rincão dos Mouras, com arenitos e conglomerados interpretados como depósitos de leques aluviais e de rios entrelaçados; Formação João Dias, com arenitos interpretados como depósitos. Fambrini *et al.* (2005) estendem ainda a divisão estratigráfica das sucessões sedimentares no entorno das Minas do Camaquã para as sucessões relacionadas ao Grupo Santa Bárbara

Almeida (2005) em revisão dos dados de mapeamento apresentados por Almeida (2001) interpreta para o Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental o domínio de sistemas deposicionais continentais, expressos principalmente na forma de sistemas aluviais,

sem no entanto correlacionar os depósitos da região do Vale do Santa Bárbara com outras ocorrências do Grupo Santa Bárbara, e subdivide a unidade em sua área tipo em cinco formações: Formação Estância Santa Fé, com depósitos de leques aluviais e de rios entrelaçados; Formação Seival, com depósitos distais de rios efêmeros; Formação Serra dos Lanceiros, com depósitos de rios entrelaçados; Formação Arroio Umbu, com depósitos de leques aluviais e de rios efêmeros; Formação Serra dos leques aluviais e de rios efêmeros; Formação Pedra do Segredo, com depósitos de leques aluviais e de rios entrelaçados

Justo (2003) e Almeida (2005) registram a presença de fragmentos provenientes do Alto de Caçapava do Sul a partir apenas da porção superior da Formação Serra dos Lanceiros, unidade intermediária do Grupo Santa Bárbara, descartando a possibilidade de contribuição de litoclastos do Granito Caçapava do Sul em formações anteriores do Grupo Santa Bárbara. Borba *et al.* (2008) seguindo Almeida (2001, 2005) propõem o início da contribuição do Alto de Caçapava do Sul durante o preenchimento da bacia sedimentar com base em dados petrográficos em dados isotópicos de Sm-Nd, porém sem qualquer consideração sobre o início da evolução do alto estrutural e seus efeitos sobre a sedimentação.

I.2.2 Grupo Guaritas

O primeiro trabalho a cunhar o termo Guaritas é devido a Robertson (1966), que em ampla revisão sobre os litotipos do Escudo Gaúcho definiu a ocorrência de brechas de talus e conglomerados de leques aluviais que afloram na Serra das Guaritas, a norte das Minas do Camaquã, como Formação Guaritas, dentro do Grupo Camaquã. Outros litotipos relacionados à Formação Guaritas foram descritos no por Ribeiro *et al.* (1966), como os arenitos com cruzadas de grande porte do morro da Pedra Pintada, então incorporados à Formação Santa Bárbara, e que mais tarde foram identificados como depósitos eólicos por Andreis em 1979 (comunicação verbal) e por Becker & Fernandes (1982) e incorporados à Formação Guaritas por Fragoso-Cesar *et al.* (1984). Rochas máficas agrupadas no Membro Rodeio Velho, interpretados por Robertson (1966) como derrames e associados a arenitos identificados como pertencentes à Formação Santa Bárbara, foram mais tarde relacionados ao Grupo Guaritas por Fragoso-Cesar *et al.* (1984).

Ribeiro et al. (1966) reconheceram ainda depósitos de leques aluviais, de deltas

I.2.2Grupo Guaritas

lacustres e fluviais nos depósitos que correspondem hoje ao Grupo Guaritas. Ribeiro (1970) por sua vez sugere uma subdivisão entre depósitos encontrados nas localidades do Passo da Guarda Velha e no Passo da Varzinha que mais tarde são denominadas de Camadas Guarda-Velha e Camadas Varzinha por Ribeiro & Lichtenberg (1978), sendo que as Camadas Guarda Velha, unidade inferior, corresponderiam a depósitos conglomeráticos em discordância angular com depósitos siltoargilosos do Grupo Santa Bárbara, primeiramente descritos por Ribeiro *et al.* (1966) e que gradam lateralmente para as Camadas Varzinha, que correspondem a camadas de arenitos intercalados a siltitos e com continuidade lateral.

Trabalhos de descrição de fácies conduzidos por Fragoso-Cesar (1984), Fragoso-Cesar *et al.* (1984, 1985) e Lavina *et al.* (1985) resultaram no detalhamento dos ambientes deposicionais dos depósitos relacionados à Formação Guaritas, com identificação de depósitos fluviais de rios entrelaçados, planícies eólicas e deltas lacustres. Faccini *et al.* (1987) sugeriram a intepretação de sistemas costeiros para depósitos de arenitos intercalados a camadas continuas de pelitos. Paim (1994), em trabalho detalhado de análise de fácies da Bacia Camaquã, reclassificou os depósitos de origem eólica e aluvial, os últimos utilizados por Paim *et al.* (1995) como critério para reconstruções paleogeográficas, e reinterpretou os depósitos costeiros como sendo depósitos de interdunas úmidas, detalhadas por Paim (1996), bem como propôs uma subdivisão do Grupo Guaritas baseado em critérios aloestratigráficos.

Trabalhos de análise de arquitetura sedimentar sobre os depósitos eólicos foram conduzidos com especial atenção às interações entre sistemas deposicionais eólicos e aluviais (Paim *et al.* 2002, Paim & Scherer 2003, Scherer *et al.* 2003, Teixeira *et al.* 2004, Marconato *et al.* 2009).

Paim (1994) e Paim *et al.* (1995, 2002) agruparam os depósitos relacionados às Camadas Guarda Velha e Varzinha sob a designação de Aloformação Varzinha, posicionada acima dos depósitos eólicos da Aloformação Pedra Pintada. Fragoso-Cesar *et al.* (1999) elevaram a Formação Guaritas à categoria de grupo, de maneira equivalente à proposta de Paim (1994), com a designação das Formações Pedra Pintada, equivalente à aloformação homônima de Paim (1994). Fragoso-Cesar *et al.* (1999) retomam ainda a interpretação de Ribeiro & Lichtenberg (1978) para as camadas Guarda Velha e Varzinha, classificando as mesmas como formações e posicionando a Formação Guarda Velha na base do Grupo Guaritas. Almeida (2005) propõe a interpretação dos sistemas deposicionais como sendo predominantemente continentais, com depósitos de rios entrelaçados, rios efêmeros, eólicos e de leques aluviais, e sugere o posicionamento da Formação Varzinha como inferior aos depósitos eólicos, propõe a criação da Formação Serra do Apertado, formada por conglomerados de rios entrelaçados depositados após os depósitos eólicos, e classifica os depósitos de leques aluviais reunidos sob o termo Ruditos Pedra das Torrinhas (Fragoso-Cesar 1991) como Formação Pedra das Torrinhas, sendo laterais aos depósitos das formações Varzinha e Pedra Pintada.

As rochas máficas do Rincão do Rodeio Velho têm suas relações de contato com arenitos a que são associadas interpretadas como intrusivas por Silva-Filho (1997) e Fambrini (1998), de modo que Fragoso-Cesar *et al.* (1999) propõem a utilização do termo Suíte Intrusiva Rodeio Velho, que tem sua idade determinada em 535 Ma (Ar-Ar em rocha total) por Almeida (2005).

Dados de proveniência sedimentar obtidos nos depósitos sedimentares do Grupo Guaritas envolveram a aplicação de análise da assembleia de minerais pesados conduzida por Nóbrega *et al.* (2008) nos depósitos fluviais e eólicos da unidade. Marconato *et al.* (2009, em anexo) apresenta dados de proveniência coletados em leques aluviais e depósitos fluviais do topo do Grupo Guaritas, indicando o Alto da Serra das Encantadas como principal fonte dos depósitos, enquanto que dados de proveniência isotópicas foram obtidas por Borba *et al.* (2003) em estudo de proveniência por meio da combinação de análises Rb/Sr e Sm/Nd em depósitos pelíticos do Grupo Guaritas e por Hartmann *et al.* (2008), que em estudo de zircões detríticos em depósitos fluviais do Grupo Guaritas do Alto da Serra das Encantadas e em rochas dos cinturões Dom Feliciano e São Gabriel.

Almeida *et al.* (2009), seguindo a proposta de classificação de sistemas deposicionais e de empilhamento estratigráfico apresentada por Almeida (2005), propõem a evolução do Rift Guaritas em dois estágios distintos de subsidência mecânica, com a sedimentação de depósitos fluviais entrelaçados da Formação Guarda Velha no primeiro estágio e a sedimentação de depósitos de leques aluviais, rios efêmeros e campo de dunas das formações Pedra das Torrinhas, Varzinha e Pedra Pintada no segundo estágio, além de um último estágio de subsidência termal (pós-rift), com sedimentação de depósitos fluviais entrelaçados da Formação Serra do Apertado.

I.3 Métodos

I.3.1 Análise de fácies

O procedimento adotado na interpretação de sistemas deposicionais foi a análise de fácies aplicada de acordo com Reading (1986), Walker (1992) e Miall (1990, 2000). A análise de fácies se baseou no agrupamento dos litotipos com estruturas semelhantes ou outras feições características representativas de processos particulares, de forma que através desta classificação seja possível compreender a relação entre os depósitos e reconstituir as características dos ambientes deposicionais.

Com o reconhecimento das fácies mais importantes de uma determinada exposição, serão posteriormente caracterizadas as associações de fácies, representativas de processos geneticamente ou cronologicamente associados e estabelecidos os modelos de fácies.

I.3.2 Análise de proveniência macroscópica

Métodos de análise de proveniência em conglomerados frequentemente são realizados apenas por meio da contagem do número de clastos para cada classe de litotipo definido pelo autor (*e.g.* Fambrini 1998, Roberts *et al.* 2008, Jones 2000), enquanto que outros autores recorrem à expressão em volume dos clastos para cada classe de litotipo estudado (*e.g.* Ibbeken & Schleyer 1991, Dürr 1996). O objetivo buscado ao medir o volume de clastos é conferir se há uma dependência sistemática sensível entre o tamanho do clastos e o litotipo (Dürr 1996), de maneira a obter uma estimativa de proveniência mais fiel à contribuição de diferentes áreas fonte para o preenchimento do depósito sedimentar, evitando que litotipos com clastos menores tenham sua contribuição superestimada enquanto litotipos com clastos maiores tenham sua participação subestimada.

Para a realização da presente dissertação, o método de proveniência utilizado consistiu no reconhecimento, em conglomerados e arenitos conglomeráticos, dos litotipos presentes na fração maior que 0,5 cm, com contagem de pelo menos 300 clastos em cada estação de análise. Para cada clasto são medidos seus eixos maior e menor em planta, acompanhado de classificação de forma, de modo a permitir o cálculo da expressão em área do fragmento contado, com o objetivo de minimizar um possível efeito de dependência entre o litotipo e o tamanho dos clastos contados.

A análise por meio da medida da área dos clastos foi escolhida por dois motivos principais: representar melhor a expressão da área fonte em depósitos sedimentares em comparação com o método de contagem da frequência de clastos de diferentes litotipos, quando se atribui igual peso a cada clasto contado; e pela impossibilidade de obter diretamente a expressão em volume da proveniência (*e.g.* Ibbeken & Schleyer 1991) devido a natureza dos depósitos estudados, visto que não permitem a desagregação do arcabouço dos conglomerados de modo a permitir a efetiva medição dos eixos, ou mesmo inferências (como proposto por Dürr 1994).

O objetivo do procedimento é a avaliação da contribuição das diversas áreas fonte, cujas litologias são identificadas em reconhecimentos regionais no embasamento, delineandose um quadro paleogeográfico de transporte sedimentar e evolução dos altos adjacentes à bacia.

I.3.3 Pré-tratamento estatístico de dados de proveniência macroscópica

De modo a viabilizar posterior análise estatística multivariada os dados de proveniência expressos em porcentagem precisam ser submetidos a um pré-tratamento estatístico. Os dados de proveniência sedimentar, aqui entendidos como dados composicionais, estão contidos num universo finito de dimensão definida, por exemplo, o intervalo de 0 a 100. Os dados apresentados dessa forma apresentam obrigatoriamente certa correlação, já que o aumento em importância de determinado componente implica necessariamente na diminuição dos demais. Aitchison (1986) sugeriu então que dados composicionais deveriam ser analisados levando-se em consideração a magnitude relativa e variação dos componentes, entendendo que a avaliação por valores absolutos seria inadequada

para avaliação de dados composicionais. Como o espaço real euclidiano se baseia em medidas absolutas, Aitchison (1986) propõe que as variação relativas entre componentes sejam medidas em escala logarítmica, por meio do uso de razões logarítmicas. Como a utilização de razões logarítmicas é inviabilizada pela existência de valores iguais a zero, torna-se necessário realizar substituição de valores nulos por outro valor definido (Aitchison 1986, Martín-Fernádez *et al.* 2003).

Como os valores zero encontrados em dados de proveniência seriam zeros arredondados, e não zeros absolutos (Martín-Fernández *et al.* 2003, Martín-Fernández & Thió-Henestrosa 2006), entende-se que o valor zero representa uma possível existência do componente, no entanto, abaixo do limite de detecção do método utilizado. Dessa forma, para permitir a transformação logarítmica, pode-se optar por adotar um método de imputação (Martín-Fernández *et al.* 2003), que consiste em forçar valores determinados no lugar do zero em um conjunto de dados incompleto. Para tanto, o método de imputação escolhido neste caso foi o de substituição multiplicativa (Martín-Fernández *et al.* 2003), que traz a vantagem de preservar a estrutura de covariância entre os componentes do conjunto de dados quando comparado a outros métodos de substituição.

Porém, ao invés de se escolher um valor fixo para a substituição de zeros, como por exemplo 65% do valor equivalente ao limite de detecção do método de análise, como utilizado por Martín-Fernández *et al.* (2003) e Palarea-Albaladejo *et al.* (2007), optou-se por uma estratégia alternativa, que além de resultar um valores abaixo do limite de detecção da análise de proveniência, equivalente a um clasto de 0,25 cm² de área, resultou também em valores individuais para substituição de zeros para cada sítio de contagem de clastos.

O valor escolhido para substituir o zero deveria ser um valor de área equivalente ao valor de erro amostral relacionado à sua ocorrência, de forma que o valor imputado fosse estatisticamente indistinguível de zero para aquela população. Para tanto, a substituição de zeros foi baseada no cálculo do erro amostral ε de cada observação que fosse equivalente a proporção real p de ocorrência de um componente presente numa contagem de população n, conforme a expressão seguinte:

$$\varepsilon = z \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad , \tag{1}$$

onde \mathcal{E} é o erro amostral relacionado à população *n*, e *p* é a proporção real de determinado componente e *z* é o valor relacionado a probabilidade de que \mathcal{E} seja no máximo equivalente a *p*.

Entendendo que cada observação corresponda ao limite de detecção do método de análise macroscópica de proveniência (um clasto de 0,5x0,5 cm), entende-se que para cada 1 cm² temos quatro observações, de modo que:

$$n = A \cdot 4$$
 , (2)

onde n é a população amostral e A corresponde à soma total das áreas dos componentes registrados em determinada estação de contagem. Isso garante que cada estação de contagem tenha um valor particular para substituição do zero, relacionado ao volume dos fragmentos encontrados no depósito, e portanto, relacionado à sua representatividade frente às possíveis áreas fonte.

Inserindo a expressão (2) na expressão (1) e utilizando para z o valor correspondente a uma probabilidade de 95%, temos a expressão:

$$\varepsilon = 1,96\sqrt{\frac{p(1-p)}{A \cdot 4}} \tag{3}$$

Quando para determinado valor de p, temos $\varepsilon = p$, entende-se que este valor representa a menor proporção possível de ocorrência de determinado componente em um sítio de contagem, de forma que este valor de p é utilizado para substituir o zero em componentes da análise de proveniência que não foram registrados em campo.

Em seguida é feita a normalização dos dados para que volte a haver o fechamento composicional da amostra em 100%, aplicando para cada componente que não teve seu valor substituído por E, a seguinte expressão:

$$C'_{i} = C_{i} \cdot \left(\frac{100 - E}{100}\right) \tag{4}$$

15

$$E = \left(\sum_{x \in C} x = \varepsilon\right) , \tag{5}$$

onde *C'i* é o valor normalizado da componente C_i e *E* representa a soma do erro ε de cada componente dentro do espaço amostral *C* que teve o valor 0 substituído pelo erro ε .

Uma vez que os valores iguais a zero foram substituídos no conjunto de dados, podese então realizar a transformação logarítmica. Representações logarítmicas podem ser obtidas por pelo menos três modos de transformação (reunidos em Pawlowsky-Glahn & Egozcue 2006) a saber: alr – razão logarítmica aditiva, ilr – razão logarítmica isométrica e clr – razão logarítimica centrada. Em cada transformação a composição de cada amostra é transformada em um vetor, sendo que para os dois primeiros métodos de transformação resultam vetores com uma componente a menos, enquanto no último o número de componentes é preservado. O método de transformação logarítmica escolhido neste trabalho foi a razão logarítmica centrada (clr), que consiste essencialmente na obtenção do valor logarítmico da divisão de um componente pela média geométrica dos componentes de uma amostra, conforme demonstrado na seguinte expressão:

$$clr(x_{1}, x_{2}, ..., x_{n}) = \left[\ln \frac{x_{1}}{(x_{1} * x_{2} * ... * x_{n})^{\frac{1}{n}}}, \ln \frac{x_{2}}{(x_{1} * x_{2} * ... * x_{n})^{\frac{1}{n}}}, \ln \frac{x_{n}}{(x_{1} * x_{2} * ... * x_{n})^{\frac{1}{n}}}, \ln \frac{x_{n}}{(x_{1} * x_{2} * ... * x_{n})^{\frac{1}{n}}}\right]$$
(6)

O método de transformação por *clr* foi escolhido por apresentar maior facilidade de interpretação geológica para os dados e por ser especialmente funcional em análise estatística multivariada, conforme exposto por Pawlowsky-Glahn & Egozcue (2006). Feita a transformação, os dados de proveniência estão prontos para serem submetidos a análise estatística multivariada.

I.3.4 Análise de proveniência microscópica

A análise em lâmina delgada de proveniência sedimentar foi conduzida em arenitos por meio de aplicação do método Gazzi-Dickinson (Ingersoll *et al*.1988), que propõe a contagem de 300 pontos por seção delgada em uma malha de pontos fixa (com a lâmina conduzida em um *chariot* acoplado a platina, por exemplo) e o registro não só do mineral

identificado como também do litoclasto no qual o mineral se encontra, caso seja um fragmento lítico. Tal método apresenta a vantagem de compensar a influência da granulação na composição dos fragmentos, já que grãos de dimensões maiores (diâmetro superior a 2 mm) podem ser contados mais de uma vez, registrando a participação da área fonte correspondente em termos mais próximo do volume de clastos fornecidos do que a frequência, eliminando parte do efeito de enviesamento causado por correlação entre espécie litológica e granulação.

Os dados obtidos a partir da contagem são posteriormente localizados na seção colunar correspondente e expostos e gráficos de linhas dos componentes mais significativos, de modo a permitir a visualização da contribuição de áreas fonte de especial interesse para os depósitos avaliados.

I.3.5 Análise de proveniência isotópica em zircão detrítico

A análise de proveniência em grãos detríticos tem sido usada com êxito para determinação de rochas fonte (Weislogel *et al.* 2006, Gehrels *et al.* 2003, DeGraaff-Surpless *et al.* 2002), com especial valor para realização de correlações estratigráficas em depósitos sedimentares que não contam com recursos de correlação mais tradicionais, como marcadores fósseis, horizontes estratigráficos amplos ou mesmo depósitos vulcanogênicos associados, situação frequente em depósitos sedimentares continentais de idade pré-Ordoviciana, anteriores portanto à disseminação de vegetais superiores.

A análise de proveniência por análise isotópica de grãos detríticos de zircão foi utilizada o com objetivo de determinar a proveniência sedimentar e de realizar correlações estratigráficas seria então ideal o Grupo Santa Bárbara, formado por depósitos sedimentares continentais, em sua maioria de origem aluvial (Almeida 2005).

Existem variados métodos de datação individual de grãos de zircão (Fedo *et al.* 2003), aplicáveis à realização de análise de proveniência, dentre os quais os mais utilizados são TIMS (termal ionization mass spectometry), SHRIMP (sensitive high resolution ion microprobe) e LA-ICPMS (laser ablation - inductively coupled plasma mass spectometry) (*e.g.* Gehrels *et al.* 2003, DeGraaff-Surpless *et al.* 2002, Hartmann *et al.* 2008).

Há discussão na literatura acerca de qual método seria mais adequado à estudos de zircões detríticos, com a finalidade de se determinar as diferentes rocha-fonte. Em revisão sobre o método, Fedo *et al.* (2003) alegam que o método LA-ICPMS seria o mais adequado em termos de custo e de número de grãos analisados se comparado aos procedimentos TIMS e ao SIMS (sensitive ion mass spectometry), conclusão compartilhada por Košler *et al.*(2002) em estudo comparativo entre os métodos TIMS e LA-ICPMS. Em estudo comparativo entre LA-ICPMS e SHRIMP (Gerdes & Zeh 2006), cuja amostragem é reconhecidamente mais precisa, chega-se à conclusão de que para estudos de proveniência os resultados ou são equivalentes, devido ao volume estatisticamente expressivo de material amostrado pelo LA-ICPMS, ou são melhores quando analisados pelo LA-ICPMS, devido a maior sensibilidade do SHRIMP à contaminação superficial por Pb comum.

Estudos de proveniência isotópica exigem a determinação geocronológica de número expressivo de grãos, especialmente quando se procura determinar quais são as possíveis rochas fonte, como feito por Van Wick & Norman (2004), Košler *et al.* (2002) e Hartmann *et al.* (2008), em populações de aproximadamente 100 grãos escolhidos de forma aleatória, ou alternativamente, pela procura de populações específicas, como feito por Gillis *et al.* (2005), que realizaram análises combinando resultados TIMS e LA-ICPMS em número reduzido de grãos. O número mínimo de análises necessárias para a realização de estudos de proveniência foi objeto de estudo de Dodson *et al.* (1988), que concluem que para reduzir a menos de 5% a possibilidade de não registrar determinado componente de proveniência devem ser datados ao menos 59 grãos. Vermeesch (2004) em revisão da proposta de Dodson *et al.* (1988), sugere um número mínimo de 117 grãos analisados para garantir uma confiança de 95% de que nenhuma fonte expressiva de detritos seja desconsiderada em estudos de proveniência, além de sugerir formas alternativas de apresentação dos estudos de proveniência obtidos com número inferior de análises.

As amostras submetidas à análise isotópica de zircões detríticos pelo método LA-ICPMS foram preparadas no laboratório de preparação de amostras do Department of Earth and Environmental Sciences da Vanderbilt University (Nashville, TN) seguindo procedimentos utilizados rotineiramente e padronizados para a separação e concentração de grãos de zircão (*e.g.* Fedo *et al.* 2003). Os procedimentos envolveram, nesta ordem, a limpeza das amostras, fragmentação das amostras em moinho de mandíbula até granulação aproximadamente de areia grossa, moagem dos fragmentos em moinho de disco para obtenção de fragmentos menores que 500 mícrons por peneiramento. Em seguida as amostras são submetidas a separação por decantação em equipamento de ultrassom, de modo a evitar a suspensão de grãos da fração pesada por floculação da bentonita. O concentrado de minerais pesados é então submetido a separação por líquidos densos combinados com o separador magnético Franz, de modo a se eliminar a fração de grãos magnéticos das amostras. Os concentrados de minerais pesados ricos em grãos de zircão foram então organizados em montagens de resina epóxi e depois destinados a imageamento de catodoluminescência e de elétrons retro-espalhados, realizados nas dependências do Department of Earth and Planetary Sciences, da University of Tennessee, Knoxville, de modo a permitir melhor identificação de potenciais alvos para determinações pontuais.

As determinações individuais em zircão detrítico foram realizadas em espectrômetro de massa (ICPMS) acoplado a plataforma universal com dispositivo de abrasão a laser pertencente à Vanderbilt University. As determinações contaram com feixe laser de cerca de 60 µm, sendo que aproximadamente a cada 10 determinações individuais em grãos de zircão eram feitas análises do cristal de zircão de referência std91500 para posterior correção de deriva instrumental.

Os dados obtidos por meio da análise em LA-ICPMS são posteriormente tratados por meio do software Isoplot 3.0 (Ludwig 2003), para construção de diagramas de probabilidade de idades.

II. Resultados

Durante a deposição das unidades que compõem o Supergrupo Camaquã ocorreram diversos eventos de soerguimento e subsidência de altos estruturais, sendo o soerguimento do Alto Estrutural Interno de Caçapava do Sul durante a deposição do Grupo Santa Bárbara um dos mais importantes, com efeitos nas sub-bacias Camaquã Ocidental e Camaquã Central. No Capítulo II.1 são considerados os efeitos desse soerguimento sobre os depósitos encontrados na então individualizada Sub-Bacia Camaquã Ocidental, enquanto que no Capítulo II.2 são discutidos dados preliminares sobre sua influência na sedimentação da Sub-Bacia Camaquã Central. Os eventos de ativação e subsidência do Alto da Serra das Encantadas, a leste da Sub-Bacia Camaquã Central, são também de grande importância nos padrões de sedimentação da Bacia Camaquã. Seus efeitos sobre os grupos Guaritas e Santa Bárbara nessa sub-bacia são também discutidos no Capítulo II.2.

II.1 A influência do soerguimento de alto interno à bacia sobre os sistemas deposicionais na Sub-Bacia Camaquã Ocidental

II.1.1 Análise de fácies sedimentares

A classificação, descrição e interpretação de fácies sedimentares foi realizada de maneira ampla em depósitos sedimentares do Grupo Santa Bárbara encontrados nas regiões do Vale do Santa Bárbara e das Minas do Camaquã. O objetivo foi o de fundamentar interpretações acerca dos sistemas deposicionais responsáveis pela deposição das unidades estudadas, bem como auxiliar na interpretação das informações obtidas na análise de proveniência, posto que os sistemas deposicionais podem ter influência determinante sobre a diversidade de áreas fonte identificada em determinado depósito sedimentar. As fácies sedimentares encontradas são descritas e interpretadas a seguir.

Ce – Conglomerado estratificado – fácies composta por conglomerado arenoso, com sua fração mais fina composta por areia grossa e mal selecionada, e com sua fração mais grossa ocorrendo frequentemente na granulação seixo a calhau, com diâmetro máximo em

geral ao redor de 30 cm, embora possa apresentar clastos de diâmetro superior a 50 cm nos depósitos de topo da Formação Pedra do Segredo. Ocorre em camadas tabulares métricas, com estratificação interna marcada pela alternância entre níveis mais ricos na fração arenosa e níveis mais conglomeráticos. Podem ocorrer também intercalados a camadas centimétricas da fácies Ap (Fig 02B). A proveniência observada é polimítica, sendo mais rica em detritos de origem vulcânica em depósitos na base do Grupo Santa Bárbara, enquanto que para o topo a proveniência se torna mais rica em clastos graníticos, especialmente em depósitos no topo da Formação Pedra do Segredo. A fácies é interpretada como resultante de fluxo não canalizado do tipo enchentes em lençol, em depósitos de leques aluviais (Blair & McPherson 1994) (Fig. 02A).

Ct – Conglomerado com estratificação cruzada tabular – fácies representada por conglomerado arenoso, com clastos que variam de seixo a calhau. Apresentam estratificação cruzada tabular de médio porte. Estão organizados em camadas de geometria lenticular de extensão métrica. A proveniência encontrada nesta fácies é polimítica, com significante variedade de litotipos. São interpretados como depósitos de barras longitudinais de sistemas fluviais com predomínio de carga de fundo, relacionado a canais entrelaçados (Fig. 02C).

Ab – Arenito com estratificação cruzada de baixo ângulo – fácies constituída de arenitos de granulação fina a média, com estratificação cruzada de baixo ângulo (Fig. 04E), com grânulos esparsos de até 0,5 cm de diâmetro, apresentando frequentemente lineação primária de corrente (Fig. 04F). Ocorre em camadas tabulares de espessura variável entre 5 e 15 cm, por vezes associadas a níveis conglomeráticos, apresentando-se geralmente no topo destes. Esta fácies é interpretada como produto de correntes aquáticas em leito não absolutamente plano, com suaves elevações depositadas por acréscimo vertical e paralelas à lâmina d'água, em regime de fluxo superior.

Aa – Arenito com estratificação cruzada acanalada – esta fácies é composta por arenitos arcoseanos de granulação média a grossa, frequentemente com grânulos e seixos esparsos. Apresentam estratificação cruzada acanalada de pequeno e médio porte, eventualmente com grânulos nos *foresets* (Fig. 04D). Ocorrem normalmente em camadas tabulares, com espessura entre 10 a 30 cm, embora possam ocorrer em camadas de geometria lenticular amplas, de extensão métrica, com espessura também decimétrica. São interpretados



como depósitos de dunas subaquáticas de cristas sinuosas, em correntes unidirecionais em regime de fluxo inferior (Fig. 02C).

At – Arenito com estratificação cruzada tabular – fácies formada por arenitos de composição arcoseana, com granulação média a grossa e que podem apresentar grânulos e seixos esparsos. A principal estrutura sedimentar é estratificação tabular de baixo ângulo. Estão organizados em camadas tabulares de espessura que varia entre 10 e 20 cm. São interpretados como depósitos de dunas subaquáticas de cristas retas a pouco sinuosas, em correntes trativas unidirecionais em regime de fluxo inferior.

Sa – Siltito e arenito fino – esta fácies é composta por camadas de siltitos, muitas vezes arenosos, intercalados a camadas de arenitos finos. A estrutura sedimentar mais comum nesta fácies é a laminação plano paralela, porém é comum que depósitos dessa fácies apresentem aspecto maciço. Ocorrem em camadas de geometria tabular pouco espessas, milimétricas a centimétricas. São interpretados como depósitos de decantação de material em suspensão.

Ac – Arenitos com laminação cruzada cavalgante – Fácies constituída por arenitos finos a muito finos, frequentemente micáceos, distintos por apresentarem laminação cruzada cavalgante assimétrica. Ocorrem em camadas tabulares com continuidade lateral, frequentemente intercalados a níveis de *SI*. A fácies é interpretada como formada pela atuação simultânea de processos de tração e suspensão (Fig. 02G).

Ao – Arenitos com marcas onduladas - Fácies constituída por arenitos finos a muito finos, frequentemente micáceos, com preservação de marcas onduladas no topo de camadas.
Pode ocorrer associada à facies Ac. A fácies é interpretada como formada por correntes subaquáticas, em geral rasas.

Pg – Pelitos gretados – Esta fácies é composta por siltitos e argilitos, frequentemente micáceos, em camadas gretadas de espessura centimétrica ou em lâminas recurvadas, exibindo forma poligonal em planta. Esta fácies ocorre frequentemente associada às fácies *Al* e *Ao*. Esta fácies é interpretada como formada por deposição por decantação em corpos de água estagnados, que passam em seguida à exposição subaérea e consequente gretamento. Sua associação com corpos arenosos das fácies *Al* e *Ao* sugere dessa forma alternância entre processos de tração e decantação, com eventual exposição subaérea.



Fig. 03: Localização dos pontos de análise de proveniência macroscópica na Sub-Bacia Camaquã Ocidental. Mapa geológico modificado de Almeida (2001).

Adicionalmente à análise de fácies englobando todas as unidades do Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental, foi levantada uma seção colunar na unidade de base do Grupo Santa Bárbara, a Formação Estância Santa Fé, com o objetivo de complementar o conjunto de dados apresentado com referência ao empilhamento estratigráfico do Grupo Santa Bárbara, conforme apresentado em Almeida *et al.* (em preparação, ANEXO 01).

A seções colunar foi levantada na porção sudoeste da área compreendida pelo Grupo Santa Bárbara na sub-bacia ocidental, na região do Cerro da Árvore (Fig. 03).

A seção colunar (Fig. 04) apresenta domínio de depósitos conglomeráticos na base da sucessão, logo acima de depósitos de derrames de rochas vulcânicas básicas a intermediárias do Grupo Bom Jardim, e que se estendem até a porção média da seção colunar (próximo à marca de 320 metros). Os depósitos conglomeráticos são compostos essencialmente da fácies Ce, intercalados eventualmente a camadas da fácies Ab, embora possam ocorrer sucessões de Ce sem que haja camadas arenosas presentes. Os depósitos compostos pela fácies Ce ou pela associação entre as fácies Ce e Ab ocorrem intercalados a depósitos formados pelas fácies Aa e Ab, com seixos esparsos, sendo pouco frequentes na base da sucessão (aparecendo apenas após a marca de 80 metros) e mais frequentes na porção intermediária da seção colunar (entre as marcas de 230 e 320 metros). Acima dos depósitos conglomeráticos e arenosos ocorre uma sucessão pobre em afloramentos, formada pela intercalação de depósitos siltoarenosos da fácies Sa, que domina o trecho da seção colunar entre as marcas de 320 metros até próximo a 470 metros, com a ocorrência de um nível composto pela fácies Ce aproximadamente entre 405 metros e 415 metros. Sobre a sucessão siltoargilosa ocorre novamente depósitos de Ce, intercalados a depósitos mais espessos de Ab, no intervalo entre as marcas de 470 metros e 500 metros. A partir da marca de 500 metros ocorrem afloramentos descontínuos de depósitos sedimentares compostos pelas fácies Aa e Ab, com uma leve tendência granodecrescente e progressiva diminuição na quantidade de seixos esparsos nos depósitos arenosos rumo ao topo da seção, até próximo da marca de 580 metros, quando clastos dispersos nos depósitos arenosos se tornam raros, embora possam haver níveis conglomeráticos. Acima do intervalo sem afloramentos passam a ocorrer depósitos da fácies Sa, com domínio de camadas siltosas sobre níveis arenosos, identificados como depósitos da Formação Seival.

A sucessão sedimentar da Formação Estância Santa Fé, aqui representada pela seção colunar apresentada, indica que o início da sedimentação da unidade foi dominada por depósitos de leques aluviais, representados pelas fácies Ce e Ab, com crescente participação



Fig. 04: Seção colunar da Formação Estância Santa Fé
de processos fluviais, representados por depósitos das fácies Aa e Ab. A tendência granodecrescente dos depósitos, interpretado como aumento da importância de depósitos fluviais sobre depósitos de leques aluviais, culmina na porção intermediária da seção em intercalação de níveis siltoarenosos da fácies Sa, que pode ser interpretado como depósitos de rios efêmeros distais, com deposição de material mais fino em amplas planícies de inundação. O nível conglomerático que ocorre no meio da sucessão siltoarenosa poderia ser resultado de um período de maior aporte sedimentar, ou de avanço da cunha clástica da bacia por condicionantes tectônicos (como diminuição da taxa de subsidência). Posteriormente aos depósitos fluviais efêmeros distais o aumento da granulação pode indicar a retomada de sistemas deposicionais de leques aluviais, que logo dão lugar a depósitos fluviais entrelaçados, que seguem até o topo da sucessão sedimentar da Formação Estância Santa Fé, quando por fim dão lugar aos depósitos siltoarenosos da Formação Seival, que representariam novamente a deposição em sistemas fluviais distais.

II.1.2 Proveniência macroscópica

As áreas fonte que afloram a sul e a oeste do Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental incluem rochas vulcânicas ácidas, intermediárias e básicas encontradas na Formação Acampamento Velho e na Formação Hilário do Grupo Bom Jardim, além de rochas siliciclásticas do Grupo Maricá e de granitoides dos stocks de Lavras do Sul, Jaguari e Santo Afonso, entendidos como relacionados com os derrames vulcânicos e distintos do Granito Caçapava do Sul devido a sua granulação em geral mais grossa, textura maciça e ocorrência de textura rapakivi. Diretamente a sul da bacia atualmente afloram filitos, rochas metavulcânicas e metavulcanossedimentares e gnaisses do Terreno Rio Vacacaí, com alguma contribuição de embasamento paleoproterozóico (Cráton Rio de La Plata).



Fig. 05: Prancha de fotos com os litotipos mas importantes encontrados em análise de proveniência macroscópica.: A – seixo de andesito; B – seixo de riolito; C – calhau de filito; D – seixo de granito milonítico; E – seixo de granito inequigranular; F – calhau de sienogranito. Marcas de escala no lápis são de 2 cm.

A diversidade de litotipos registrados nos dados de proveniência coletados em afloramento foi simplificada, sendo as litologias reclassificadas com o objetivo de reduzir o número classes, de forma que pudessem facilitar tanto a apreciação visual dos dados quanto a própria análise quantitativa da proveniência sedimentar, bem como sua posterior interpretação. Dessa forma foram enumeradas 13 classes de litotipos, generalizadas para todos

os depósitos dos grupos Santa Bárbara e Guaritas. A classe Andesito abriga litoclastos de rochas vulcânicas de composição básica a intermediária, sendo clastos de andesito o litotipo mais frequente (Fig. 05A), que podem ser originados principalmente de derrames da Formação Hilário do Grupo Bom Jardim; Vulcânicas Ácidas compreendem riolitos (Fig. 05B), tufos e ignimbritos relacionados aos depósitos vulcanoclásticos da Formação Acampamento Velho; Arenito envolve litoclastos de arenitos, em geral arcóseos, de granulação média a grossa, que correspondem a depósitos sedimentares previamente litificados do próprio Supergrupo Camaquã, como o Grupo Maricá e o Grupo Bom Jardim; a classe Quartzo de Veio representa clastos compostos essencialmente de quartzo esbranquiçado e maciço, frequentemente arredondados, que não representam uma área fonte específica, embora uma presença significativa desse litotipo em assembleias de proveniência sedimentar pode sugerir maior retrabalhamento ou transporte dos fragmentos de fontes distantes; Quartzo milonito por sua vez apresenta além da composição quartzosa, com algum feldspato ou sericita, estrutura milonítica. Em geral corresponde a zonas de cisalhamento que atravessam rochas do embasamento; Gnaisse envolve litoclastos com estrutura gnáissica, que podem corresponder a rochas do Terreno Rio Vacacaí ou mesmo do Cráton Rio de La Plata; A classe Metamórficas abriga litoclastos de rochas metamórficas de baixo grau, sendo em sua maioria filito (Fig. 05C) e sericita xisto, com uma contribuição menos expressiva de quartzito; Granito Milonítico (Fig. 05D) corresponde a litoclastos com estrutura milonítica e composição granítica, que podem ser relacionados a partes de corpos graníticos afetados por cisalhamento dúctil; Aplito corresponde a litoclastos de textura aplítica e granulação fina, originados de veios de aplito em granitos e encaixantes; Granodiorito envolve litoclastos de composição granodiorítica frequentemente foliados e com quantidade apreciável de biotita; Monzogranito abriga litoclastos de composição monzogranítica leucocráticos e com textura porfirítica; a classe Granito Inequigranular (Fig. 05E) é formada por litoclastos graníticos dominados por feldspato potássico em cristais de granulação variada, sem conteúdo significativo de minerais máficos, e com quartzo frequentemente apresentado textura venulada, que pode ter origem em fácies mais leucocráticas de corpos graníticos ou mesmo em veios pegmatoides; a classe Sienogranito (Fig. 05F) envolve litoclastos de composição sienogranítica, com biotita ou anfibólio como mineral acessório e eventualmente com textura rapakivi. Litoclastos que apresentem textura rapakivi são identificados com fácies do Granito Lavras do Sul.

11 1	10		<i>,</i> .	
11.1.	2Prov	eniencia	macroscopi	са

sienogranito	16.66	0.34	5.12	0.17	11.66			41.57	29.34	1.03	29.03	26.42	22.26	19.13	33.62		6.73	7.98	2.66	6.14	2.52	94.17	21.15	48.04	47.52	3.88	58.2
granito inequigranular	7.25	2.16							7.7		6.91		2.33		3.1	2.57	1.94	4.09	12.68	0.4		0.73	1.04	9.28			ŗ
monzogranito	4.92			0.38								1.69		·						0.82			1.5		·	4.11	ī
granodiorito																	8.11							2.05			·
aplito					0.41		5.41	0.92				0.82		5.02	2.37	1.92	3.44			1.96		0.74	2.26	6.73	1.03		I
granito milonítico	2.56	0.84						9.25				1.88	7.3	16.29	3.39	0.91	2.64	19.84			0.34	2.1	1.96	4.1		1.42	0.25
metamorficas	7.65		9.29		7.23	14.78	14.53	2.76	0.26	14.86	16.86	28.81	11.27	9.89	19.88	11.88	7.99	45.93	6.53	29.08	94.93		34.33	4.42	29.44	41.46	31.91
gnaisse								0.39			4.11	·		1.68		·		1.13	6.14								I
quartzo Milonito	1.54	0.63			2.47	0.21		3.34	5.35	7.2	1.86	4.13	8.68	12.77	7.12	1.06	6.42	4.46	30.57	5.71	0.55	1.43	0.44	1.49	3.31	12.38	0.05
quartzo de veio	0.26	,			0.2			0.53	2.5	0.68	4.31	1.95	0.96	5	0.37	1.28	1.78	5.9	7.52	1.05		0.12	0.64	1.01	0.79	0.29	ı
arenitos			7.95						3.72		1.7			9.31				3.24	1.94	1.94							·
vulcânicas ácidas	58.8	96.03	27.41	99.45	54.09	70.7	66.8	41.23	36.37	75.42	35.22	34.29	47.2	20.91	30.14		60.94	7.42	31.96	52.89	1.66	0.71	36.68	22.89	17.9	36.33	9.6
andesito	0.35		50.23		23.94	14.31	13.25		14.76	0.81		·				80.38									,	0.12	ı
	Fa01	Fa02	Fa03	Fa04	Fa05	Fa06	Fa07	Fa08	Fb01	Fb02	La01	La02	La03	La04	La05	Ua01	Sa01	Sa02	Sa03	Sa04	Sb01	Sb02	Sb03	Sb04	Sb05	Sb06	Sb07

Tabela 01: Dados de proveniência macroscópica expressos em porcentagem.

Os dados de proveniência em escala de afloramento, sumarizados na figura 06 e na tabela 01, apresentam de uma maneira geral notável componente proximal de proveniência, que deve ser sempre observada tendo em mente que tal resposta de proveniência sedimentar reflete a importância de depósitos de leques aluviais e de setores proximais de depósitos de rios entrelaçados na constituição dos depósitos conglomeráticos. Mesmo assim não se pode relevar a importância de áreas fonte mais distantes, especialmente nos depósitos fluviais da porção intermediaria do Grupo Santa Bárbara, que apresentam clastos de gnaisse e significativa quantidade de clastos de quartzo de veio, sugerindo maior maturidade composicional dos detritos e por conseguinte, maior retrabalhamento e/ou distância de transporte.

Os dados de proveniência obtidos na Formação Estância Santa Fé apresentam forte domínio de áreas fonte em depósitos vulcânicos, concentrados em riolitos e vulcanoclásticas ácidas, com contribuição variável de andesitos. Os depósitos conglomeráticos da Formação Estância Santa Fé apresentam ainda contribuição apreciável de litoclastos de origem granítica, com uma proporção menos importante de filitos e outros litoclastos de rochas metamórficas. Quando avaliada a distribuição em área dos dados de proveniência se observa que a ocorrência de litoclastos de andesitos na assembleia sedimentar fica restrita aos depósitos conglomeráticos adjacentes aos afloramentos de andesitos do Grupo Bom Jardim e que estes apresentam tendência de diminuição da contribuição de andesitos de sul para norte, ao par que a contribuição de litoclastos graníticos apresenta uma tendência de aumento nos mesmos depósitos. A norte do limite entre os depósitos do Grupo Bom Jardim e da Formação Acampamento Velho a proveniência sedimentar passa a ser quase exclusiva de litoclastos de riolito e vulcanoclásticas ácidas, a não ser por depósitos próximos do mencionado contato, que apresentam alguma contribuição granítica.

Acima dos depósitos da Formação Estância Santa Fé afloram depósitos de arenitos finos e ritmitos da Formação Seival, que não apresentam nenhum nível estratigráfico que viabilize uma avaliação de proveniência em escala macroscópica. De forma semelhante, a porção inferior da Formação Serra dos Lanceiros, composta de depósitos de arenitos finos a médios, não apresenta nenhum nível conglomerático, embora ocorram grânulos de maneira esparsa nos arenitos, em sua maioria de litoclastos graníticos e vulcânicos.



Fig: 06: Dados de proveniência sedimentar obtidos em conglomerados do Grupo Santa Bárbara e sua correspondência entre unidades e nível estratigráfico relativo. Atenção especial deve ser dada ao incremento de litoclastos graníticos nas unidades de topo do Grupo Santa Bárbara. Seção extraída de Almeida (2001).

A porção superior da Formação Serra dos Lanceiros, acima dos primeiros níveis conglomeráticos a aflorar na unidade, apresenta uma proveniência em escala de afloramento mais variada em cada sítio, e com maior homogeneidade entre os diferentes sítios de contagem, em relação à encontrada nos depósitos da Formação Estância Santa Fé e mesmo os depósitos da Formação Pedra do Segredo, apresentados adiante. Litoclastos de origem em áreas fonte graníticas, vulcânicas e metamórficas ocorrem em proporções bastante

equivalentes, sem que haja o domínio de uma classe litológica sobre outras na assembleia de litoclastos, o que sugere que controles locais sobre a proveniência destes depósitos não são importantes, e que pode ter ocorrido alguma homogeneização da composição dos litoclastos entre os depósitos sedimentares. Em relação aos depósitos encontrados na Formação Estância Santa Fé há uma maior contribuição de clastos de quartzo milonitos e de milonitos graníticos, que pode ser decorrência de aumento do aporte das áreas fonte destes litoclastos (associadas ao alto da Serra das Encantadas) ou então da inclusão de novas áreas fonte, um efeito que seria esperado da ativação de um alto estrutural que abrigasse esses litotipos.

A unidade estratigráfica seguinte, a Formação Arroio Umbu, apresenta em seus depósitos proximais uma contribuição dominada por litoclastos de origem vulcânica, seguidos em proporção por litoclastos de origem metamórfica, como xistos e filitos, e com uma contribuição mínima de litoclastos miloníticos e graníticos. Tal proveniência é reflexo do caráter proximal dos depósitos analisados, cuja área fonte era provavelmente representada principalmente pela cobertura vulcanossedimentar previamente depositada sobre a região que hoje corresponde ao Alto de Caçapava do Sul, mas que já contava com a contribuição de litotipos que compunham o embasamento de tais depósitos, como os litoclastos de origem metamórfica e os milonitos, que já se encontravam localmente expostos.

A unidade de topo do Grupo Santa Bárbara, a Formação Pedra do Segredo, apresenta um aumento progressivo de participação de litoclastos graníticos da base para o topo da sucessão, a ponto de apresentar depósitos com contribuição quase exclusiva de granitos em seus depósitos proximais no topo da unidade. De maneira semelhante, embora menos definida, há uma tendência de aumento na contribuição de clastos de origem metamórfica da base para o topo da sucessão, que também chega ao ponto de ser quase exclusiva devido a fontes locais de proveniência no topo da unidade. Como consequência do aumento em proporção de litoclastos graníticos, e em menor escala de litoclastos de origem metamórfica, há uma queda correspondente na contribuição de áreas fonte de origem vulcânica, indo da base para o topo da unidade. Quando analisados em área, é marcante a correlação entre a variação de proveniência sedimentar e área-fonte adjacente ao longo dos limites entre a borda da bacia e o Alto Estrutural de Caçapava do Sul, como será discutido em detalhe adiante.

Como os depósitos das formações Estância Santa Fé e Pedra do Segredo são em

II.1.2Proveniência macroscópica

parte compostos por depósitos proximais, em especial leques aluviais, estes oferecem a oportunidade de aferir a correspondência entre depósitos locais e as áreas fonte, bem como testar a hipótese de deslocamento relativo entre áreas fonte e depósitos proximais, situação esperada no caso das falhas de borda apresentarem rejeito predominantemente horizontal. Para tanto foi avaliada a similaridade entre os sítios de análise de proveniência macroscópica de cada uma das unidades por meio de análise multivariada. Os dados de análise de proveniência macroscópica foram organizados em dendrogramas para cada unidade e depois confrontados com a geologia local (Fig. 07).

O dendrograma da Formação Estância Santa Fé contém dois *clusters* principais que apresentam boa correlação com as áreas fonte imediatamente vizinhas aos depósitos da Formação Estância Santa Fé (Fig. 07). O *cluster* à norte apresenta maior parte dos seus sítios de contagem localizados a norte do limite entre os afloramentos das rochas vulcânicas do Grupo Bom Jardim (intermediárias a básicas) e da Formação Acampamento Velho (ácidas), agrupando dessa forma os depósitos que não apresentam contribuição significante de litoclastos de andesitos.

Dessa forma pode-se dizer que o principal fator controlador da similaridade entre estes sítios de contagem é a importante contribuição de litoclastos de riolito e em menor proporção de rochas vulcanoclásticas ácidas associada à ausência de litoclastos de andesito. A presença de proporções significativas de litoclastos de origem granítica e de tipos litológicos variados estaria associada com a subdivisão deste *cluster* em dois outros, o que poderia ser o produto de uma maior área de drenagem para os depósitos mais a sul, já que os depósitos sedimentares estudados não apresentam contato com corpos graníticos.

Por outro lado, o *cluster* sul abriga praticamente apenas sítios de contagem que repousam lado a lado com rochas vulcânicas do Grupo Bom Jardim, representado principalmente por andesitos, o que sugere que o principal fator que distingue este *cluster* é a presença, mesmo que pequena, de litoclastos de andesito, apesar de a diminuída contribuição granítica poder ter contribuído no agrupamento desses depósitos em um mesmo *cluster*; o que também pode indicar a contribuição de uma área fonte mais distante.

A Formação Pedra do Segredo por sua vez apresenta uma distribuição de *clusters* mais complexa (Fig. 07), embora apresente ainda uma boa correspondência com a geologia



Fig. 07: Variação da Proveniência em área nos diferentes sítios de análise de proveniência do Grupo Santa Bárbara e relação com as rochas fontes próximas. A – dendograma e distribuição dos sítios de análise de proveniência da Formação Estância Santa Fé; B – dendograma e distribuição de sítios de análise de proveniência para a Formação Pedra do Segredo. Os dendogramas foram construídos com o uso de medida de distância euclidiana combinada com o método de Ward de correlação. O mapa geológico é modificado de Almeida (2001).

local. A exemplo do ocorrido na Formação Estância Santa Fé o dendrograma separa os sítios de proveniência em dois *clusters* principais, que apresentam características que podem ser correlacionadas diretamente aos litotipos encontrados no alto estrutural adjacente. O *cluster* sul abriga dois dos pontos mais ricos em contribuição de litoclastos graníticos, embora o principal fator de correlação entre estes sítios de contagem seja a proporção relativa de outras espécies litológicas, como milonitos, litoclastos de origem metamórfica e aplito (Fig. 07 e Tabela 01). A abundância de litoclastos graníticos nestas estações de contagem, somada a menor importância do Alto de Caçapava do Sul, que expõe o granito homônimo e suas encaixantes metamórficas de baixo grau. A contribuição menos expressiva de litoclastos graníticos no ponto Sa01 pode ser decorrente do fato de ser um depósito localizado em um nível estratigraficamente inferior, correspondendo a um momento em que o Alto de Caçapava do Sul ainda não estava tão denudado, de modo que a proveniência seja mais rica em litoclastos oriundos de depósitos vulcânicos (Fig. 06 e Tabela 01) que cobriam a região correspondente ao alto estrutural.

O *cluster* norte por sua vez apresenta agrupamento dos sítios de contagem que não corresponde exatamente à posição geográfica desses sítios, ora agrupando sob o mesmo *cluster* pontos distantes, ora pontos vizinhos. A similaridade entre os sítios de contagem se deve principalmente à variação entre proporções de litoclastos graníticos e metamórficos e entre litoclastos de quartzo milonito e de milonito granítico. Tal controle sobre a similaridade dos depósitos reflete a relação com a área fonte logo a leste dos depósitos, composta por uma zona de cisalhamento milonítico que envolve quantidade variável de domínios metamórficos e graníticos bordejados por faixas miloníticas.

A distribuição mais difusa verificada no dendrograma da Formação Pedra do Segredo pode ser decorrente do fato de haver maior variedade de litotipos na assembleia de proveniência sedimentar macroscópica e da maior variação estratigráfica dos depósitos utilizados na análise; enquanto que na Formação Estância Santa Fé foram coletados dados em nível específico da unidade, no caso a base. Devido à abundância de conglomerados na Formação Pedra do Segredo, nesta foram coletados dados em diferentes níveis estratigráficos, o que pode resultar em ruído na análise da variabilidade espacial dos dados de proveniência, causado por variações no aporte sedimentar e evolução dos padrões de drenagem na história da sucessão.

A natureza proximal dos depósitos sedimentares encontrados nas formações Estância Santa Fé e Pedra do Segredo, especialmente quando levados em conta os depósitos de leques aluviais, importantes nas duas unidades, somados à forte correlação entre sítios de análise macroscópica de proveniência, indicam que a principal área fonte para ambas as unidades correspondem em sua maior parte aos litotipos encontrados em afloramentos adjacentes aos depósitos sedimentares, implicando dessa forma em áreas fonte distintas para a Formação Estância Santa Fé e para a Formação Pedra do Segredo, que apresentam áreas fonte na borda oeste-sudoeste e no Alto de Caçapava do Sul, respectivamente. Adicionalmente, a correlação geograficamente direta entre a proveniência dos depósitos conglomeráticos e suas respectivas área fonte indicam que não houve deslocamento lateral significativo entre as áreas fonte e os depósitos sedimentares respectivos, sugerindo que o rejeito das falhas de borda da bacia são predominantemente normais. Tal interpretação favorece a caracterização da bacia em que foi depositado o Grupo Santa Bárbara como um rift continental (Fragoso-Cesar *et al.* 2000, Almeida *et al.* 2010) em relação à interpretação de uma bacia transcorrente (Oliveira & Fernandes 1992, Machado & Sayeg 1992).

Outra abordagem utilizada para aferir a variação da proveniência em diferentes depósitos sedimentares é a análise de principais componentes (PCs), que permite observar quais as variáveis que melhor descrevem os dados de proveniência. A primeira (PC1), segunda (PC2) e terceira (PC3) componentes dos dados de proveniência macroscópica contribuem respectivamente a 20,7%, 18,7% e 12,6% da variabilidade total da mostra, de modo que a PC1 e a PC2 são responsáveis por 39,5% da variância total das amostras, e que podem ser representadas pelas seguintes equações:

Onde: and = andesite; vac = vulcanoclásticas ácida; are = arenito; qtz = quartzo de veio; qml = quartzo milonito; gne = gnaisse; met = metamórficas; mlg = milonito granítico;

PC1 = -0.297 and -0.230 vac + 0.242 are + 0.469 qtz + 0.365 qml + 0.366 gne - 0.180 met + 0.038 mlg - 0.303 apl - 0.227 gdi - 0.218 mgr + 0.269 gri + 0.130 sgr

PC2 = 0,327 and + 0,158 vac + 0,470 are - 0,108 qtz - 0,232 qml + 0,334 gne + 0,090 met - 0,425 mlg - 0,287 apl - 0,349 gdi + 0,140 mgr - 0,190 gri + 0,168 sgr + 0,090 met - 0,090 met

apl = aplito; gdi = granodiorito; mgr = milonito granítico; gri = granito inequigranular; sgr = sienogranito.

Os dados das PC1 e PC2 são apresentados em um diagrama de espalhamento (Fig. 08) com os pontos identificados de acordo com a unidade sedimentar em que o dado foi coletado (representado pela forma dos pontos) e com o tipo de depósito sedimentar, se de leques aluviais (símbolo preenchido) ou se de depósitos fluviais (símbolo vazio).

O diagrama de espalhamento se organiza em uma única nuvem de pontos contínua (Fig. 08), mas que pode ser separada em dois domínios de pontos distintos, separados pela valor zero da PC1, e que mostram uma certa sobreposição próximo a origem do gráfico. Os domínios identificados no gráfico separam os dados de análise de proveniência no que tange ao tipo de ambiente sedimentar em que foi formado o depósito, sendo que o domínio de pontos preenchidos representa dados coletados em depósitos de leques aluviais, encontrados nas formações Estância Santa Fé, Arroio Umbu e Pedra do Segredo, enquanto que o domínio de pontos vazios corresponde a dados obtidos em depósitos fluviais das formações Estância Santa Fé, Serra dos Lanceiros e Pedra do Segredo. Além da individualização dos domínios relacionada ao tipo de ambiente deposicional, não há nenhum sinal claro de individualização de domínios no que diz respeito a divisão por unidades estratigráficas, a não ser por uma tendência dos pontos de leques aluviais coletad0s na Formação Pedra do Segredo a se concentrarem mais próximos a origem do gráfico do que os pontos relacionados à Formação



Fig. 08: Diagrama de espalhamento e *loading plot* para as análise de proveniência macroscópicas. Símbolos fechados representam dados coletados em depósitos de leques aluviais enquanto que símbolos abertos representam dados obtido em depósitos fluviais.

Estância Santa Fé. Dessa forma pode-se concluir que o principal fator capaz de diferenciar os grupos de dados de proveniência é o caráter proximal ou distal das áreas fontes, que se relaciona respectivamente a depósitos de leques aluviais e depósitos fluviais.

O *loading plot* das PC1 e PC2 descreve, por meio de vetores o peso de cada componente da análise de proveniência na estrutura dos dados (Fig. 08), oferecendo um meio visual de apreciação das expressões que descrevem as PC1 e PC2. Por meio deste gráfico pode ser determinada a importância relativa de cada componente sobre a amostra ou grupo de amostras.

O domínio de dados de proveniência com valores de PC1 positivos, que envolve depósitos fluviais, é controlado principalmente por litotipos que apresentam menor importância relativa no conjunto total de dados, como por exemplo gnaisse, quartzo de veio e quartzo milonito. Tal fato indica que o principal fator que diferencia o conjunto de dados de proveniência dos dados de leques aluviais é a variabilidade da assembleia de dados em cada sítio de proveniência, indicando a importância de áreas de captação mais amplas nos depósitos fluviais. Essa interpretação é corroborada pela identificação de litotipos como gnaisse e quartzo de veio com áreas fontes mais distantes, posto que gnaisses afloram no embasamento do Cinturão Dom Feliciano e do Terreno Rio Vacacaí, além do Cráton Rio de La Plata, e não afloram nas imediações dos depósitos avaliados, e que a presença de quartzo de veio indica um grau maior de retrabalhamento, ou pelo menos maior distância de transporte dos clastos sedimentares.

Por outro lado, o domínio de dados de proveniência de valores negativos de PC1, formados por pontos de análise de proveniência coletados em depósitos de leques aluviais, tem sua estrutura controlada por litoclastos que aparecem em proporções maiores nas assembleias de dados de proveniência macroscópica, como andesito, riolito e rochas metamórficas, além de alguma importância de litotipos graníticos na estrutura do domínio. Tal efeito é resultado de uma natureza mais local das áreas fonte destes depósitos, que consequentemente apresentam uma proveniência menos variável, apresentando nenhum ou poucos litoclastos que possam ser relacionados a áreas fonte mais distantes. Tal característica implica em depósitos com área de captação mais restritas, ou que se localizam apenas sobre os depósitos adjacentes à área onde há sedimentação, sendo que tanto individualmente quanto combinados acabam por resultar em depósitos com menor variedade de espécies litológicas.

A sobreposição parcial dos dois domínios de pontos de análise de proveniência pode ser entendida como um efeito de retrabalhamento de depósitos de leques aluviais por depósitos fluviais, ou simplesmente pelo fato de que embora os depósitos fluviais tenham maior área de captação, e por conseguinte, maior variedade de áreas fonte, eles ainda apresentam uma quantidade apreciável de litoclastos que tiveram origem nas mesmas áreas fontes que alimentam os depósitos proximais de leques aluviais, nas proximidades da borda da bacia.

II.1.3 Proveniência microscópica

A análise de proveniência em lâminas delgadas foi realizada em arenitos conglomeráticos coletados ao longo de seção colunar levantada na Formação Serra dos Lanceiros, entre o topo da Formação Seival e o primeiro nível conglomerático da Formação Serra dos Lanceiros. A escolha deste nível estratigráfico específico para o estudo em detalhe da variação de proveniência sedimentar é baseado na variação de proveniência verificada a partir da porção superior na Formação serra dos Lanceiros além dos dados apresentados por Almeida (2005), entre eles a sensível mudança no padrão de paleocorrentes que pode ser verificada depois desse intervalo e dados de proveniência petrográfica de Almeida (2005) obtidos pelo mesmo método em seção paralela a esta, que mostram um abrupto incremento na proveniência de fragmentos de origem granítica a partir do referido nível conglomerático. A realização do levantamento desses dados buscou complementar os dados obtidos anteriormente, com objetivo de detalhar da maneira mais precisa o possível intervalo estratigráfico equivalente ao início da contribuição sedimentar do Alto de Caçapava do Sul para a Sub-Bacia Camaquã Ocidental.

Os dados de proveniência microscópica foram dispostos na forma de um gráfico de linhas com as amostras distribuídas conforme sua posição estratigráfica (Fig. 09). Os índices utilizados no diagrama de linhas foram definidos de acordo com litotipos de interesse para a análise, de forma a representarem melhor a resposta na assembleia de proveniência microscópica da ativação do Alto de Caçapava do Sul, baseado nos litotipos que hoje afloram na região correspondente ao alto estrutural, por meio da análise relativa entre proveniência de



Fig. 09: Curvas de evolução de dados de proveniência microscópica coletados na Formação Serra dos Lanceiros. Atenção especial deve ser dada ao intervalo que representa o início da contribuição detrítica do alto estrutural. As curvas foram construídas com componentes selecionados da análise de proveniência petrográfica.

litoclastos graníticos, vulcânicos, metamórficos e sedimentares. Os dados de proveniência em lâmina delgada se encontram reunidos na Tabela 02.

A seção colunar apresenta uma proveniência de litoclastos sedimentares pouco expressiva, sendo estes encontrados apenas na base da seção; a proveniência de litoclastos de origem metamórfica apresenta leve incremento até o ponto 6, seguido de queda para valores muito baixos, seguido por um incremento relativamente expressivo no ponto 9, quando mantém novo patamar, próximo de 10% de contribuição na amostra; a proveniência de litoclastos vulcânicos apresenta variação irregular no intervalo entre 10% e 30% de contribuição na amostra, que apresenta padrão ascendente até o ponto 4, descendente até o ponto 6 e novamente mantendo uma tendência ascendente até o ponto 10, após o qual sofre brusca queda do patamar de 30% de participação para 20% da assembleia de proveniência sedimentar; os litoclastos de origem granítica apresentam uma tendência sutil de incremento de pouco acima de 10% até pouco acima de 20% na participação de proveniência da base até o ponto 10, quando ganha um incremento de 20% para 30% de participação na assembleia.

O nível relativo ao início da contribuição do Alto Estrutural de Caçapava do Sul deve apresentar uma resposta compatível aos litotipos hoje encontrados na região homônima. O nível estratigráfico que melhor corresponde a este resultado é o nível estratigráfico da amostra 10, a partir da qual se tem um incremento significativo da participação de clastos de origem granítica na proveniência sedimentar, acompanhado de um incremento também na proveniência de litoclastos de origem metamórfica. Por consequência do aumento em proporção da contribuição de litoclastos graníticos há uma pronunciada queda na participação dos clastos de origem vulcânica, que apresentava uma tendência de incremento na participação sedimentar até o ponto 10.

A proveniência de fontes graníticas anterior a esse ponto pode ser interpretada, portanto, como sendo de outros granitos que afloram próximo à bacia, relacionados aos eventos de vulcanismo anteriores à sedimentação do Grupo Santa Bárbara, enquanto que o percentual de incremento registrado a partir do ponto 10 pode ser interpretado como correspondente à participação do Granito Caçapava do Sul. A mesma interpretação pode ser estendida para a contribuição de litoclastos de origem metamórfica, que até o ponto 10 manteriam uma participação razoavelmente constante na proveniência, provavelmente com

000000	ontoo	P02	D03	D04	P05	POG	D07	DU8	POQ	P10	D11
norn vazio	ientes	0.33	-	-	F05	F00	FU/		F09	- 10	1
	bomogêneo	11	15.61	12	17 33	15 58	20.26	13.67	15 33	13.87	5 32
	nolicristalino	10	7 31	14	6 33	9.42	6.43	7 33	3.67	6.45	8.64
	ondulante	Q	5.08	3	3.67	0.97	11 0	3	3.67	6.45	6.98
quartzo	ondulante	2	5.50	1	2.67	2 92	0.64	1 33	1	3 55	4 32
	om Ln	2 22	1 22	1 2 2	2.07	2.52	0.04	1.55	2	2.55	2.65
	om Ly	2.00	1.55	1.55	-	2.0	0.30	4.07	2	2.20	5.05
	entLv	-	3 00	- 0.67	- 2	-	2.25	0.33	1 33	- 0.65	-
mussovita	omlm	0.33	5.55	0.07	2	4.22	0.22	0.55	4.00	0.00	0.00
muscovita	emLn	0.33	-	-	-	0.05	0.32	-	0.55	0.52	0.00
	enicp	0.55	2.66	-	-	0.03	1.61	0.33	- 2.67	- 0.65	0.00
histita	omlm	0.07	2.00		-	0.97	0.22	1	0.22	0.05	-
biolita	em Ln	-	-	-	-	-	0.52	-	0.33	0.05	-
	en Lp	-	-	-	-	-	-	0.33	0.33	-	-
arãos	- 14 1 -	2.33	1.99	-	2.07	2.92	1.29	3	1.07	0.32	1.00
opacos	alterado	1.33	0.33	-	1.67	0.65	0.32	0.33	0.67	0.32	-
	em Lv	1.33	0.33	0.67	1.33	-	-	0.67	-	0.32	-
	- 16 1 -	7.67	13.29	14.67	7.67	6.82	8.04	10.33	11.67	15.81	7.31
	alterado	8.67	5.65	10.33	8.67	4.87	9.97	16.33	13.67	11.94	7.31
plagioclásio	em Lv	-	0.66	1.67	-	-	-	0.67	-	0.65	1.99
	em Lp	1	1.66	1.67	0	0.32	-	0.33	1.33	0.32	2.99
	em Lm	-	-	0.67	0.33	0.97	-	0.33	-	1.29	0.66
		8.33	7.97	6.33	12	9.74	12.54	8.67	10.67	13.55	13.95
feldsnato	alterado	2.33	2.33	2.67	4.33	1.95	6.11	6.33	2.67	2.58	4.32
potassíco	em Lm	-	-	0.33	-	-	-	-	-	-	0.66
	em Lp	1	0.33	0.33	-	0.97	-	1.33	1	0.97	4.65
	microclinio	1	-	0.67	0.33	-	0.32	2	0.67	0.97	2.99
	epídoto	2.33	-	0.33	0.67	0.97	-	-	-	-	-
minerais	apatita	0.67	0.33	0.33	-	1.3	0.32	0.33	1.33	0.65	0.66
acessórios	zircão	0.67	0.66	-	0.67	0.32	0.32	0	0.33	0.32	0.33
4000001100	rutilo	-	-	-	-	0.65	0.32	0.67	-	-	-
	titanita	0.33	0.33	0.33	-	0.65	0.32	-	-	-	-
	Lm	0.67	-	-	-	-	-	-	-	0.32	-
fragmentos	Ls	0.33	0.33	-	-	-	-	-	-	-	-
líticos	Lp	-	-	-	0.67	-	-	-	-	-	-
	Lv	-	0.33	-	3	-	-	-	0.67	1.29	0.66
	intersticial	4	2.66	4	4.67	8.77	4.5	3.33	3.33	3.23	3.65
argilo minorais	molde	1.67	1.66	2.33	4.67	7.47	2.25	2.67	3	3.23	-
argito minerais	sericita	-	-	-	3.67	1.3	1.29	0.67	3	1.61	2.33
	clorita	0.67	1.66	1.33	0.33	-	0.32	0.33	-	-	2.66
cimento	primário	1.33	1.33	0.67	-	4.22	0.64	2.33	2	1.61	0.66
cimento	secundário	0.67	-	-	-	0.97	1.29	2	1	0	0.33
3110030	coaxial	0.67	-	-	0.67	0.97	0.96	1	2	0.32	0.33
cimento	primário	2.67	0.66	1	3	1.62	0.32	1	0.33	1.29	2.66
ferruginoso	secundário	3	2.33	1	6.33	2.6	1.29	1	1	1.94	4.65
	espático	0.33	0	1.33	-	-	-	0.33	-	-	-
cimento	poiquilítico	0.67	4.32	0.67	-	-	-	-	-	-	-
carbonático	molde	7	5.65	6	-	-	0.32	0	0.67	-	-
	secundário	0.33	5.65	7.67	0.67	0.97	1.93	1.67	2.67	0.32	0.66

Tabela 02: Dados obtidos na análise de proveniência em lâmina delgada para depósitos do topo da Formação Serra dos Lanceiros. Lm=fragmento lítico metamórfico; Lp=fragmento lítico plutônico; Lv=fragmento lítico vulcânico; Ls=fragmento lítico sedimentar.

áreas fonte em rochas do Terreno Rio Vacacaí localizadas a sul da bacia, baseado nos padrões de paleocorrentes obtidos por Almeida (2005), com o incremento em proporção a partir do ponto 10 correspondendo a um incremento na área de captação de litotipos do Alto de Caçapava do Sul. A participação de litoclastos de origem vulcânica pode ter origem em áreas fonte a sul e a oeste da bacia, porém o incremento observado entre os pontos 06 e 08 sugere uma mudança na configuração das áreas fonte, provavelmente por aumento da intensidade do aporte sedimentar de área fonte de litoclastos vulcânicos.

II.1.4 Proveniência isotópica

Os dados de proveniência isotópica em zircões detríticos foram agrupados em diagramas de probabilidade após tratados e removidos os zircões que apresentavam idades discordantes (Fig. 10). As amostras foram coletadas com o intuito de se determinar a variação da proveniência em pontos da sucessão estratigráfica anteriores e posteriores ao intervalo estratigráfico que corresponderia ao início da contribuição detrítica do Alto Estrutural de Caçapava do Sul para a Sub-Bacia Camaquã Ocidental. Para tanto foram selecionadas amostras de arenitos da Formação Estância Santa Fé, Formação Serra dos Lanceiros e Formação Arroio Umbu, sendo que na Formação Serra dos Lanceiros foram escolhidas amostras anteriores e posteriores ao início da contribuição sedimentar identificado por meio de análise petrográfica. As determinações aqui apresentadas provavelmente resultam em uma sub representação das áreas fonte menos importantes devido ao número reduzido de determinações em cada amostra, que fica entre 20 e 31 pontos por amostra, conforme proposto por Vermeesch (2004), porém são úteis para as discussões acerca da evolução das áreas fonte encontradas ao redor da bacia sedimentar, que apresentam idades concentradas no Neoproterozoico (Phillip 1998, Hartmann et al. 2000, Hartmann 2002, Janikian et al. 2008), com os zircões mais velhos provavelmente herdados de unidades metassedimentares do Terreno Rio Vacacaí e do Cinturão Dom Feliciano (e.g. Hartmann et al. 2000, Remus et al. 2000, Basei et al. 2009).

O diagrama da amostragem correspondente à Formação Santa Fé foi construído com 24 determinações pontuais em zircões detríticos. A amostra apresenta um pico expressivo de idade ao redor de 600 Ma, com mais duas idades isoladas por volta de 1,8 Ga e 2,4 Ga.

A amostra obtida na Formação Serra dos Lanceiros em intervalo estratigráfico inferior ao início da contribuição detrítica do alto estrutural de Caçapava do Sul identificado em análise de proveniência microscópica, apresenta maior dispersão de idades, com suas 22 determinações geocronológicas distribuídas em conjuntos de dados ao redor de 600 Ma, 1200 Ma, 1750 Ma e uma idade isolada próxima de 2500 Ma. O conjunto maior de dados, próximo a 600 Ma, pode ser subdivido em duas concentrações distintas de dados, com picos em torno de 560 Ma e outro pico próximo de 750 Ma.



Fig. 10: Diagramas de probabilidade de idades de zircões detríticos.

II.1.4Proveniência isotópica

A amostra coletada acima do intervalo estratigráfico correspondente ao início da contribuição detrítica do Alto de Caçapava do Sul, ainda na Formação Serra dos Lanceiros, contou com 31 determinações individuais em zircões detríticos e apresenta uma distribuição de idades bastante semelhante ao do diagrama anterior, com concentrações expressiva de dados entre 700 Ma e 800 Ma, com agrupamentos em menor concentração pouco acima de 1200 Ma, próximo de 1700 Ma e uma última acima de 2500 Ma. O conjunto de dados com maior concentração de idades apresenta ainda dois picos importantes de idades, em torno de 600 Ma e próximo a 750 Ma.

O último diagrama de probabilidade corresponde a amostra coletada na Formação Arroio Umbu, que corresponderia a um momento da história do preenchimento da Sub-Bacia Camaquã Ocidental em que o Alto de Caçapava do Sul já estaria agindo como uma das principais áreas fonte dos depósitos sedimentares, especialmente quando próximos à borda da bacia. O diagrama conta com 24 determinações individuais em zircões detríticos, e possui a maior parte de seus dados localizados entre 500 e 900 Ma, com uma concentração menor de dados em torno de 1800 Ma e um dado isolado pouco acima de 2900 Ma. O conjunto de dados com maior concentração de idades, devido à distribuição dos dados em um intervalo amplo de tempo, apresenta vários picos de idades de magnitude semelhante, que apontam para idades de 550 Ma, 600 Ma, 750 Ma e 900 Ma, porém sem que haja prevalência de um conjunto de idades sobre outro.

Os dados obtidos na Formação Estância Santa Fé, com concentração de idades em torno de 600 Ma, indicam que a parte mais importante da contribuição detrítica da unidade corresponderia a depósitos vulcânicos do próprio Supergrupo Camaquã, além de proveniência detrítica de zircões oriundos de granitos correlatos ao citado vulcanismo. As principais fontes vulcânicas para o Grupo Santa Bárbara seriam o Grupo Bom Jardim e a Formação Acampamento Velho, que apresentam idades de entre 590 Ma (vulcânicas básicas da Formação Hilário no Grupo Bom Jardim, Janikian *et al.* 2008) e 574 Ma (vulcânicas ácidas da Formação Acampamento Velho, Chemale Jr. *et al.* 2002, Janikian *et al.* 2008), além de intrusivas ácidas com idade em torno de 550 Ma (Sommer *et al.* 2005). Diversos granitos associados a esse vulcanismo apresentam idades de cristalização entre 600 Ma e 550 Ma (Hartmann *et al.* 2000), incluindo datações por Leite (1995), que obteve valores de 580±8 e

608±7 Ma para o granito Lavras do Sul, respectivamente em borda e núcleos de zircões (pelo método U-Pb SHIRIMP), e valores correspondentes de 541±11 e 561±6 Ma para o Granito Caçapava do Sul. As determinações com idade superior a 1700 Ma podem ser de zircões herdados de fontes paleoproterozoicas de sucessões metassedimentares do Terreno Rio Vacacaí e do Cinturão Dom Feliciano. Dessa forma os zircões encontrados na Formação Estância Santa Fé endossam a interpretação de áreas fonte proximais para os depósitos proximais não só na fração mais grossa, verificada na análise de proveniência macroscópica, como também nas frações arenosas da unidade.

Os dados de proveniência encontrados nas duas amostras correspondentes à Formação Serra dos Lanceiros, com 22 determinações em zircões detríticos na amostra anterior ao início da proveniência identificada no alto e mais 31 determinações na amostra coletada após o referido intervalo, apresentam uma variedade maior de idades obtidas em determinações individuais de zircões do que em nas outras unidades avaliadas. Porém, os dados indicam que as áreas fonte mais ativas durante a deposição da unidade são representados por corpos graníticos encontrados nas imediações da bacia, com idades entre 600 Ma e 750 Ma (Hartmann et al. 2000), bem como de depósitos vulcânicos correlatos ao magmatismo granítico, com idades entre 590 Ma e 574 Ma (Janikian et al. 2008), acompanhados de zircões oriundos do Terreno Rio Vacacaí, com idade próxima a 700 Ma (Hartmann et al. 2000). Concentrações menores de zircões de idades mais velhas podem ter origem em áreas fonte mais distantes, como seria o caso de zircões detríticos de idade mesoproterozoica que não contam com áreas fonte identificadas no Escudo Gaúcho, mas que compõem parte da fração detrítica de rochas metassedimentares do Cinturão Dom Feliciano (Basei et al. 2009). A comparação entre as duas amostras se mostra pouco conclusiva para a determinação do início da contribuição detrítica do Alto de Caçapava do Sul para a Sub-Bacia Camaquã Central, uma vez que a maior frequência de idades mais jovens no diagrama da amostra seguinte ao intervalo interpretado como início da contribuição de litotipos hoje encontrados na região do alto estrutural poderia ser explicada pelo maior número de determinações individuais usados na confecção do diagrama. Adicionalmente pode-se interpretar parte da contribuição de zircões de idade ao redor de 600 Ma como oriunda de granitos do Batólito Pelotas (Phillip 1998, Hartmann et al. 2000), visto que depósitos sedimentares pouco consolidados localizados sobre a região hoje correspondente ao alto

II.1.4Proveniência isotópica

estrutural também teriam servido de área fonte para os depósitos fluviais da formação Serra dos Lanceiros. Tal interpretação ajuda a entender também a maior variedade de idades obtidas em ambos os diagramas da Formação Serra dos Lanceiros, que além de possuírem maior variedade de áreas fonte, já que contariam com maior área de captação para o sistemas fluvial em relação às outras unidades, poderiam também herdar zircões das próprias sucessões sedimentares da Bacia Camaquã que foram depositadas anteriormente sobre a região que encontrava-se então em soerguimento, e portanto funcionavam como áreas fonte.

Os dados obtidos na Formação Arroio Umbu se concentram em um conjunto de dados mais recentes, provavelmente devido a maior importância de áreas fonte localizadas no Alto Estrutural de Caçapava do Sul. As concentrações de idades em torno de 550 Ma e 600 Ma podem ser correlacionadas respectivamente ao próprio Granito Caçapava do Sul (*e.g.* Leite 1995) e às rochas vulcânicas que cobriam a unidade, que embora não sejam mais encontradas sobre o alto estrutural, deixaram litoclastos na assembleia de proveniência macroscópica da Formação Arroio Umbu. Já as idades próximas a 750 Ma podem ser entendidas como provenientes do Terreno Rio Vacacaí enquanto que as idades ao redor 900 Ma podem ser entendidas como zircões herdados do Complexo Cambaí por meio das rochas metassedimentares encontradas no Alto de Caçapava do Sul (Hartmann *et al.* 2000, Remus *et al.* 2000). De maneira análoga, os zircões mais antigos podem ter sido herdados das rochas metassedimentares encontrados no Alto de Caçapava do Sul.

Os dados obtidos em análise isotópica em zircões detríticos representam áreas fonte similares às interpretadas nas análises de proveniência macroscópica, permitindo dessa forma que a interpretação feita para a proveniência sedimentar da fração granulométrica superior a seixo seja estendida para a fração arenosa dos depósitos sedimentares estudados. Os dados obtidos na Formação Serra dos Lanceiros sugerem que a região correspondente ao alto estrutural já começava a servir de área fonte devido à erosão da cobertura sedimentar que haveria sobre o alto, visto que as duas amostras apresentam dados bastante similares e variados, que podem ser em parte decorrentes da herança de zircões destas coberturas. A Formação Arroio Umbu por sua vez, tem seus dados de zircão todos correlacionáveis ao Alto Estrutural de Caçapava do Sul, que portanto já estava soerguido e bastante denudado, contribuindo com zircões originados no Granito Caçapava do Sul e nos litotipos metamórficos do Terreno Rio Vacacaí adjacentes ao granito.

II.1.5 Discussão

Os dados apresentados neste capítulo sugerem fortemente que o início da denudação do Alto Estrutural de Caçapava do Sul teria ocorrido durante a deposição da Formação Serra dos Lanceiros, confirmando a hipótese de Almeida (2005) (ver também ANEXO 01). A hipótese de que o Alto Estrutural de Caçapava do Sul estaria soerguido durante toda a evolução da bacia sedimentar, como sugerido por Borba & Mizusaki (2003), é refutada pela presença de fácies distais da Formação Seival junto à falha que separa o alto da bacia (Almeida 2005) e pelos dados de proveniência da Formação Santa Fé, dominados pela contribuição de litoclastos de fontes a oeste da bacia, com predomínio de litotipos de origem vulcânica, e alguma participação de granitos associados ao vulcanismo além da concentração de zircões quase que exclusivamente ao redor de 600 Ma, repetindo o padrão de proveniência obtida pela contagem em frações maiores que seixo na fração de zircões detríticos (Figs. 07 e 10). Assim, não há evidências de nenhuma área fonte à leste da bacia para a sucessão inferior, sugerindo dessa forma a inexistência de um alto estrutural na área compreendida atualmente pelo Alto de Caçapava do Sul nesse período. O aparecimento de litoclastos que podem ser relacionados a rochas do Alto de Caçapava do Sul em análise de proveniência microscópica da porção superior da Formação Serra dos Lanceiros, bem como os litotipos de fração superior a seixo encontrados no primeiro nível conglomerático acima dos arenitos da unidade, são interpretados como evidência do estabelecimento da contribuição detrítica do Alto de Caçapava do Sul para o preenchimento da bacia sedimentar (Figs. 07 e 08). Este evento é atestado pelo aumento progressivo do conteúdo de litoclastos vindos do Alto de Caçapava do Sul a partir da porção superior da Formação Serra dos Lanceiros, continuando nas formações Arroio Umbu e Pedra do Segredo (Fig. 06), a qual pode ter passado por um período de maior denudação do alto estrutural. A hipótese proposta de ativação de um alto estrutural interno à bacia durante sua deposição levanta uma nova perspectiva acerca das questões envolvendo os efeitos de ativação tectônica sobre o registro sedimentar de bacias controladas por processos tectônicos.

O modelo proposto por Blair & Bilodeau (1988) que descreve um aumento

II.1.5Discussão

instantâneo da taxa de subsidência durante eventos de atividade tectônica para bacias distensionais, transcorrentes e de antepaís, com um incremento tardio do aporte sedimentar devido a denudação dos terrenos soerguidos, sugere que as cunhas clásticas devem ser interpretadas como uma consequência tardia da atividade tectônica, enquanto que as fácies finas responderiam como efeito imediato da atividade tectônica. Esse modelo tem sido amplamente aplicado na interpretação de superfícies estratigráficas e de padrões de empilhamento em bacias controladas por processos tectônicos (*e.g.* Heller *et al.* 1988, Hartley 1993, Castle 2001, Martins-Neto et al. 2001, Jo 2003, Capuzzo & Wetzel 2004).

Conforme as descrições de Almeida (2005), a superfície basal da Formação Arroio Umbu seria o período de maior geração de espaço de espaço de acomodação da porção superior do Grupo Santa Bárbara, correspondendo a um aumento brusco da relação espaço – aporte, e consequente preservação de uma proporção maior de planícies de inundação em relação aos sistemas de canais fluviais (Wright & Marriot 1993, Shanley & McCabe 1994). Dessa forma a superfície basal da Formação Arroio Umbu seria o nível mais adequado para representar o efeito da atividade do Alto Estrutural de Caçapava do Sul, conforme o modelo de Blair & Bilodeau (1988), com a sucessão granocrescente da Formação Pedra do Segredo representando a posterior progradação das cunhas clásticas. No entanto as evidências de contribuição detrítica do Alto de Caçapava do Sul estratigraficamente abaixo dos depósitos da Formação Arroio Umbu, atestado por meio de proveniência macroscópica, microscópica e isotópica, e a coincidência do início da contribuição detrítica do alto estrutural em um nível conglomerático indicam que particularidades acerca dos eventos de atividade tectônica em uma bacia sedimentar podem divergir do modelo teórico.

A resposta ao soerguimento do Alto Estrutural de Caçapava do Sul é, dessa forma, uma sucessão granocrescente de arenitos conglomeráticos. Tal efeito sobre os depósitos sedimentares pode ser explicado por uma possível queda nas taxas de subsidência da bacia durante o início do soerguimento do alto estrutural, provocado por um domeamento com centro aproximadamente na área hoje correspondente ao alto estrutural, mas que envolvia uma região maior que a área posteriormente limitada pela falha rúptil no borda oeste do Alto Estrutural de Caçapava do Sul. Por consequência, à medida que a taxa de subsidência diminui, a taxa de geração de espaço de acomodação também cai, de maneira que os fragmentos mais grossos passam a alcançar maiores distâncias dentro da bacia sedimentar (Marr et al. 2000, Paola 1988, Paola et al. 1992). O padrão granocrescente observado através da Formação Seival e da Formação Serra dos Lanceiros pode então ser entendido como resultado do domeamento anterior à nucleação da falha mestra, quando um aumento na taxa de subsidência, como previsto pelo modelo de Blair & Bilodeau (1988), finalmente ocorre. O intervalo correspondente ao aumento instantâneo de subsidência poderia corresponder à Formação Arroio Umbu, com o posterior aumento de estabilidade tectônica e progradação da cunha clástica representada pelo padrão granocrescente da Formação Pedra do Segredo.

Outro efeito possível do soerguimento do alto estrutural seria um aumento no aporte sedimentar, provocado pela captura de um sistema de drenagem que até então alimentava toda a Bacia Camaquã para dentro do graben de dimensões menores da sub-bacia ocidental ou pela erosão de sedimentos pouco litificados depositados sobre a região correspondente ao alto estrutural, que poderia resultar em um aumento sensível no aporte sedimentar devido à facilidade com que esses depósitos poderiam ser erodidos (Almeida 2005).

Posto isso, pode-se concluir que há uma relação estreita entre o soerguimento do Alto Estrutural de Caçapava do Sul e as mudanças nos padrões de proveniência e de distribuição de sistemas deposicionais do Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental. Pode-se dizer também que os dados e interpretações apresentados indicam que particularidades dos eventos de ativação tectônica responsável pelo soerguimento de altos estruturais podem conduzir a interpretações equivocadas de superfícies deposicionais. É importante esclarecer também que o modelo proposto por Blair & Bilodeau (1988) é dirigido a atividade de falhas de borda, e não de altos estruturais internos à bacia, de forma que não consideram a variação de aporte sedimentar condicionado por variações geográficas, especialmente o aumento de aporte sedimentar como resultado da erosão de sedimentos pouco litificados, conforme salientado anteriormente por Almeida (2005).

Os novos dados aqui apresentados foram integrados ao conjunto apresentado em Almeida (2005), dando origem a artigo científico preparado para publicação em revista internacional arbitrada (ANEXO 01).

II.2 Os eventos de ativação dos altos de Caçapava do Sul e da Serra das Encantadas e sua influência na sedimentação dos grupo Santa Bárbara e Guaritas na sub-bacia Camaquã Central

Neste capítulo são discutidos de maneira ampla os efeitos da ativação do Alto Estrutural de Caçapava do Sul sobre a Sub-Bacia Camaquã Central na deposição do Grupo Santa Bárbara, além da influência do alto estrutural a leste dessa Sub-bacia, no caso o Alto Estrutural da Serra das Encantadas. Os efeitos da evolução do Alto da Serra das Encantadas são também registrados em depósitos do Grupo Guaritas na mesma sub-bacia, que registram os efeitos do soerguimento e posterior subsidência desse alto.

II.2.1 O Grupo Santa Bárbara na Sub-bacia Camaquã Central

O Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Central apresenta uma coluna estratigráfica distinta da encontrada na Sub-Bacia Camaquã Ocidental (Fig. 11), sendo que a parte inferior da sucessão sedimentar é composta por depósitos silto-arenosos, com intercalações pelíticas e um nível de depósitos conglomeráticos na base da bacia, que conforme proposta de Fambrini (2003) e Fambrini *et al.* (2005) correspondem às formações Passo da Capela, que é seguida de uma sucessão siltoarenosa identificada como Formação Seival pelos mesmo autores. Na porção superior da sucessão sedimentar ocorrem depósitos arenosos e conglomeráticos que correspondem à subdivisão informal por camadas de Ribeiro & Lichtenberg (1978) e que foram agrupadas por Fambrini *et al.* (2005) sob a Formação Rincão dos Mouras. O topo da sucessão afloram depósitos siltoarenosos da Formação João Dias (Fambrini 2003, Fambrini *et al.* 2005).

No Grupo Santa Bárbara foram coletados dados de proveniência macroscópica em quatro sítios de contagem distintos, sendo um no conglomerado encontrado na base da sucessão e os outros três nos depósitos conglomeráticos que se encontram na posição intermediária da sucessão sedimentar que compõe o Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Central (Fig. 11).

Os dados de proveniência apresentados são em geral muito semelhantes (Fig. 12),



Fig. 11: Localização em planta das análises de proveniência macroscópica no Grupo Santa Bárbara na sub-Bacia Camaquã Central. Mapa geológico modificado de Fambrini (1998).

independente da posição estratigráfica, com importante contribuição de litoclastos de origem granítica, que em todas as estações de contagem perfazem proporção superior a 50% dos dados de proveniência macroscópica. Outros litotipos que ocorrem em proporções expressivas nos sítios de contagem são litoclastos de quartzo milonito e de rochas metamórficas. Litoclastos de origem vulcânica e litoclastos de arenitos são menos frequentes, embora apresentem uma tendência de aumento em importância para o topo da sucessão. A relativa semelhança entre as assembleias de proveniência macroscópica do Grupo Santa Bárbara sugere que houve pouca mudança na configuração das áreas fonte desde o início da deposição da sucessão. A assembleia de dados de proveniência macroscópica sugere que a Sub-Bacia Camaquã Central tinha áreas fonte a leste e sudoeste da bacia, com os litoclastos graníticos correspondendo a áreas fontes localizados no Batólito Pelotas, enquanto que a presença de litoclastos de quartzo milonito e litotipos metamórficos sugerem áreas fonte no Alto Estrutural da Serra das Encantadas, que estaria portanto, soerguido durante todo o período que compreende a sedimentação do Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental.

O aparecimento e a tendência de aumento relativo do aporte de litoclastos de origem



Fig. 12: Posicionamento estratigráfico das amostras de análise de proveniência macroscópica obtidos no Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Central. Coluna estratigráfica conforme Fambrini (2003).

vulcânica e de origem sedimentar indica a inclusão de novas áreas fonte nos conglomerados localizados na porção intermediária da sucessão sedimentar, sendo que estas áreas fonte parecem ganhar importância na contribuição sedimentar com o tempo. A exemplo do que foi registrado na Sub-Bacia Camaquã Ocidental, os litoclastos vulcânicos e sedimentares poderiam ter origem na erosão da cobertura previamente depositada sobre o Alto de Caçapava do Sul, e passariam a servir de área fonte também para a Sub-Bacia Camaquã Central durante o soerguimento desse alto.

O padrão progradacional representado pela granocrescência entre os depósitos siltoarenosos e os depósitos conglomeráticos, somada à adição de áreas fonte localizada dentro da própria bacia indica que de maneira análoga ao que teria ocorrida na calha ocidental, o soerguimento gradual do alto interno à bacia se deu durante a sedimentação dos depósitos sedimentares do Grupo Santa Bárbara, fazendo com que os depósitos sedimentares pouco litificados localizados na área que hoje corresponde ao Alto Estrutural de Caçapava do Sul passassem a alimentar a bacia, provocando progradação da sucessão sedimentar.

Porém, diferentemente do ocorrido na Sub-Bacia Camaquã Ocidental, onde consecutivamente ao registro da consolidação do soerguimento do Alto de Caçapava do Sul

houve uma expressiva progradação, na sub-bacia central não há registro de depósitos semelhantes, visto que a unidade seguinte à sucessão conglomerática é representada pela sucessão siltoarenosa da Formação João Dias, que inclui grande volume de arenitos e raros níveis grossos.

A coincidência de uma progradação expressiva na calha ocidental, recém individualizada, com a sedimentação de depósitos finos na sub-bacia central, que passa a apresentar depósitos siltoarenosos, os quais indicariam queda no aporte sedimentar, é concordante com a hipótese apresentada anteriormente de captura de um sistema de drenagem que alimentava toda a bacia, para o graben ocidental, visto que tal evento resultaria em um déficit de aporte sedimentar para a calha da sub-bacia central.

Dessa forma os depósitos conglomeráticos encontrados na porção intermediária da sucessão sedimentar, agrupados sob a denominação de Formação Rincão dos Mouras por Fambrini *et al.* (2005) e como Conglomerado Superior por Ribeiro & Lichtenberg (1978), e os depósitos siltoarenosos sobrejacentes da Formação João Dias (Arenito Superior de Ribeiro & Lichtenberg 1978) seriam resultados do soerguimento do alto estrutural interno à bacia que individualizou as sub-bacias Camaquã Ocidental e Camaquã Central quando da deposição do Grupo Santa Bárbara. Nesse caso os depósitos conglomeráticos seriam resultado de um aumento do aporte sedimentar provocado pelo início do soerguimento do alto estrutural na forma de uma domo, de maneira análoga ao interpretado para a sub-bacia ocidental, devido à erosão de depósitos sedimentares pouco litificados que se encontravam na região correspondente ao alto. Os depósitos siltoarenosos da Formação João Dias, no topo da sucessão da sub-bacia central representariam por sua vez uma queda brusca no aporte sedimentar provocado pela captura do sistema de drenagem que alimentava toda a bacia para a sub-bacia ocidental quando o soerguimento do alto estrutural se consolidou pela ativação de uma falha na borda leste da sub-bacia central.

Essa hipótese indicaria a correlação da Formação Rincão dos Mouras *sensu* Fambrini *et al.* (2005) na Sub-Bacia Camaquã Central (Conglomerado Superior de Ribeiro & Lichtenberg 1978) com a Formação Serra dos Lanceiros de Almeida (2005), na Sub-Bacia Camaquã Ocidental, e não com a Formação Pedra do Segredo, conforme proposto por Fambrini (2003).

II.2.2 O Grupo Guaritas na Sub-Bacia Camaquã Central

Durante a deposição do Grupo Guaritas na sub-bacia central (Fig. 13), seguindo-se à deposição do Grupo Santa Bárbara, o Alto Estrutural da Serra das Encantadas apresenta uma evolução complexa, sem a evidência da presença do referido alto durante a deposição da Formação Guarda Velha (Almeida *et al.* 2009), formada por depósitos fluviais que correspondem a maior parte do volume depositado durante a história do Grupo Guaritas, visto que não há evidência de depósitos de leques aluviais nas imediações do Alto da Serra das Encantadas, conforme exposto por Almeida (2005) e Almeida *et al.* (2009).

Os depósitos de leques aluviais da Formação Pedra das Torrinhas (Almeida 2005) são a principal evidência de soerguimento do Alto da Serra das Encantadas, e são equivalentes laterais aos depósitos fluviais da Formação Varzinha e eólicos da Formação Pedra Pintada, posteriores aos depósitos da Formação Guarda Velha. Após a deposição destas unidades, ocorre a sedimentação de depósitos fluviais da Formação Serra do Apertado, que sobrepõem inclusive os depósitos de leques aluviais da Formação Pedra das Torrinhas junto aos limites da bacia, o que levou Almeida *et al.* (2009) a concluírem que houve sedimentação da Formação Serra do Apertado sobre as ombreiras do Rift Guaritas, representadas pelo Alto Estrutural da Serra das Encantadas.

Em oposição ao estudo do soerguimento sin-sedimentar de um alto estrutural, apresentado no capítulo anterior, os efeitos da subsidência de um alto estrutural em uma bacia sedimentar de subsidência mecânica dominada por depósitos continentais são apresentados a seguir, com o estudo de exposições das formações Pedra Pintada, Pedra das Torrinhas e Serra do Apertado, em uma ocorrência junto à borda leste da Sub-Bacia Camaquã Central. A interação entre os sistemas deposicionais das mencionadas unidades é detalhada em artigo anexo (ANEXO 02, Marconato *et al.* 2009), cujos dados de proveniência e paleocorrentes são utilizados aqui para discutir os efeitos que a subsidência do alto estrutural vizinho à bacia têm sobre os sistemas deposicionais e a proveniência sedimentar.

Foram coletados dados de proveniência em quatro estações sedimentares da Formação Pedra das Torrinhas e três estações na Formação Serra do Apertado, de modo a permitir comparar a variação na resposta sedimentar entre as duas unidades. Os dados de proveniência do Grupo Guaritas, de forma diversa dos apresentados anteriormente, foram coletados por meio da contagem em frequência de 100 clastos maiores que 1 cm por sítio de análise de proveniência.

Os dados de proveniência referentes à Formação Pedra das Torrinhas (Fig. 14 e Tabela 3) são compostos de litoclastos de riolitos, rochas metamórficas, quartzo milonito e rochas graníticas. Os litotipos mais comuns na assembleia de proveniência macroscópica são quartzo milonitos e rochas de origem metamórfica, como xistos e filitos, que podem ser diretamente relacionados aos litotipos encontrados no Alto da Serra das Encantadas, acompanhados de quantidades variáveis entre os sítios dos outros componentes. Litoclastos graníticos e de milonitos graníticos são parte importante da proveniência, e podem ser relacionados a áreas fonte algo mais distantes, no Batólito Pelotas, a leste da Faixa que compreende o Alto da Serra das Encantadas. A significativa variação dos dados de proveniência macroscópica entre os sítios de análise de proveniência é resultado da natureza fortemente local da proveniência sedimentar em leques aluviais.

Na Formação Serra do Apertado os dados de proveniência sedimentar são dominados por litoclastos de origem granítica e por riolitos, com proveniência de quartzo milonitos ocorrendo de forma subordinada. O padrão de paleocorrentes obtido para os depósitos de leques aluviais e para os depósitos fluviais da Formação Serra do Apertado apresentam aproximadamente a mesma direção de transporte, perpendicular ao limite entre a bacia sedimentar e o alto estrutural vizinho, e o arredondamento dos clastos é significativamente maior na Formação Serra do Apertado em relação à Formação Pedra das Torrinhas.

Embora a direção de transporte sedimentar seja similar entre os dois depósitos, notase que litoclastos relacionados aos litotipos encontrados na Alto da Serra das Encantadas têm importância secundária como área fonte na Formação Serra do Apertado, sendo que áreas fonte mais distantes, como o Batólito Pelotas, devem responder pela maior parte do aporte sedimentar dos depósitos fluviais, já que litoclastos de origem granítica dominam a assembleia de proveniência macroscópica.

A contribuição de litoclastos de riolito apresenta um aumento nos depósitos fluviais em relação aos depósitos de leques aluviais anteriores, levando à conclusão de que seriam de depósitos vulcânicos mais distantes da borda da bacia e localizados a leste, baseado nos



Fig. 14: Dados de proveniência macroscópica obtidos nas formações Pedra das Torrinhas (GPT) e Serra do Apertado (GSA) no Grupo Guaritas.

padrões de paleocorrentes, mas que foram erodidos. De fato, a presença de diques de subvulcânicas ácidas no batólito (*e.g.* Fragoso-Cesar 1991, Phillip 1988, Zanon *et al.* 2006), além da ocorrência local de vulcânicas, sugerem que anteriormente à denudação, litotipos vulcânicos predominavam na superestrutura do batólito.

Assim, sugere-se que o alto estrutural da Serra da Encantadas esteve ativo durante a deposição da Formação Pedra das Torrinhas, mas sofreu subsidência, provavelmente de origem termal das fases finais da evolução do Rift Guaritas, e não apresentava relevo durante a deposição da Formação Serra do Apertado (Almeida *et al.* 2009). Esse evento agiu de maneira determinante na mudança do padrão de distribuição dos sistemas deposicionais avaliados.

Enquanto o alto estrutural estava soerguido os sistemas deposicionais encontrados próximo à borda da bacia eram compostos de depósitos de leques aluviais imediatamente ao lado da falha de borda, cujos depósitos correspondem aos conglomerados da Formação Pedra das Torrinhas e que passavam lateralmente a um campo de dunas eólicas que corresponde hoje à Formação Pedra Pintada (conforme Marconato *et al.* 2009, ANEXO 02). Tal

configuração dos sistemas deposicionais implica em aporte sedimentar restrito, com área de captação das bacias de drenagem provavelmente bastante limitada, conforme indicado também pela proveniência em depósitos conglomeráticos, e por consequência com aporte sedimentar relativamente baixo de forma que o campo de dunas eólico chegue bem próximo da borda da bacia, sem que haja o desenvolvimento de uma planície aluvial ampla entre os depósitos de leques aluviais e o campo de dunas eólicas. A existência de depósitos de interdunas úmidas indica adicionalmente que o aporte sedimentar se dava de maneira esporádica, com enchentes relacionadas à inundação periódica das áreas de interduna.

Após a subsidência do Alto Estrutural da Serra das Encantadas, os sistemas deposicionais eólicos e aluviais são substituídos pelos depósitos fluviais de rios entrelaçados da Formação Serra do Apertado, o que sugere áreas de captação para o sistema de drenagem mais amplas que as encontradas nas unidades anteriores, e que endossam a interpretação de áreas fonte mais distantes para a assembleia de proveniência macroscópica encontrada nos depósitos conglomeráticos da unidade, com consequente aumento do aporte sedimentar.

O aumento expressivo das áreas de captação dos sistemas de drenagem que alimentavam a bacia, bem como o aumento do aporte sedimentar, verificados após a subsidência do Alto Estrutural da Serra das Encantadas indica que tal evento possivelmente provocou a captura de sistemas de drenagem que anteriormente corriam fora da bacia sedimentar. A captura de sistemas de drenagens mais desenvolvidos para dentro da bacia sedimentar teve portanto, papel fundamental na mudança dos sistemas deposicionais, substituindo o fluxo ocasional de material detrítico pelos leques aluviais pela alimentação perene, ou ao menos mais frequente, da carga sedimentar trazida pelo sistema fluvial.

III. Conclusões

O presente trabalho contou com a integração de dados de análise de fácies, análise de proveniência em escala de afloramento e microscópica, e análise de proveniência por meio de determinações isotópicas com o intuito de melhor compreender os efeitos da ativação de altos estruturais sobre o preenchimento sedimentar em bacias sedimentares, com especial atenção à ativação do Alto Estrutural de Caçapava do Sul, que apresenta a particularidade de se desenvolver como um alto estrutural interno à bacia, e avaliação detalhada dos efeitos do soerguimento deste alto sobre os depósitos do Grupo santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental. Os efeitos da ativação do Alto Estrutural de Caçapava do Sul sobre os depósitos do Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Central foram também contemplados neste estudo, bem como parte da evolução do Alto Estrutural da Serra das Encantas e seus efeitos sobre os sistemas deposicionais do Grupo Santa Bárbara e do Grupo Guaritas.

A hipótese do soerguimento do Alto Estrutural de Caçapava do Sul simultaneamente à deposição do Grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Ocidental (Almeida 2001, 2005) foi confirmada por meio de análises sistemáticas de proveniência sedimentar, tanto em escala de afloramento quanto em escala microscópica, assim como por meio de análise de proveniência isotópica em zircões detríticos, que revelaram a presença, apenas nas unidades superiores do Grupo Santa Bárbara, de litoclastos derivados do alto estrutural, como rochas metassedimentares de baixo grau metamórfico e litotipos correlacionáveis ao stock granítico de Caçapava do Sul. Idades de cristalização de zircões detríticos indicam, por sua vez, que assim como o registrado por meio da análise de proveniência macroscópica, não há evidência de áreas fonte correspondentes ao Alto Estrutural de Caçapava do Sul na base do Grupo Santa Bárbara, e que áreas fonte correlacionáveis ao alto estrutural passam a aparecer nas assembleias de zircão da Formação Serra dos Lanceiros e passam a ser relativamento mais importantes na unidade sedimentar seguinte, a Formação Arroio Umbu. De maneira complementar, os efeitos da ativação do Alto Estrutural de Caçapava do Sul são também verificados em depósitos areno-conglomeráticos da Sub-Bacia Camaquã Central, como o aumento de fragmentos de rochas sedimentares e vulcânicas nos níveis conglomeráticos da porção intermediária da sucessão em relação ao nível conglomerático próximo da base da

sucessão, sugerindo dessa forma que houve contribuição detrítica do alto estrutural também para esta sub-bacia. São reconhecidas, porém, apenas evidências da denudação da cobertura sedimentar que havia sobre a área hoje correspondente ao alto estrutural, já que fontes graníticas abundantes e variadas não permitem o reconhecimento direto da presença de fragmentos do Granito Caçapava do Sul nesta sub-bacia.

O caráter normal da falha de borda que limita a bacia a leste e que foi o responsável pelo soerguimento do alto estrutural, assim como o caráter normal das falhas póssedimentares que limitam a bacia a oeste, são atestados pela variação lateral de dados de proveniência em escala de afloramento, ilustrada pela análise estatística multivariada com agrupamentos de sítios de análise de proveniência que refletem de maneira direta o contexto geológico encontrado nos afloramentos vizinhos à bacia sedimentar (Fig. 06). Tal correlação entre áreas fonte e depósitos sedimentares é indicativa da ausência de deslocamento lateral entre fontes e depósitos, o que por sua vez implica na ausência de rejeito direcional significativo entre as falhas tanto durante quanto após a sedimentação dos depósitos correspondentes ao Grupo Santa Bárbara.

O nível estratigráfico que registra o início da contribuição detrítica do Alto Estrutural de Caçapava do Sul foi identificado em uma sucessão sedimentar granocrescente, dentro da Formação Serra dos Lanceiros, portanto anteriormente à superfície de inundação regional que seria a melhor candidata à resposta estratigráfica a um evento de reativação tectônica, conforme os modelos correntes de resposta sedimentar ao soerguimento de altos estruturais, e que corresponderia a base da Formação Arroio Umbu. Essa divergência em relação aos modelos disponíveis permitiu o reconhecimento de particularidades do evento de soerguimento do alto estrutural, pelo fato de ser interno ao sistema de bacias, que resultaram em progradação dentro da bacia sedimentar, aumentando dessa forma a taxa de aporte sedimentar em relação a taxa de geração de espaço de acomodação quase que instantaneamente.

A mesma tendência granocrescente é observada nos depósitos sedimentares do grupo Santa Bárbara na Sub-Bacia Camaquã Central. Sobre depósitos siltoarenosos se instalam sucessões arenosas e conglomeráticas, com tendência granocrescente, provavelmente correlacionadas à Formação Serra dos Lanceiros da Sub-Bacia Camaquã Ocidental, que

III.Conclusões

também apresenta padrão granoscrescente. Porém, diferentemente do ocorrido na bacia ocidental, onde a ativação da falha, com consequente retrogradação, foi seguida de expressiva progradação dos depósitos sedimentares durante a deposição da unidade de topo da sucessão, na bacia central o topo da sucessão apresenta uma retrogradação dos sistemas deposicionais, com nova sedimentação de depósitos siltoarenosos.

A posição central ocupada pelo stock granítico de Caçapava do Sul no alto estrutural homônimo somada à sua idade de cristalização, datada como sendo por volta de 555-550 Ma (Sartori & Kawashita 1985, Nardi & Bitencourt 1989, Leite 1995), próximo portanto da idade estimada para o início da sedimentação do Grupo Santa Bárbara, sugerem que a colocação do corpo granítico está relacionada ao evento de soerguimento do alto estrutural, provavelmente constituindo uma das causas da atividade tectônica do referido alto estrutural.

A progradação sedimentar registrada na Formação Serra dos Lanceiros na Sub-Bacia Camaquã Ocidental e nos conglomerados agrupados sob a Formação Rinção dos Mouras na Sub-Bacia Camaquã Central, ocorridas durante o soerguimento do alto estrutural podem ser explicadas pela combinação da queda das taxas de subsidência da bacia sedimentar provocada pelo domeamento, durante os primeiros estágios do soerguimento, de uma região maior do que a área que seria posteriormente limitada pelo falhamento rúptil. Um possível aumento do aporte sedimentar para dentro da bacia, provocado pela erosão de depósitos sedimentares pouco litificados que haviam sido depositados anteriormente sobre a região que viria a constituir o alto estrutural deve ter contribuído para o padrão progradacional. Por outro lado, a progradação sedimentar registrada na sub-bacia ocidental após o estabelecimento da falha normal na borda oeste do alto estrutural, registrado especialmente na Formação Pedra do Segredo, e a retrogradação sedimentar registrada na sub-bacia central, responsável pela deposição da Formação João Dias, embora consistam de depósitos aparentemente pouco relacionados, podem ter sua evolução explicada pela captura de um sistema de drenagem de grande escala, que alimentaria toda a bacia, para dentro do graben de extensão limitada recém individualizado da Sub-Bacia Camaquã Ocidental, o que teria implicado em um incremento da taxa de aporte sedimentar relativamente alto em relação a taxa de subsidência da sub-bacia ocidental, resultando na progradação verificada no topo do Grupo Santa Bárbara. Por outro lado, esse mesmo evento resultaria em queda sensível na taxa de aporte sedimentar da sub-
bacia central, o que teria provocado a retrogradação dos sistemas deposicionais observados nos depósitos no topo da sucessão sedimentar do Grupo Santa Bárbara, na Formação João Dias.

As hipóteses acima apresentadas consideram as particularidades da evolução de um alto estrutural interno à uma bacia extensional, situação essa que contrasta com os cenários considerados nos modelos disponíveis de resposta sedimentar à evolução de altos estruturais localizadas às margens de bacias sedimentares. Os depósitos da porção superior do Grupo Guaritas por sua vez exemplificam os efeitos da subsidência um alto estrutural em uma bacia sedimentar. Durante a fase em que o alto se manteve soerguido o aporte sedimentar limitado para a bacia resultava no avanço de um campo de dunas para próximo dos limites da bacia, com o aporte de detritos vindos do alto estrutural ocorrendo de maneira esporádica em eventos que resultavam na deposição de legues aluviais e na inundação de interdunas. Com a subsidência do alto estrutural, há um expressivo aumento no aporte sedimentar, com a instalação de sistemas deposicionais fluviais entrelaçados causados provavelmente pela captura de sistemas de drenagem, que anteriormente corriam fora da bacia, aumentando dessa forma o aporte sedimentar para a bacia. Uma outra consequência inferida da subsidência do Alto da Serra das Encantadas é o aumento da área da bacia distensional para além da falha mestra responsável pela subsidência mecânica da bacia, como proposto por McKenzie (1978) e verificado por Almeida et al. (2009) na mesma unidade sedimentar do Grupo Guaritas.

Referências Bibliográficas

- Aitchison J. 1986. *The statistical analysis of compositional data*. Chapman and Hall, London. 416 p.
- Almeida F.F.M. 1967. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia DNPM*, **241:** 1-36
- Almeida F.F.M. 1969. Diferenciação tectônica da Plataforma Brasileira. *In:* XXIII Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Salvador, *Anais*, 1: 29-46
- Almeida R.P. 2001. Evolução tectono-sedimentar da Formação Santa Bárbara na Sub-bacia Camaquã Ocidental, RS. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 160 p.
- Almeida, R.P. 2005. Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai Oriental). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 203p.
- Almeida R.P., Janikian L., Fragoso-Cesar A.R. & Marconato A. 2009. Evolution of a rift basin dominated by subaerial deposits: The Guaritas Rift, Early Cambrian, Southern Brazil. *Sedimentary Geology*, 217: 30-51.
- Almeida R.P., Janikian L., Fragoso-Cesar A.R.S. & Fambrini G.L. 2010. The Ediacaran to Cambrian rift system of Southeastern South America: tectonic implications. *The Journal* of Geology, **118**:154-161.
- Basei M.A.S., Frimmel H.E., Nutman A.P. & Preciozzi F.P. 2009. West Gondwana Amalgamation based on detrital zircon ages from Neoproterozoic Ribeira and Dom Feliciano Belts of South America and a comparison with coeval sequences from southwestern Africa. *In*: Pankhurst R. J., Trown R.A.J., Brito Neves B.B. & de Wit M.J. (eds.) *West Gondwana: pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic Region*. Geological Society of London Special Publication. 294: 239-256.
- Becker R. & Fernandes L. A. D. 1982. Caracterização faciológica da sequência vulcano-sedimentar eo-paleozóica na Folha Passo do Tigre (RS). *Acta Geologica Leopoldensia*. 13: 287-322
- Blair T. & Bilodeau W. 1988. Development of tectonic cyclothems in rift, pull-apart and foreland basins: sedimentary response to episodic tectonism. *Geology*, **16**: 517-520
- Blair T.C. & McPherson J.G. 1994. Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic, sedimentary processes, and facies assemblages. *Journal of Sedimentary Research*, **64**:450–489.
- Borba A.W. & Mizusaki A.M.P. 2003. Santa Bárbara Formation (Caçapava do Sul, southern Brasil): depositional sequences and evolutin of an Early Paleozoic postcollisional basin. *Journal of South American Earth Sciences*, **16**: 365-380.

- Borba A.W., Mizusaki A.M.P., Maraschin A.J. & Silva D.R.A. 2008. Santa Bárbara Formation (Early Paleozoic, Caçapava do Sul, southern Brazil): Petrographic and Sm–Nd isotopic provenance parameters. *Journal of South American Earth Sciences*, **26**: 485–497.
- Borba A.W., Mizusaki A.M.P., Silva D.R.A. & Kawashita K. 2003. Razões isotópicas 87Rb/86Sr, 87Sr/86Sr e 143Nd/144Nd como traçadores de proveniência de rochas sedimentares siliciclásticas: exemplos no Grupo Camaquã (Paleozóico inferior, RS, Brasil). *Pesquisas em Geociências (UFRGS)*, Porto Alegre. **30**(2): 39-50.
- Borba A.W., Vignol-Lelarge M.L.M. & Misuzaki A.M.P. 2002. Uplift and denudation of the Caçapava do Sul granitoids (southern Brazil) during Late Paleozoic and Mesozoic: constraints from apatite fission-track data. *Journal of South American Earth Sciences*, **15**:683-692.
- Capuzzo N. & Wetzel A. 2004. Facies and basin architecture of the Late Carboniferous Salvan-Dorénaz continental basin (Western Alps, Switzerland/France). *Sedimentology*, **51**:675-697.
- Carvalho P.F. 1929. Reconhecimento geológico efectuado no município de Caçapava, Rio Grande do Sul, Brasil. *Boletim do Serviço Geologico e Mineralogico do Brasil:* 41-55, relatório Annual do Diretor.
- Carvalho P.F. 1932. Reconhecimento geológico no Estado do Rio Grande do Sul. *Boletim do Instituto Geológico e Mineralógico Brasileiro*, **66**:1-72.
- Castle 2001. Appalachian basin stratigraphic response to convergent-margin structural evolution. *Basin Research*. **13**: 397-418.
- Chemale Jr. F. 2002. Evolução Geológica do Escudo Sul-Rio-Grandense. *In* Holz M., & De Ros L.F. (eds). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CIGO/UFRGS, p. 13–52.
- DeGraaff-Surpless K., Graham S. A., Wooden J. L. & McWillians M. O. 2006. Detrital zircon provenance analysis of the Great Valley Group, California: Evolution of an arc-forearc system. *GSA Bulletin*, **114**(12):1564-1580.
- Dodson M.H., Compston W., Williams I. S. & Wilson J. F. 1988. A search for ancient detrital zircons in Zimbabwean sediments. *Journal of the Geological Society (London)*, 145(6)977–983.
- Dürr S.B. 1994. Quick estimation of pebble volumes. *Journal of Sedimentary Research*, A64: 677-679
- Dürr S.B. 1996. Provenance of Xigaze fore-arc basin clastic rocks (Cretaceous, south Tibet). *GSA Bulletin*, **108**(6):669-684.
- Faccini U.F., Paim P.S.G. & Fragoso-Cesar A.R.S. 1987. Análise faciológica das molassas brasilianas na região das Minas do Camaquã, Eo-paleozóico do RS. In: III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, SBG, Curitiba, PR, Atas, 1: 75–91.
- Fambrini G.L. 1998. O Grupo Camaquã (Transição Proterozóico-Fanerozóico) na região das Minas do Camaquã, RS: análise estratigráfica de fácies, proveniência e

paleocorrentes. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 182p.

- Fambrini G.L. 2003. O Grupo Santa Bárbara (Neoproterosóico III) da Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 264p.
- Fambrini G.L., Janikian, L., Almeida R.P. & Fragoso-Cesar A.R.S. 2005. Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-bacia Camaquã Central, RS: estratigrafia e sistemas deposicionais. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(2): 227-238.
- Fambrini G.L., Sayeg H.S., Machado R., Silva Filho W.F., Teixeira A.L., Sales F.F., Ribeirode-Almeida T.I. & Fragoso-Cesar A.R.S. 1996. Provenance and paleocurrents of Santa Bárbara Formation, Camaquã Basin, RS (Proterozoic-Phanerozoic transition): examples from the Arroio Boici and the Minas do Camaquã regions. *In: Sessão ordinária da Academia Brasileira de Ciências, São Paulo*. Anais da Academia Brasileira de Ciências. Rio de Janeiro. **68:** 599-600.
- Fedo C.M., Sircombe K.N. & Rainbird R.H. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. In: J. M. Hanchar & P. Hoskin (eds.) Zircon: Experiments, Isotopes, and Trace Element Investigations. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy. 53:277-303.
- Fragoso-Cesar A.R.S. 1984. *Evolução paleoambiental e tectônica da Bacia do Camaquã: uma introdução*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 105 p.
- Fragoso-Cesar A.R.S. 1991. *Tectônica de Placas no Ciclo Brasiliano: as orogenias dos Cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 366 p.
- Fragoso-Cesar A.R.S., Fambrini G.L., Almeida R.P., Pelosi A.P.M.R., Janikian L., Riccomini C., Machado R., Nogueira A.C.R. & Saes G.S. 2000. The Camaquã extensional basin: Neoproterozoic to early Cambrian sequences in southernmost Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(3): 438-441.
- Fragoso-Cesar A.R.S., Faccini U.F., Paim P.S.G., Lavina E.L. & Altamirano J.A.F. 1985. Revisão na estratigrafia das molassas do Ciclo Brasiliano no Rio Grande do Sul. *In*: SBG, II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Florianópolis, *Anais*, 477-491.
- Fragoso-Cesar A.R.S., Lavina E.L., Paim P.S.G. & Faccini U.F. 1984. A Antefossa Molássica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo do Rio Grande do Sul. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Rio de Janeiro, *Anais*. 7: 3272-3283.
- Fragoso-Cesar A.R.S., Silva Filho W.F., Fambrini G.L., Machado R., Riccomini C., Almeida R.P., Pelosi A.P.M.R. & Janikian L. 1999. Significado tectônico do magmatismo Rodeio Velho no rift Guaritas (Eopaleozóico do Rio Grande do Sul, Brasil). *In*: Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados, *Boletim de resumos*. p.16.

Gawthorpe R.L. & Leeder M.R. 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional

basins. Basin Research, 12: 195-218.

- Gehrels G. E., Yin A. & Wang X. F. 2003. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau. *GSA Bulletin*, **115**(7): 881-896
- Gerdes A. & Zeh A. 2006. Combined U–Pb and Hf isotope LA-(MC-)ICP-MS analyses of detrital zircons: Comparison with SHRIMP and new constraints for the provenance and age of an Armorican metasediment in Central Germany . *Earth and Planetary Science Letters*, **249**: 47-61.
- Gillis R. J., Gehrels G. E., Ruiz J. & Gonzaléz L. A. F. D. 2005. Detrital zircon provenance of Cambrian–Ordovician and Carboniferous strata of the Oaxaca terrane, southern Mexico . *Sedimentary Geology*, **182**: 87-100.
- Goñi J. C., Goso H. & Issler R. S. 1962. Estratigrafia e Geologia Econômica do Pré-Cambriano e Eo-Paleozóico Uruguaio e Sul-Rio-Grandense. *Avulso de Geologia da Escola de Geologia da Universidade do RGS*, **3**:1-105.
- Gonzalez M. A. & Teixeira G. 1980. Considerações sobre a estratigrafia e ambientes de sedimentação da região das Minas do Camaquã e Jazida Sana Maria RS. *In:* XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Camboriú, *Anais*, **3**:1513-1524.
- Hartley A.J. 1993. Sedimentological response of alluvial systems to source area tectonism: the Seilao Member of the Late Cretaceous to Eocene Purilactis Formation of northern Chile. *In*: Marzo M. & Puigdefábregas C. (eds.), *Alluvial Sedimentation, International Association of Sedimentologists Special Publication*, 17: 489- 500.
- Hartmann L.A. 2002. The mesoproterozoic continent Atlantica in the Brazilian shield review of geological and U-Pb and Sm-Nd evidence. *Gondwana Research*, **5**: 157-163
- Hartmann L.A., Leite J.A.D., Remus M.V.D., McNaughton N.J., Groves D.I., Fletcher I.R., Santos J.O.S. & Vasconcellos M.A.Z. 2000. Advances in SHRIMP geochronology and their impact in understanding the tectonic and metallogenetic evolution of southern Brazi. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47: 829-843.
- Hartmann L.A., Santos J.O.S. & McNaughton N.J. 2008. Detrital zircon U-Pb age data, and Precambrian provenance of the Paleozoic Guaritas Formation, Southern Brazilian Shield. International Geology Review, 50: 364-374
- Heller P.L., Angevine C.L., Winslow N.S. & Paola C. 1988. Two-phase stratigraphic model of foreland-basin sequences. *Geology*, **16**: 501-504.
- Ibbeken H. & Schleyer R. 1991. Source and Sediment A case study of provenance and mass balance at an active plate margin (Calabria, southern Italy). Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 286 pp.
- Ingersoll R.V., Bullard T.F., Ford R.L., Grimm J.P. & Pickle J.D. 1988. The effect of grain size on detrital modes: a test on the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Petrology*, **54**: 103-116

Janikian L. 2004. Seqüências deposicionais e evolução paleoambiental do Grupo Bom

Jardim e da Formação Acampamento Velho, Supergrupo Camaquã, Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 189p.

- Janikian L., Almeida R.P., Fragoso-Cesar A.R.S. & Fambrini G.L. 2003. Redefinição do Grupo Bom Jardim (Neoproterozóico III) em sua área tipo: litoestratigrafia, paleogeografia e significado tectônico das sucessões vulcano-sedimentares do Supergrupo Camaquã, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 33: 349-362.
- Janikian, L.; Almeida, R.P.; Trindade, R.I.F.; Fragoso-Cesar, A.R.S.; D'Agrella-Filho, M.S.; Dantas, E. L.; & Tohver, E. 2008. The continental record of Ediacaran volcanosedimentary successions in southern Brazil and their global implications. *Terra Nova*, 20(4): 259–266.
- Jo H.R. 2003. Depositional environments, architecture, and controls of Early Cretaceous nonmarine successions in the northwestern part of Kyongsang Basin, Korea. *Sedimentary Geology*, **161**: 269-294.
- Jones A. P. 2000. Late quaternary sediment sources, storage and transfers within mountain basins using clast lithological analysis: Pineta Basin, central Pyrenees, Spain. *Geomorphology*. **34**: 145-161.
- Justo A. P. 2003. Controles tectônicos e influência do soerguimento do Alto de Caçapava do Sul na sedimentação do Grupo Santa Bárbara (Eopaleozóico, Bacia do Camaquã, RS). Monografia de trabalho de formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Košler J., Fonneland H., Sylvester P., Trubett M. & Pedersen R. B. 2002. U–Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies - a comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques . *Chemical Geology.* 182: 605-618.
- Lavina E.L., Faccini U.F., Paim P.S.G. & Fragoso-Cesar A.R.S. 1985. Ambientes de sedimentação da Bacia do Camaquã, Eo-paleozóico do Rio Grande do Sul. *Acta Geologica Leopoldensia*, **21**: 185–227.
- Leinz V. 1939. Problema geológico do Post.Arqueano no Rio Grande do Sul. *Mineração e Metalurgia*, 4: 203-206.
- Leinz V., Barbosa A. F. & Teixeira G. A. 1941. Mapa Geológico Caçapava-Lavras. Boletim 90, Divisão de Produção Mineral da Secretaria da Agricultura, Indústria e Comércio, Porto Alegre, RS.
- Leite J.A.D. 1995. Datação SHRIMP U/Pb em zircões e o exemplo de dois corpos graníticos contrastantes no Escudo Sul-Riograndense. *In*: SBG, IV Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia/I Encontro de Geologia do Cone Sul, Porto Alegre, *Boletim de Resumos*, p.5-12.
- Ludwig K.R. 2003. Isoplot/Ex versio 3.00 a geochronological toolkit for Microsoft Excel: Berkeley, CA, Berkeley Geochronological Center Special Publication, v.4. 70 p.
- Marconato A., Almeida R.P., Santos M.G.M., Nóbrega J.E.S. & Souza R.B. 2009. Alluvial-

eolian interaction in a Cambrian rift margin: the Pedra das Torrinhas and Pedra Pintada formations (Guaritas Group, RS). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **81**(4): 819-836

- Marr J.G., Swenson J.B., Paola C. & Voller V.R. 2000. A two-difusion model of fluvial stratigraphy in closed depositional basins. *Basin Research*, **12**: 381-398.
- Martín-Fernández J.A. & Thió-Henestrosa S. 2006. Rounded zeros: some practical aspects for compositional data. *Geological Society, London, Special Publications*, **264**: 191-201.
- Martín-Fernandez J.A., Barceló-Vidal C. & Pawlowsky-Glahn V. 2003. Dealing With Zeros and Missing Values in Compositional Data Sets Using Nonparametric Imputation. *Mathematical Geology*. **35**(3): 253-278.
- Martins-Neto M.A., Pedrosa-Soares A.C. & Lima S.A.A. 2001. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basins from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. *Sedimentary Geology*. 142: 343-370.
- McKenzie D.P. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, **40**: 25-32.
- Machado R. & Sayeg H. S. 1992. Aplicação da análise geométrica e cinemática nos falhamentos que condicionaram a bacia molássica do Arroio Boici, RS. *In:* I Workshop Sobre as Bacias Molássicas Brasilianas, SBG/UNISINOS, São Leopoldo, RS, *Boletim de Resumos Expandidos*. pp. 73-76.
- Miall A.D. 1990. *Principles of sedimentary and basin analisys*. Springer-Verlag, New York, 2 ed., 668 pp.
- Miall A.D. 2000. *Principles of sedimentary and basin analisys*. Springer-Verlag, New York, 3 ed., 616 pp.
- Nardi L.V.S. & Bitencourt M.F. 1989. Geologia, petrologia e geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul. *Revista Brasileira de Geociências*, **19**: 153-169.
- Nóbrega J.E.S., Sawakuchi A.O. & Almeida R.P. 2008. Minerais pesados das porções média e superior do Grupo Guaritas (Eocambriano, RS): considerações sobre a proveniência sedimentar. *Revista Brasileira de Geociências*. **38**(3): 554-565.
- Oliveira J.M.M.T. & Fernandes L.A.D. 1991. Estágios finais da evolução do Cinturão Dom Feliciano: Tectônica e sedimentação da Formação Arroio dos Nobres. *In*: SBG, III Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Rio Claro, *Boletim de Resumos Extensos*. pp 58-59.
- Oliveira J.M.M.T. & Fernandes L.A.D. 1992. Bacias molássicas brasilianas, mito ou realidade? *In*: SBG/UNISINOS, I Workshop Sobre as Bacias Molássicas Brasilianas, São Leopoldo. *Boletim de Resumos Expandidos*. pp. 97-105.
- Paim P.S.G. 1994. Depositional Systems and Paleogeographical Evolution of the Camaquã and Santa Bárbara Basins, Brazil. Phil. Doctor Thesis, Oxford. v.I, 277 p.

- Paim P.S.G. 1996. O sistema desértico úmido Pedra Pintada (cambro-ordoviciano do RS). *In*: XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, 1996. *Boletim de Resumos Expandidos*. 2:207-209.
- Paim P.S.G. & Scherer C.M.S. 2003. Arquitetura estratigráfica de sucessões flúvio-eólicas: o exemplo do Alogrupo Guaritas na região da Pedra Pintada, Rio Grande do Sul, Brasil. *In*: P.S.G. Paim, U.F. Faccini, R.G. Netto (eds). *Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares Estudo de casos*. Unisinos. p. 38-58.
- Paim P. S. G., Chemale Jr. F. & Lopes R. C. 2002. A Bacia do Camaquã. In: M. Holtz & L. F. DeRos (Eds.), Geologia do Rio Grande do Sul, CIGO/UFRGS, pp.271-274.
- Paim P. S. G., Faccini U. F., Netto R. G. & Nowatzki C. H. 1992. Estratigrafia de seqüências e sistemas deposicionais das bacias Camaquã e Santa Bárbara, Eopaleozóico do RS. (Brasil). Serie Correlación Geologica – Universidad Nacional de Tucumán, 9:41-45.
- Paim P.S.G., Lopes R.C. & Chemale Jr. F. 1995. Aloestratigrafia, sistemas deposicionais e evolução paleogeográfica da Bacia do Camaquã -Vendiano Superior/ Ordoviciano Inferior do RS. *In*: VI Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, I Encontro Geologia Do Cone Sul, Porto Alegre, SBG. Núcleo RS, *Boletim de Resumos Expandidos*, p. 39-50.
- Palarea-Albaladejo J., Martín-Fernandez J.A. & Gomes-Garcia J. 2007. A Parametric Approach for Dealing with Compositional Rounded Zeros. *Mathematical Geology*. **39**: 625–645
- Paola C. 1988. Subsidence and gravel trasport in basins, *In*: Kleinsphen K.L. & Paola C. *New perspectives in Basin Analysis*. Springer-Verlag, New York. p. 231-243.
- Paola C., Heller P.L. & Angevine C.L. 1992. The large-scale dynamics of grain-size variations in alluvial basins I Theory. *Basin Research*, **4**: 73-90.
- Pawlowsky-Glahn V. & Egozcue J.J. 2006. Compositional data and their analysis: an introduction. *Geological Society of London Special Publications*. **264**:1-10.
- Phillip R.P. 1998. A evolução geológica e tectônica do Batólito de Pelotas no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo. 255p.
- Reading H.G. 1986. Facies. In: H.G. Reading (Ed.), Sedimentary Environments and Facies, 2 ed., pp. 4-19.
- Remus M.V.D., Hartmann L.A., McNaughton N.J., Groves D.I., Reischl J.L. 2000. Distal magmatic-hydrothermal origin for the Camaquã Cu (Au-Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu-Ag) deposits, southern Brazil. *Gondwana Research*, **3**: 155-174.
- Ribeiro M. 1970. Geologia da Folha de Bom Jardim, Rio Grande do Sul, Brasil. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia DNPM*, Rio de Janeiro. (247): 1-142.
- Ribeiro M. & Fantinel L. M. 1978. Associações petrotectônicas do Escudo Sul-Riograndense: I Tabulação e distribuição das petrotectônicas do Escudo do Rio Grande do Sul. *Ihneríngia, Série Geológica*, **5**:19-54.

- Ribeiro M. & Lichtenberg E. 1978. Síntese da Geologia do Rio Grande do Sul. *In:* XXX Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Recife, PE, *Anais*, vol. 6, pp. 2451–2463.
- Ribeiro M. J., Badi W. S. E., Gonzalez A. P., Gonzalez M., Licht O. A. & Teixeira G. 1980. Jazida Santa Maria - Chumbo e Zinco estratiformes no Grupo Bom Jardim, Rio Grande do Sul. *In: XXXI* Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, *Anais*, 3:1725-1742.
- Ribeiro M., Bocchi P. R., Figueiredo Filho P. M. & Tessari R. I. 1966. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Boletim 127, DNPM/DFPM, Rio de Janeiro, 232p.
- Roberts S.J., Hodgson D. A., Bentley M. J., Smith J. A., Millar I. L., Olive V. & Sugden D. E. 2008. The Holocene history of George VI Ice Shelf, Antarctic Peninsula from clastprovenance analysis of epishelf lake sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 259: 258-283.
- Robertson J.F. 1966. Revision of Stratigraphy and nomenclature of rock units in Caçapava-Lavras Region. *Notas e Estudos*, IG-UFRGS, Porto Alegre, **1**(2): 41-54.
- Sartori P.L.P & Kawashita K. 1985. Petrologia e geocronologia do Batólito Granítico de Caçapava do Sul. *In*: SBG, II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Florianópolis, *Anais*, p.102-115.
- Scherer C.M.S., Paim P.S.G. & Melo M.A. 2003. Estratigrafia de alta resolução em sucessões flúvio-eólicas: o exemplo do Alogrupo Guaritas (Bacia do Camaquã) na localidade da Pedra Pintada, Rio Grande do Sul, Brasil. *In*: I Encontro sobre a estratigrafia do Rio Grande do Sul: Escudo e Bacias, Porto Alegre, *Anais*. p.99-103.
- Shanley K.W. & McCabe P. J. 1994. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **78**(4): 544-568.
- Silva Filho W.F. 1997. *A Formação Guaritas na porção centro-sudeste da Bacia do Camaquã-RS*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo. 121 p.
- Soliani Jr. E., Koester E., Fernandes L.A.D. 2002. A Geologia Isotópica do Escudo Sul-riograndense – Parte II: os dados isotópicos e interpretações petrogenéticas. *In*: Holtz M. & DeRos L.F. (eds.) *Geologia do Rio Grande do Sul*. CIGO/UFRGS. p. 231-274.
- Sommer C.A., Lima E.F., Nardi L.V.S., Figueiredo A.M.G. & Pierosan R. 2005. Potassic and low- and high-Ti mildly alkaline volcanism in the Neoproterozoic Ramada Plateau, southermost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **18**:237–254.
- Teixeira A.L., Gaucher C., Paim P.S.G., Fonseca M.M., Parente C.V., Silva Filho W.F. & Almeida A.R. 2004. Bacias do Estágio da Transição da Plataforma Sul-Americana. *In*: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (eds) *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca. p. 487-537.
- Tessari R.I. & Picada R. 1966. Geologia da Quadrícula Encruzilhada do Sul, RS. *Boletim da Divisão de Fomento e Produção Mineral*, **124**: 1-122.

- Van Wick N. & Norman M. 2004. Detrital zircon ages from Early Proterozoic quartzites, Wisconsin, support rapid weathering and deposition of mature quartz arenites . *The Journal of Geology*, **112**: 305-315.
- Vermeesch P. 2004. How may grains are needed for a provenance study? *Earth and Planetary Science Letters*, **224**:441-451.
- Walker R.G. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. *In:* R.G. Walker & N.P. James (Eds.), *Facies Models and Response to Sea-level Change*, Geological Association of Canada, Geotext 1, pp. 1-14.
- Weislogel A. L., Graham S. A., Chang E. Z., Wooden J. L., Gehrels G. E. & Yang H. 2006 Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi complex: Sedimentary record of collision of the North and South China blocks. *Geology*, **34**(2): 97-100.
- Wright V.P. & Marriot S.B. 1993. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: the role of floodplain sediment storage. *Sedimentary Geology*, **86**: 203-210.
- Zanon C., Machado R., Phillip R.P. 2006. Petrografia e geoquímica dos diques félsicos e máficos associados ao Batólito Pelotas na região de Piratini, RS. *Revista Brasileira de Geociências*. 1: 23-34.

ANEXO 01

ANEXO 02