

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**GEOQUÍMICA DE MINERAIS PESADOS DETRÍTICOS: SUA
APLICAÇÃO NO ESTUDO DA PROVENIÊNCIA DAS
AREIAS DE PRAIAS DO LITORAL NORTE E MÉDIO DO
RIO GRANDE DO SUL**

CARLA ENNES DE BARROS

**ORIENTADORES – Prof. Dr. Lauro V. S. Nardi
Prof. Dr. Sergio R. Dillenburg**

Porto Alegre – 2006

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**GEOQUÍMICA DE MINERAIS PESADOS DETRÍTICOS: SUA
APLICAÇÃO NO ESTUDO DA PROVENIÊNCIA DAS AREIAS DE
PRAIAS DO LITORAL NORTE E MÉDIO DO RIO GRANDE DO
SUL**

CARLA ENNES DE BARROS

ORIENTADORES – Prof. Dr. Lauro V. S. Nardi
Prof. Dr. Sergio R. Dillenburg

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Dilce de Fátima Rossetti – Centro de Observação da Terra- Divisão De Sensoriamento Remoto Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo.

Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi – Departamento de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Prof. Dr. Luiz José Tomazelli – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre – 2006

]

Barros, Carla Ennes de

Geoquímica de minerais pesados detríticos: sua aplicação no estudo da proveniência das areias de praias do litoral norte e médio do Rio Grande do Sul./ Carla Ennes de Barros. – Porto Alegre : Igeo/UFRGS, 2006.

[115 f.]. il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, RS - BR, 2006.

1. Geoquímica de Minerais Detríticos. 2. Proveniência. 3. Química Mineral. 4. Planície Costeira do Rio Grande do Sul. 5. Minerais Pesados. I. Título.

Catálogo na Publicação
Biblioteca do Instituto de Geociências - UFRGS
Renata Cristina Grun CRB 10/1113

À minha madrinha

minha *fada* Didi

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer a todos que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Lauro Vallentim Stoll Nardi

Sérgio Rebello Dillenburg

Nelson Sambaqui Gruber

Beatriz Appel Dehnhardt

Gilberto Santos

Cassiana, Daniel, Rafael, Ingke

Iran, Ayup, Elírio, Jair, Flávio e demais colegas do CECO

Simone, Silvana, Denise, Marília

Ricardo, Diego e Pedro, por tudo...

RESUMO

A composição química de minerais detríticos de sedimentos é uma ferramenta de importância crescente em estudos de proveniência. Neste trabalho é testada e discutida sua aplicação na identificação das fontes primárias dos minerais pesados detríticos das areias de praias holocênicas do sul do Brasil. Ao longo do litoral médio e norte do Rio Grande do Sul, foram coletadas 11 amostras de areia a cada 40km. Os grãos de zircão foram separados e analisados por LA-ICP-MS, por microsonda eletrônica e MEV. No litoral norte, além do zircão, também foram estudados piroxênios, epidotos, anfibólios, granadas e turmalinas e as análises foram feitas para seus principais componentes químicos com microsonda eletrônica. As potenciais fontes primárias dos zircões detríticos foram determinadas principalmente com base nas razões Th/U, Y/Ho, Nb/Ta e nos conteúdos de Nb e de elementos terras raras. Suas fontes são predominantemente: (i) rochas graníticas subalcalinas, (ii) granitóides alcalinos (tipo A), (iii) rochas máficas associadas aos granitóides e (iv) associações metamórficas de alto grau. Os zircões metamórficos são mais abundantes na parte sul do segmento litorâneo enquanto na porção norte, predominam os zircões de granitóides do tipo A. Os demais minerais foram estudados somente em amostras do litoral norte e permitiram sugerir com maior precisão a área fonte potencial para estes sedimentos. A composição dos piroxênios indica fontes metamórficas de fácies granulito e rochas básicas toleíticas pós-colisionais. Rochas metamórficas metapelíticas e margosas de fácies granulito e anfíbolito são fontes importantes e tem sua participação indicada pela presença de estauroлита, rutilo, silicatos de alumínio, granadas (almandina e grossulária), zoisita, turmalinas cálcicas e cumingtonita presentes em praticamente todas amostras. Granitóides do tipo A são fontes indicadas pela presença de zircões com alto teor de Nb e ETR, por razões Nb/Ta superiores a 20, e por anfibólios com alta razão Fe/(Fe+Mg). Granitóides peraluminosos têm sua presença nas áreas fontes indicadas por granada rica em espessartina e turmalina rica em ferro, enquanto, granitóides shoshoníticos e subalcalinos médio e alto-K, tem sua participação sugerida pela presença de epidoto magmático, titanita, anfibólios cálcicos com razões Fe/(Fe+Mg) moderadas e zircões com razões Th/U de 0,3–0,5 e Nb/Ta entre 5–15. Anfibólios magnesianos indicam a contribuição de fontes ultramáficas. Rochas hidrotermalizadas são também constituintes das áreas fontes e tem sua presença apontada por turmalinas litiníferas, actinolita e

epidotos. A homogeneidade dos tipos e abundâncias dos minerais detríticos em todas as amostras do litoral norte indicam uma área fonte comum para esses sedimentos praias, embora possa haver o predomínio local de fontes como por exemplo, as hidrotermalizadas na porção mais a sul do litoral norte. O extremo nordeste do Batólito Pelotas constituído predominantemente pelas suítes graníticas Encruzilhada do Sul, Cordilheira e *greisens* associados, Viamão e Dom Feliciano e pelo complexo metamórfico Várzea do Capivarita é a provável área fonte primária potencial dos sedimentos estudados. A pesquisa realizada demonstra que a química mineral de zircões e dos demais minerais utilizados pode produzir informações detalhadas quanto à área fonte primária de minerais pesados detríticos, constituindo poderosa ferramenta para este tipo de investigação.

ABSTRACT

The chemical composition of detrital minerals in sediments has an increasing importance in provenance studies. In this study the primary sources of detrital heavy minerals of Holocene beach sediments from southern Brazil coast are discussed with basis mainly on their chemical composition. Eleven samples of beach sand were collected at each 40km along the medium and northern littoral of Rio Grande do Sul state. Zircon grains from these samples were analysed for trace elements by LA-ICP-MS, microprobe and electron microscopy. Pyroxene, amphibole, epidote, garnet, and tourmaline from the northern segment samples were analysed for their main components by electron microprobe. The primary sources of detrital zircons were indicated mainly by their Th/U, Y/Ho, and Nb/Ta ratios, as well as by their Nb and REE contents. The main identified sources are: (i) subalkaline granitoids, (ii) A-type or alkaline granitoids, (iii) mafic rocks associated to the granitoids, (iv) upper-amphibolite and granulite facies rock sequences. Metamorphic zircons are more abundant in the southern segment of the studied area, whilst in the northern sector zircons from A-type granitoids are predominant. The chemistry of the other minerals, studied only in the northern littoral, allowed a more accurate determination of their potential primary sources. The pyroxene compositions indicate the contribution of metamorphic sources of granulite facies and of basic rocks formed at post-collisional settings. High grade metapelitic rocks and amphibolites are important sources suggested by the occurrence of staroullite, rutile, aluminium silicates, almandine, grossular, zoisite, Ca-rich tourmaline, and commingtonite, in the whole set of samples. A-type granitoids are abundant in the source area as indicated by zircons with high Nb and ETR contents, and Nb/Ta ratios greater than 20, and, by amphiboles with Fe/(Fe+Mg) higher than 0.9. Peraluminous granitoids have their presence in the source indicated by Mn-rich garnet and Fe-rich tourmaline, whilst the occurrence of shoshonitic and medium to high-K subalkaline granitoids is pointed out by magmatic epidote, titanite, calcic amphiboles with moderate Fe/(Fe+Mg) ratios and zircons with Th/U in the range 0.3–0.5, and Nb/Ta varying from 5 to 15. Magnesian amphiboles indicate ultramafic sources. Hydrothermal products are also indicated in the primary sources by the occurrence of Li-rich tourmaline, actinolite, and hydrothermal epidotes. The homogeneity of abundance and typology of detrital minerals in the northern littoral indicate a common

source for the studied sediments, although, in some places a localised source may be important, such as the hydrothermally altered rocks in the samples of the southern part of northern littoral. The northeastern part of the Pelotas Batholith, composed of Encruzilhada do Sul, Cordilheira, Viamão e Dom Feliciano granitic suites, with associated greisens, and of the Varzea do Capivarita metamorphic complex is the probable source region of the northern segment sediments. The compositional variations of zircons from southern to northern sector are coherent with the hypothesis that the studied sediments came from relatively near continental source areas, probably delivered to the RS continental margin by several small streams and rivers, mainly during the last sea level lowstand ended at 17.5 ka. This study confirms that the mineral chemistry of zircons, including trace elements, and of other studied minerals can yield detailed and accurate information about the primary source of heavy detrital minerals, and so being of high relevance for provenance studies.

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	6
SUMÁRIO	8
ESTRUTURA DA TESE	11

CAPÍTULO 1	13
INTRODUÇÃO	14
Objetivos	14
Estado da arte	14
Materiais e Métodos	16
Sumário integrador	17
Referências Bibliográficas	19

CAPÍTULO 2	21
GEOQUÍMICA DE MINERAIS DETRÍTICOS EM ESTUDOS DE PROVENIÊNCIA:	
UMA REVISÃO	22
Abstract	22
INTRODUÇÃO	23
UTILIZAÇÃO DA GEOQUÍMICA MINERAL NA PESQUISA DE PROVENIÊNCIA	25
Zircão	25
Piroxênio	29
Anfibólio	31
Granada	35
OUTROS MINERAIS DETRÍTICOS INDICADORES DE PROVENIÊNCIA	35
CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
Agradecimentos	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

CAPÍTULO 3	47
DETRITAL MINERALS OF MODERN BEACH SEDIMENTS IN SOUTHERN BRAZIL: A PROVENANCE STUDY BASED ON CHEMISTRY OF ZIRCON	48
Abstract	48

INTRODUCTION	49
A BRIEF REVIEW OF THE USE OF ZIRCON CHEMISTRY IN PROVENANCE STUDIES	51
REGIONAL SETTING	54
SANDS IN THE HOLOCENE BEACH DEPOSITS	55
ANALYTICAL TECHNIQUES AND DATA PROCESSING	56
CHEMISTRY OF ZIRCON GRAINS	57
Yttrium and rare earth elements	59
Niobium, Thorium and Uranium	61
CART (Classification and Regression Trees) zircon classification (after Belousova et al. 2002)	62
Th/U, Y/Ho, Nb/Ta, and Zr/Hf ratios in zircon grains	64
MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS	65
SOURCES OF DETRITAL ZIRCON GRAINS	66
REGIONAL GEOLOGY AND POTENTIAL SOURCES OF THE STUDIED ZIRCONS	68
CONCLUSIONS	69
Acknowledgments	70
REFERENCES	70

CAPÍTULO 4	74
DISTRIBUIÇÃO E ORIGEM DOS MINERAIS DETRÍTICOS PESADOS DAS AREIAS PRAIAIS HOLOCÊNICAS DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL	
Resumo	75
Abstract	76
INTRODUÇÃO	77
A COSTA DO RIO GRANDE DO SUL	79
AMOSTRAGEM E PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS	80
DISTRIBUIÇÃO DA VARIAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MINERAIS LEVES E PESADOS AO LONGO DO LITORAL	81
MINERALOGIA E VARIAÇÃO MODAL DOS MINERAIS PESADOS NAS AREIAS MUITO FINAS	82
COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MINERAIS DETRÍTICOS E	

SUA APLICAÇÃO NA PROVENIÊNCIA	83
Piroxênio	83
Anfibólio	86
Epidoto	88
Granada	89
Turmalina	90
Zircão	91
Rutilo	92
Estaurolita	92
A PROVENIÊNCIA DOS MINERAIS DETRÍTICOS	93
CONCLUSÕES	94
Agradecimentos	95
REFERÊNCIAS	95

CAPÍTULO 5	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

ANEXO A	110
ANEXO B	112

ESTRUTURA DA TESE

A tese é composta por 5 capítulos e 2 anexos, assim distribuídos:

O primeiro capítulo é a introdução que contém (1) objetivos da tese e os avanços pretendidos com este estudo; estado da arte do tema de tese e os métodos de investigação utilizados e (2) sumário integrador, com o resumo dos principais resultados obtidos nos três artigos, suas conclusões e as referências bibliográficas.

O segundo capítulo é composto pelo artigo intitulado *Geoquímica de minerais detríticos em estudos de proveniência: uma revisão*, publicado na revista Pesquisas em Geociências, número 32, volume 1, no ano de 2005 (Barros et al. 2005). Este capítulo trata de uma revisão dos estudos de proveniência em minerais detríticos, a partir de dados geoquímicos, onde apresenta a integração de dados geoquímicos com outras técnicas usuais de petrologia sedimentar para a pesquisa de proveniência dos sedimentos.

O terceiro capítulo apresenta o artigo *Detrital minerals of modern beach sediments in southern Brazil: a provenance study based on chemistry of zircon*, que foi encaminhado para o Journal of Coastal Research em novembro de 2006 e tem como autores: Barros, C.B.; Nardi, L.V.S.; Dillenburg, S.R.; Ayup, R.; Jarvis, K. & Baitelli, R. Este capítulo mostra que a química do zircão pode ser uma excelente ferramenta no estudo de proveniência de minerais detríticos pesados. Este trabalho foi realizado com os zircões detríticos das areias praias do litoral médio e norte do Rio Grande do Sul e propõe metodologias novas para identificar provável ambiente tectônico e afinidade geoquímica de zircões de fontes ígneas ou metamórficas.

O quarto capítulo é o artigo *Distribuição e origem dos minerais detríticos pesados do litoral norte do Rio Grande do Sul*, encaminhado para a Revista Brasileira de Geociências em dezembro em 2006 e tem como autores Barros, C.B.; Nardi, L.V.S.; Dillenburg, S.R.; Baitelli, R. & Dehnhardt, B.A.. Neste trabalho é discutida a geoquímica de diferentes minerais detríticos pesados, principalmente piroxênio, anfibólio, zircão, epidoto, granada, turmalina, rutilo e estauroлита, para a definição de suas prováveis fontes primárias. Neste capítulo mostra-se que com a integração dos dados geoquímicos de diferentes espécies de minerais pode-se determinar com maior precisão a origem primária dos minerais detríticos pesados encontrados no litoral norte do Rio Grande do Sul.

No quinto capítulo, encontram-se as referências bibliográficas mencionadas nos capítulos anteriores.

O anexo A consta da cópia da primeira página do artigo apresentado no capítulo 2 e que foi publicado na revista Pesquisas em Geociências.

Anexo B é composto pelas cartas de recebimento dos artigos que compõem os capítulos 3 e 4 e que foram enviados para Journal of Coastal Research e Revista Brasileira em Geociências, respectivamente.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo determinar as prováveis fontes primárias dos minerais detríticos pesados das areias praias holocênicas do litoral médio e norte do Rio Grande do Sul, a partir do estudo geoquímico e, também, adicionar metodologias para este tipo de pesquisa. Este estudo, além de contribuir para o conhecimento geológico do quaternário costeiro do Rio Grande do Sul, auxiliará no desenvolvimento do uso da geoquímica mineral, em estudos de proveniência.

Estado da arte

O termo proveniência, do latim *provenire*, significa ter origem, derivar, proceder. Refere-se às fontes das quais os materiais detríticos sedimentares foram derivados. Cada tipo de rocha tende a apresentar uma suíte distinta de minerais que lhe é característica (Petijohn, 1975).

Muitas fontes e vários ciclos sedimentares podem estar envolvidos nos processos geradores de sedimentos. Isto dificulta a identificação e distinção das fontes primeiras e das imediatas, isto é, as geradoras dos minerais detríticos, em geral ígneas e metamórficas, e as de última origem destes minerais, respectivamente. Embora um único grão mineral possa conter a informação essencial para identificação de sua fonte, a proveniência de minerais detríticos deve ser buscada a partir da integração de diversos dados, incluindo a composição química de elementos maiores e traços dos minerais detríticos presentes.

Tanto os minerais detríticos leves como os pesados podem dar indicação de sua proveniência. O quartzo, por ser o mineral mais comum em sedimentos tamanho areia, é objeto de muitos dos estudos visando à determinação da relação entre tipos de quartzo e possíveis rochas fontes. Uma das primeiras tentativas neste sentido foi a de Mackie, 1896 (*apud* Petijohn, 1975), que usou as inclusões no quartzo como um guia de proveniência e a de Krynine, 1940 (*apud* Petijohn, 1975), que classificou o quartzo ígneo - incluindo plutônico, vulcânico e hidrotermal, o metamórfico - incluindo quartzo de pressão e injeção, e o sedimentar - que pode ter crescimento autigênico ou preencher

veios. Vollbrecht *et al.* (2002) investigaram a proveniência dos conglomerados auríferos de Witwatersrand a partir da microestrutura dos grãos de quartzo detrítico.

O feldspato também é um mineral muito comum em sedimentos tamanho areia. Rimsaite, 1967 (*apud* Petijohn, 1975) utilizou os diferentes tipos de feldspato como guia de proveniência, assumindo a sanidina como o feldspato originário de rochas vulcânicas ácidas, e o ortoclásio ou o microclínio como oriundos de rochas plutônicas ácidas. O feldspato perítico, com proporções de albita/feldspato potássico superior a 0,2 é indicativo de fonte primeira intermediária ou ácida, plutônica e de afinidade alcalina. Os feldspatos de origem piroclástica tendem a formas euédricas, comumente quebradas e, em alguns casos, mostram um fino recobrimento vítreo. Os grãos de plagioclásio de rochas vulcânicas e plutônicas de menor profundidade se diferenciam daqueles de rochas plutônicas de maior profundidade e metamórficas pela presença comum de zonações composicionais oscilatórias (Pittman, 1963).

Os microfragmentos de rochas dão informações importantes para a determinação da sua proveniência (Boggs, 1968). Dickinson (1970) classifica os vários tipos de fragmentos de rochas presentes nas areias com base na textura. Esta classificação incluiu partículas de origem vulcânica, clástica, tectônica e microgranular. Dickinson *et al.* (1983) utilizam a classificação dos sedimentos com base em seu conteúdo de quartzo, feldspatos e tipos de fragmentos para identificar os principais ambientes tectônicos de onde provêm.

Os minerais detríticos, particularmente os pesados, desde os estudos de Boswell, 1933 (*apud* Petijohn, 1975), vêm sendo usados como elementos chave para a identificação da natureza da rocha fonte. Feições variadas, como inclusões, cor e forma servem como guias para determinar o tipo de rocha fonte. Krynine (1946) utilizando a turmalina e Tyler *et al.*, 1940 (*apud* Petijohn, 1975) e Vitanage (1957) identificando tipos de grãos de zircão, utilizaram-os como guias de proveniência.

Petijohn (1975) enfatizou a importância da utilização de suítes de minerais para caracterizar diferentes tipos de rochas fontes, sugerindo conjuntos de minerais que seriam típicos de sedimentos retrabalhados, de fontes metamórficas de baixo ou alto grau, de fontes ígneas ácidas ou básicas e da presença de pegmatitos na fonte primeira.

Determinações de idade dos grãos minerais detríticos têm recentemente sido utilizadas em estudos de proveniência, sendo três as principais técnicas correntemente utilizadas: datação por traço de fissão, datação U – Pb de zircão,

monazita e titanita e datação por sonda a laser de argônio de micas e anfibólios detríticos (Haughton *et al.*, 1991, Catalán *et al.*, 2004, Geherels *et al.*, 2003).

Atualmente, a química mineral é uma importante ferramenta nos estudos de proveniência. As análises químicas dos grãos minerais podem ser obtidas por microsonda eletrônica e a maioria das espécies de minerais detríticos mostra diversidade suficiente para permitir que as mesmas sejam amplamente utilizadas em pesquisas desta natureza (Morton, 1991). Análises de elementos traços por microsonda iônica, espectrometria de massa por plasma (LA ICP-MS) com canhão LASER e microscopia eletrônica de varredura são técnicas complementares amplamente utilizadas em estudos de proveniência, permitindo que um considerável número de espécies de minerais pesados seja empregado para este fim. Assim, análises geoquímicas em um único grão mineral podem não só auxiliar na identificação de proveniência, a partir das variações composicionais detectadas nos grãos minerais, como também adicionar um considerável grau de sofisticação na sua determinação (Morton, 1991).

Materiais e métodos

Em abril de 2002, ao longo do litoral médio e norte do Rio Grande do Sul – de São José do Norte a Torres –, numa extensão de 340 km, foram coletadas 11 amostras de areia a cada 40km. Estas amostras, com em torno de 1 kg, foram retiradas da face de praia. Em laboratório, foram lavadas, para a retirada do sal, secas em estufa a 50°C e, posteriormente, quarteadas com 70-90g. A parte quarteada foi separada em intervalo de 1φ. Cada intervalo foi pesado em balança de precisão e submetido à separação dos minerais pesados com bromorfômio ($d=2,83\text{g/cm}^3$). A maior quantidade de minerais pesados encontra-se no intervalo $\phi=4,00-3,25$ (areia muito fina), razão pela qual este foi o intervalo analisado. Os minerais magnéticos (magnetita) foram separados com um ímã de mão. A fração menos magnética foi levada ao separador isomagnético Frantz para a separação de frações em diferentes intervalos de susceptibilidade magnética, utilizando-se amperagens diversas. Em cada intervalo, em lupa binocular, foram descritos e separados manualmente os diferentes minerais. As suítes de minerais selecionados foram preparadas em pastilhas para análises químicas, por microsonda eletrônica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e LA-ICP-MS (Espectrometria

de massa de plasma acoplado indutivamente com canhão de laser), visando caracterizar as espécies minerais presentes e suas variações composicionais.

Os minerais selecionados para ênfase nos estudos químicos são: zircão, piroxênio, epidoto, anfibólio, granada e turmalina.

Nos zircões, foram determinados os teores de Si, Zr, Hf, Y, U, Pb, Th, Nb, Ta, P e ETR. Nos outros minerais – piroxênio, epidoto, anfibólio, granada e turmalina – foram analisados os teores de Si, Ti, Al, Cr, Mg, Ca, Mn, Fe, Ni, Ba, Na, K e F.

As determinações de elementos maiores e dos traços mais abundantes foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do CPGq/IG/UFRGS e IG/USP, enquanto os elementos traço dos zircões foram determinados nos laboratórios da Universidade de Kingston, Surrey, Inglaterra, em LA-ICP-MS (Espectrometria de massa de plasma acoplado indutivamente com canhão de laser).

Sumário integrador

A composição química de minerais detríticos em sedimentos é uma poderosa ferramenta nos estudos de proveniência, particularmente nas últimas décadas devido a utilização de microsonda eletrônica e iônica, microscopia eletrônica, e espectrometria de massa com ICP e canhão LASER para análises de grãos minerais, que adicionaram precisão e requinte às determinações composicionais de espécies minerais. Estes estudos em grãos detríticos têm um importante papel na determinação da origem dos grãos analisados, embora não possam indicar clara e diretamente o quanto os grãos foram reciclados (Morton, 1991). O conteúdo de elementos maiores e traços de minerais ígneos ou metamórficos podem revelar as características de suas fontes originais, principalmente com respeito a afinidade geoquímica, ambiente tectônico e parâmetro físicos que controlam a cristalização mineral.

O conteúdo dos elementos traços das areias de praias holocênicas do sul do Brasil foram investigados a fim de discutir suas prováveis fonte primária.

Ao longo do litoral médio e norte do Rio Grande do Sul (Fig. 1), numa extensão de 340km, foram coletadas 11 amostras de areia a cada 40km. O conteúdo dos elementos traços destas areias foram investigados a fim de discutir suas prováveis fontes primárias. Os grãos de zircão foram separados e analisados por LA ICP MS para ETR,

Nb, U, Th, Y, Hf e Ta e por microsonda eletrônica e MEV para Si, Zr e P. No litoral norte, também foram estudados piroxênios, epidotos, anfibólios, granadas e turmalinas e as análises foram feitas para os principais componentes químicos com microsonda eletrônica.

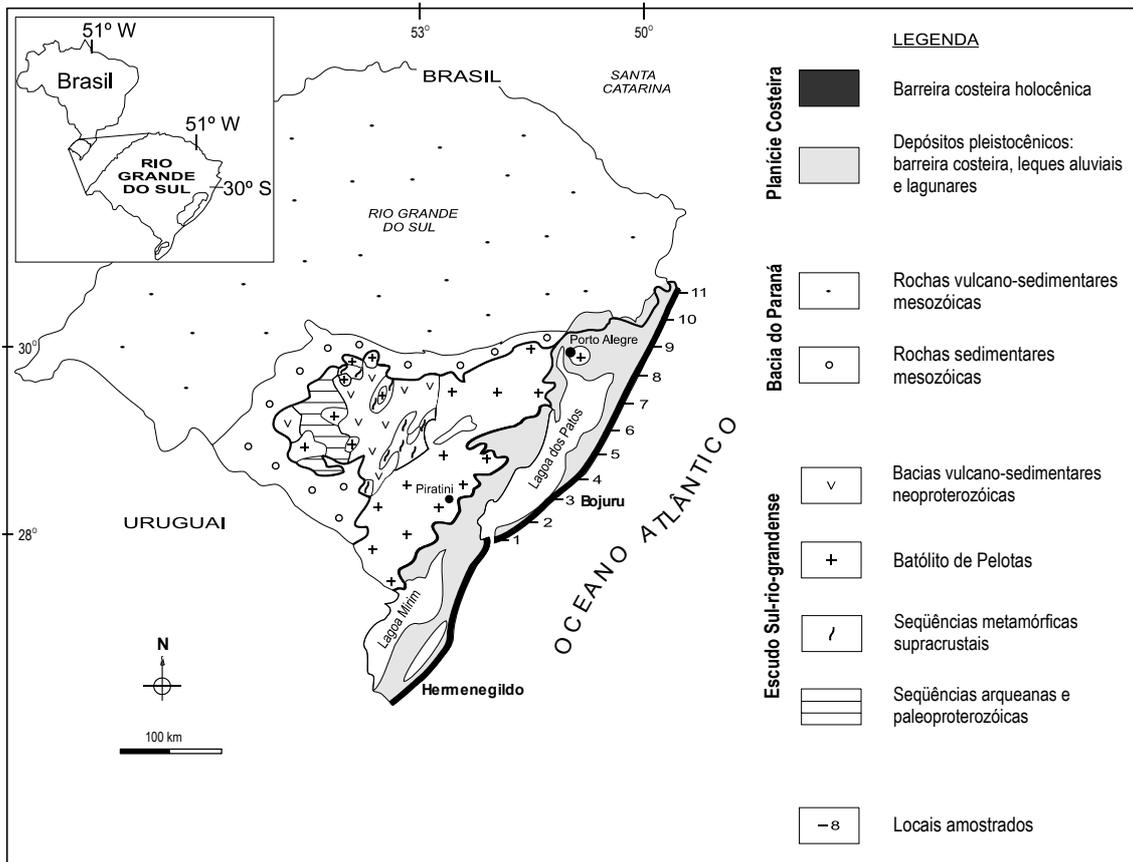


Figura 1: Mapa da Planície Costeira do Rio Grande do Sul e a localização das amostras.

As potenciais fontes primárias, para os zircões detríticos do litoral médio e norte do Rio Grande do Sul, foi determinada com base principalmente nas razões Th/U, Y/Ho, Nb/Ta e nos conteúdos de Nb e elementos terras raras, utilizando adicionalmente os parâmetros sugeridos por Belousova et al (2002). Os zircões detríticos estudados provêm de associações de rochas graníticas subalcalinas a alcalinas do tipo A, com rochas máficas associadas e de associações metamórficas de alto grau. Os zircões metamórficos são mais abundantes na parte sul do segmento litorâneo amostrado, enquanto na porção norte, predominam os zircões de granitóides do tipo A.

Os outros minerais – piroxênio, epidoto, anfibólio, granada e turmalina – foram analisados somente para o litoral norte do estado do Rio Grande do Sul e permitiram sugerir a área fonte potencial para estes sedimentos. A composição dos

piroxênios indica fontes metamórficas de alto grau e rochas básicas relacionadas com fontes similares às de arcos magmáticos, como as do magmatismo pós-colisional Neoproterozóico do sul do Brasil. Rochas metamórficas metapelíticas e margosas de fácies granulito são fontes importantes e tem sua participação indicada pela estauroлита, rutilo, silicatos de alumínio - cianita e silimanita, granadas ricas em componente almandina e grossulária, turmalinas enriquecidas em Ca e cumingtonita presentes em praticamente todas amostras estudadas. Granitóides do tipo A, semelhantes aos descritos na Suíte Encruzilhada do Sul (Philipp et al 2002) são fontes também importantes, indicadas pela presença de zircões com alto teor de Nb e ETR e razões Nb/Ta superiores a 20, e anfibólios com alta razão Fe/Mg. Granitóides peraluminosos semelhantes aos da Suíte Cordilheira têm sua presença nas áreas fontes indicadas por: granada rica em espessartina e turmalina rica em ferro, enquanto granitóides shoshoníticos e subalcalinos médio e alto-K, como os descritos por Philipp et al (2002) no Batólito Pelotas tem sua participação sugerida pela presença de epidoto magmático, titanita, anfibólios cálcicos com razões Fe/Mg moderadas e zircões com razões Th/U de 0,3 a 0,5 e Nb/Ta entre 5 e 15. Rochas hidrotermalizadas e ultramáficas são também constituintes das áreas fontes e tem sua presença apontada por turmalinas com Li, actinolita e anfibólios magnesianos.

A distribuição relativamente uniforme dos minerais detríticos estudados em todas amostras coletadas indica uma área fonte comum para os sedimentos do litoral norte, embora possa haver o predomínio local de fontes como por exemplo, as hidrotermalizadas próximas a amostra sete (centro da área estudada). O extremo nordeste do Batólito Pelotas, constituído predominantemente pelas suites Encruzilhada do Sul, Cordilheira e greisens associados, Viamão e Dom Feliciano (Philipp et al 2002) e pelo Complexo Várzea do Capivarita (Fernandes et al 1990) é a provável área fonte dos sedimentos estudados, fonte potencial dos minerais identificados.

Referências bibliográficas

Barros, C.E.; Nardi, L.V.S. & Dillenburg, S.R. 2005. Geoquímica de Minerais Detríticos em Estudos de Proveniência: Uma Revisão. **Pesquisas em Geociências**, **32**(1):03-15.

- Belousova, E.A.; Griffen, W.L.; O'Reilly, S.Y. & Fisher, N.I. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator on source rock type. **Contribution Mineral Petrology**, **143**:602-622.
- Boggs, S. Jr. 1968. Experimental study of rock particles. **Journal of Sedimentary and Petrology**, **38**:1326-1339.
- Catalán, J.R.M., Fernández-Suárez, J., Jenner, G.A., Belousova, E.A. & Montes, A. 2004. Provenance constraints from detrital zircon U-Pb ages in the NW Iberian Massif: implications for Paleozoic plate configuration and Variscan evolution. **Journal of the Geological Society**, **161**(3):463-476.
- Dickinson, W.R.; Beard, L.S.; Brakenridge, G.R.; Erjavec, J.L.; Ferguson, R.C.; Inman, K. F.; Knepp, R.A.; Lindberg, F.A. & Ryberg. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. **Geological Society of America Bulletin**, **94**:222-235.
- Fernandes, L.A.D.; Tommasi, A. & Porcher, C.C. 1990. Esboço estrutural de parte do Batólito de Pelotas - região de Quitéria-Capivarita. **Acta Geologica Leopoldensia**, **13**:117-138.
- Gehrels, G.E., 2003. Detrital zircon constraints on sediment dispersal patterns in Western North America. Seattle Annual Meeting, Washington, Paper n. 159-2. Disponível em: <http://gsa.confex.com/gsa/2003AM/finalprogram/abstract60016.htm>
Acesso em: 23 jan. 2004.
- Krynine, P.D. 1946. The tourmaline group in sediments. **Journal of Geology**, **54**:65-87.
- Morton, A.C. 1991. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to orivenance research. In: Morton, A.C.; Todd, S.P.; Haughton, P.D.W. (eds.) **Developments in Sedimentary Provenance Studies**. UK. p. 31-45. (Geological Society special publication, 57)
- Pettijohn, F.J. 1975. **Sedimentary Rocks**. New York: Harper e How. 628 p.
- Philipp,R.P., Machado, R., Nardi, L.V.S. & Lafon, J.M. 2002. O magmatismo granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. **Revista Brasileira de Geociências**, **32**(2):277-290.
- Vitanage, P.W. 1957. Studies of zircon types in the Ceylon pre-Cambrian complex. **Journal of Geology**, **65**:117-128.

CAPÍTULO 2

GEOQUÍMICA DE MINERAIS DETRÍTICOS EM ESTUDOS DE PROVENIÊNCIA: UMA REVISÃO

CARLA ENNES DE BARROS, LAURO VALENTIM STOLL NARDI
& SERGIO REBELLO DILLENBURG

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
Caixa Postal 15044, CEP 91509-900. e-mail: carla.barros@ufrgs.br

(Recebido em 12/04. Aceito para publicação em 03/05)

Abstract - The chemical composition of detrital minerals in sediments has become a powerful tool for provenance studies, particularly in the last decades with the improvement of analytical techniques for mineral grains. Major and trace element contents of igneous and metamorphic minerals can reveal the characteristics of their original sources, mainly with respect to their geochemical affinity, geotectonic setting and the physical parameters that controlled their crystallization. The proportions of major elements in pyroxenes and amphiboles can be used for the identification of their igneous or metamorphic origin, for the definition of their magmatic affiliation, and for the discussion of the probable tectonic setting where they were generated. Metamorphic and igneous zircons can be distinguished by REE patterns or U and Th contents. Magmatic zircons from different geotectonic settings can show different concentrations of REE, Nb, Hf and Y. Magmatic garnets from granites typically show high Mn contents, and can be distinguished from metamorphic ones or from garnets of ultramafic rocks mainly through their major element composition. Compositional zoning of garnets are indicative of their metamorphic or igneous character. Magmatic, metamorphic and hydrothermal epidotes can be distinguished by their chemical composition, as well. Several other minerals, such as apatite, tourmaline, rutile, titanite, and feldspars can indicate, through their chemical composition, the probable rock that could have produced them. The integration of geochemical data on detrital minerals with other usual tools of sedimentary petrology is certainly the most efficient approach for investigating the provenance of sediments.

Keywords - detrital mineral chemistry, provenance, mineral chemistry, sedimentary detrital minerals

Introdução

O termo proveniência, do latim *provenire*, significa ter origem, derivar, proceder. Refere-se às fontes das quais os materiais detríticos sedimentares foram derivados. Cada tipo de rocha tende a apresentar uma assembléia distinta de minerais que lhe é característica (Pettijohn, 1975).

A composição da assembléia de minerais detríticos não é controlada somente pela composição mineralógica da rocha fonte. Processos operantes no ciclo sedimentar, tais como seleção física, abrasão mecânica e dissolução são também determinantes das assembléias de minerais detríticos. A seleção física é o resultado dos fatores hidrodinâmicos que operam durante o transporte e deposição, controlando a abundância absoluta e relativa dos minerais detríticos. A abrasão mecânica ocorre durante o transporte e causa diminuição no tamanho dos grãos, por uma combinação de fraturamento e arredondamento, e a dissolução causa perda total ou parcial dos minerais detríticos submetidos a variações de condições geoquímicas nos vários estágios do ciclo sedimentar, como o intemperismo: na rocha fonte, durante a exposição sub-aérea e soterramento e nas próprias rochas sedimentares, quando expostas (Morton & Hallsworth, 1999).

Muitas fontes e vários ciclos sedimentares podem estar envolvidos nos processos geradores de sedimentos. Isto dificulta a identificação e distinção das fontes primárias e imediatas, isto é, as geradoras dos minerais detríticos, em geral ígneas e metamórficas, e as de última origem destes minerais, respectivamente. Embora um único grão mineral possa conter a informação essencial para identificação de sua fonte, a proveniência de minerais detríticos deve ser buscada a partir da integração de diversos dados, incluindo a composição química de elementos maiores e traços dos minerais detríticos presentes.

Tanto os minerais detríticos leves como os pesados podem dar indicação de sua proveniência. O quartzo, por ser o mineral mais comum em sedimentos tamanho areia, é objeto de muitos dos estudos visando à determinação da relação entre tipos de quartzo e possíveis rochas fontes. Uma das primeiras tentativas neste sentido foi a de Mackie, 1896 (*apud* Pettijohn, 1975), que usou as inclusões no quartzo como um guia de proveniência e a de Krynine, 1940 (*apud* Pettijohn, 1975), que classificou o quartzo ígneo - incluindo plutônico, vulcânico e hidrotermal, o metamórfico - incluindo quartzo

de pressão e injeção, e o sedimentar - que pode ter crescimento autigênico ou preencher veios. Vollbrecht *et al.* (2002) investigaram a proveniência dos conglomerados auríferos de Witwatersrand a partir da microestrutura dos grãos de quartzo detrítico.

O feldspato também é um mineral muito comum em sedimentos tamanho areia. Rimsaite, 1967 (*apud* Pettijohn, 1975) utilizou o feldspato como guia de proveniência, assumindo a sanidina como o feldspato originário de rochas vulcânicas ácidas, e o ortoclásio ou o microclínio como oriundos de rochas plutônicas ácidas. O feldspato pertítico, com proporções de albita/feldspato potássico superior a 0,2, é indicativo de fonte primária intermediária ou ácida, plutônica e de afinidade alcalina. Feldspatos pertíticos, em geral, indicam fontes plutônicas. Os feldspatos de origem piroclástica tendem a formas euédricas, comumente quebradas e, em alguns casos, mostram um fino recobrimento vítreo. Os grãos de plagioclásio de rochas vulcânicas e plutônicas de menor profundidade se diferenciam daqueles de rochas plutônicas de maior profundidade e metamórficas pela presença comum de zoneamento composicionais oscilatórias (Pittman, 1963).

Os fragmentos de rochas dão informações importantes para a determinação da sua proveniência. Dickinson (1970) classifica os vários tipos de fragmentos de rochas presentes nas areias com base na textura. Esta classificação incluiu partículas de origem vulcânica, clástica, tectônica e microgranular. Fragmentos vulcânicos têm, em geral, textura ígnea afanítica e incluem partículas de rochas vulcânicas alteradas ou recristalizadas; os fragmentos tectônicos mostram xistosidade ou fábricas de semixistosidade e os fragmentos de rocha microgranular são aproximadamente equidimensionais e bem classificados. Dickinson *et al.* (1983) utilizam a classificação das rochas sedimentares com base em seu conteúdo de quartzo, feldspatos e tipos de fragmentos para identificar os principais ambientes tectônicos de onde provêm.

Os minerais detríticos, particularmente os pesados, desde os estudos de Milner, 1926 (*apud* Pettijohn *et al.*, 1973) e Boswell, 1933 (*apud* Pettijohn, 1975), vêm sendo usados como elementos chave para a identificação da natureza da rocha fonte. Feições variadas, como inclusões, cor e forma, servem como guias para determinar o tipo de rocha fonte. Krynine (1946) utilizando a turmalina e Tyler *et al.*, 1940 (*apud* Pettijohn, 1975), Vitanage (1957), Poldervaart, 1955 e 1956 (*apud* Pettijohn *et al.*, 1973) e Tomita, 1954 (*apud* Pettijohn *et al.*, 1973) identificando tipos de grãos de zircão, utilizaram-os como guias de proveniência.

Pettijohn (1975) enfatizou a importância da utilização de suítes de minerais para caracterizar diferentes tipos de rochas fontes, sugerindo conjuntos de minerais que seriam típicos de sedimentos retrabalhados, de fontes metamórficas de baixo ou alto grau, de fontes ígneas ácidas ou básicas e da presença de pegmatitos na fonte primária.

Determinações de idade dos grãos minerais detríticos têm recentemente sido utilizadas em estudos de proveniência, sendo três as principais técnicas correntemente utilizadas: datação por traço de fissão, datação U – Pb de zircão, monazita e titanita e datação por sonda a laser de argônio (^{40}Ar - ^{39}Ar) de micas e anfibólios detríticos (Haughton *et al.*, 1991; Catalán *et al.*, 2004; Gehrels *et al.*, 2003).

Atualmente, a geoquímica mineral é uma importante ferramenta nos estudos de proveniência, principalmente nos minerais pesados, pois a maioria destes mostra variações composicionais que permitem a identificação de sua fonte, particularmente quando esta informação é integrada com as demais.

Utilização da geoquímica mineral na pesquisa de proveniência

As análises de grãos minerais podem ser realizadas por microsonda eletrônica e a maioria das espécies de minerais detríticos mostra diversidade suficiente para permitir que as mesmas sejam amplamente utilizadas em pesquisas desta natureza (Morton, 1991). Análises de elementos traços e isótopos por microsonda iônica, espectrometria de massa por plasma (LA ICP-MS) com canhão LASER e microscopia eletrônica de varredura são técnicas complementares amplamente utilizadas em estudos de proveniência, permitindo que um considerável número de espécies de minerais pesados seja empregado para este fim. Assim, análises geoquímicas em um único grão mineral podem não só auxiliar na identificação de proveniência, a partir das variações composicionais detectadas nos grãos minerais, como também adicionar um considerável grau de sofisticação na sua determinação (Morton, 1991).

A seguir é discutida a utilização dos principais minerais detríticos em estudos de proveniência, tendo por base a sua composição química.

Zircão

O zircão é um mineral de elevada resistência aos processos físicos e químicos naturais, sendo freqüente entre os minerais detríticos resistidos da maior parte dos depósitos sedimentares. O zircão resiste também a transformações de alta temperatura como as hidrotermais e metamórficas. É comum encontrar cristais remanescentes de zircão metamórfico em rochas magmáticas produzidas pela anatexia. A baixa velocidade de difusão intracristalina dos íons na estrutura do zircão (Cherniak *et al.*, 1997) favorece a preservação de sua composição química e isotópica durante a maior parte dos processos geológicos. Rochas graníticas freqüentemente mostram cristais de zircão com idades anteriores a de sua cristalização magmática, provenientes das encaixantes parcialmente assimiladas ou de seu protólito metamórfico. Essas propriedades fazem do zircão um mineral de grande importância em estudos de proveniência e geocronologia, conforme discutido por vários autores (e.g. Belousova *et al.*, 2002; Rubatto & Hermann, 2003).

As propriedades ópticas do zircão têm sido utilizadas freqüentemente na identificação de proveniência de sedimentos. Pupin (1980) e Sturm (2004) relacionam a geometria das faces de crescimento dos cristais de zircão ígneo com o quimismo do magma gerador de sua rocha hospedeira, afirmando que o tipo de crescimento dos cristais revela a origem de sua rocha hospedeira. Hoskin & Black (2000) registram que zircões metamórficos em geral possuem terminações arredondadas e aqueles de rochas de alto grau tendem a formas ovóides, enquanto os ígneos são usualmente euédricos, com forte zoneamento composicional.

O zircão pode ser visto como produto intermediário de uma solução sólida de silicatos de Zr e Hf, onde predomina amplamente o primeiro (Ahrens & Erlank, 1969). As principais características geoquímicas utilizadas na identificação de suas possíveis fontes são relacionadas aos teores de Hf, ETR (Elementos Terras Raras), U, Th, Nb e Y.

Zircões metamórficos e ígneos são distinguidos principalmente pelas razões Th/U menores que 0,1 nos primeiros (Hoskin & Black, 2000; Rubatto, 2002), pelas anomalias positivas de Ce nos padrões de ETR e forte empobrecimento dos teores de ETRL (Elementos Terras Raras Leves), Pb e Th dos segundos (Hoskin & Black, 2000; Cornell & Hegardt, 2003; Rubatto & Herrmann, 2003).

A proporção de Zr e Hf varia nos zircões ígneos, embora predominem valores similares aos condriticos (Bau, 1996). Pupin (2000) constata que concentrações de HfO₂ superiores a dois por cento em zircões são raras e restritas a pegmatitos. Razões

Zr/Hf de zircões da crosta continental variam em torno de 36-45 e nos mantélicos de 60 a 68. Zircões magmáticos de granitos intraplaca (anorogênicos) têm razões superiores a 60 e os orogênicos (cálcio-alcálicos) e de anatexia inferior a 60. Zircões de sienitos nefelínicos têm razões de 73 a 135 (Pupin, 2000).

Heaman *et al.* (1990) observaram que zircões cristalizados de magmas composicionalmente distintos possuem características químicas diferentes, assim zircões de magmas alcalinos sub-saturados em sílica tem baixo teor de Hf (6.000-8.000 ppm) e razões Zr/Hf superiores a 60. Pupin (2000), com base nos conteúdos de Y e Hf, identificou zircões de granitóides de diferentes ambientes tectônicos ou associações magmáticas. Assim, são distinguidos zircões provenientes de granitóides toleíticos (com baixos conteúdos de Hf e altos de Y), de associações alcalinas sienito-granito (baixo Hf e médio a alto Y), de granitóides cálcio-alcálicos (médio Hf e baixo Y) e de granitos de anatexia-migmatitos (alto Hf e baixo Y).

Heaman *et al.* (1990) observaram que zircões de kimberlitos possuem teores de U e Th inferiores a 30 e 10 ppm, respectivamente, e zircões de magmas máficos possuem alta razão Th/U (>1) em relação aos demais zircões ígneos. Com relação ao U e Th, Belousova *et al.* (2002) reportam uma variação muito grande no conteúdo destes elementos em zircões, com intervalos que vão de 0,1 ppm até valores acima de 1% para o U e de 1 ppm a 1% para o Th. Baixos valores de 6-60ppm de U e 2-15ppm são característicos de zircões kimberlíticos, ao contrário dos zircões de rochas granitóides e de pegmatitos que contêm altos conteúdos destes elementos.

Em geral, zircões mantélicos contêm menos que 60ppm de U, enquanto que zircões crustais apresentam uma média 300ppm de U (Duddy & Kelly, 1999).

O conteúdo normal de Pb em zircões varia de 2 a 30ppm, sendo os valores abaixo de 1-2ppm típicos de zircões de kimberlitos e de basáltos. A presença de altos valores de Pb reflete o decaimento radiométrico do U e Th, e altas concentrações de Pb (acima de 100ppm) são encontradas somente em grãos metamáficos extremamente enriquecidos em U e Th (Belousova *et al.*, 2002). As concentrações de Ti são geralmente inferiores a 6ppm em zircões de kimberlitos e rochas máficas, entretanto, nos zircões de granitos e sienitos podem atingir 500 a 700 ppm (Belousova *et al.*, 2002).

No diagrama UO_2 versus Th/U, são identificados campos de zircões gerados em rochas graníticas, metamórficas, máficas e kimberlíticas (Fig. 1).

Concentrações de Ta e Nb variam de 0,2 a 21ppm para Ta e de 0,4 a 120ppm para o Nb. Os teores mais elevados de Ta e Nb são esperados em zircões de

rochas graníticas de ambientes anorogênicos, devido ao teor maior de Ta e Nb dos magmas produzidos neste ambiente. A razão Nb/Ta do zircão oscila entre 0,3 a 48, com uma média de 3, sendo fortemente correlacionada com o teor de Y e ETRP (Elementos Terras Raras Pesadas). As mais altas razões são encontradas em zircões de pegmatitos sieníticos, de nefelina – sienitos e de alguns granitóides (Belousova *et al.*, 2002).

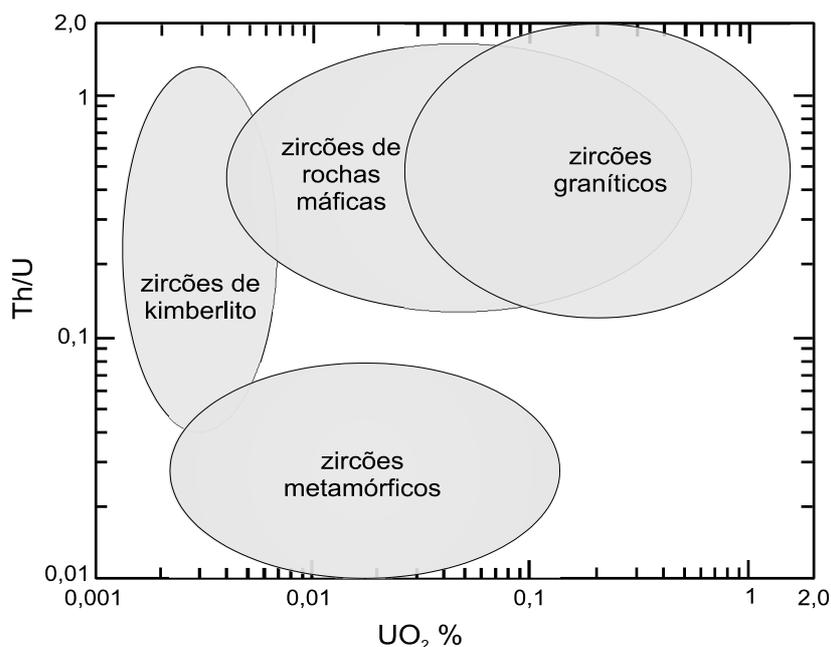


Figura 1- Classificação de zircões de proveniências diversas, a partir dos dados de Belousova *et al.* (2002), Duddy & Kelly (1999) e Heaman *et al.* (1990).

Os elementos terras raras mostram concentrações significativas no zircão, particularmente os elementos terras raras pesados, devido a maior similaridade de raios iônicos. O Yb e Lu mostram concentrações até algumas centenas de vezes maiores que a dos líquidos a partir dos quais o zircão formou (Thomas *et al.*, 2002). Baixos valores de ETR (Σ ETR 90-480 ppm) são típicos em zircões de rochas máficas e concentrações mais baixas (menor que 50ppm) são características de zircões kimberlíticos (Belousova *et al.*, 2002). Hoskin & Ireland (2000) criticam a utilização de padrões de ETR em zircões como efetivos indicadores em estudos de proveniência, argumentando que sua utilização exige um conhecimento detalhado da geoquímica de rochas e minerais das possíveis fontes. Podemos, no entanto, salientar algumas características dos padrões de ETR normalizados pelos valores condríticos passíveis de utilização: intensidade das anomalias positivas de Ce, conteúdo global de ETR, fracionamento de ETR pesadas e leves e anomalias de Eu, além de razões Sm/Nd, Yb/Lu e Ho/Yb entre outras. Rubatto

(2002) relaciona os conteúdos de ETR em zircões metamórficos com o grau de metamorfismo da rocha que os contém.

Belousova *et al.* (2002) sugerem uma chave binária, definida pela razão das concentrações ou teores de Lu, Ta, U, Hf, Ce/Ce* (anomalias de Ce) e Nb, para identificação das fontes primárias de zircão detrítico. Discriminam assim zircões gerados em kimberlitos, de carbonatitos, de rochas máficas (diabásio + basalto), de rochas sieníticas (sienitos + larvikitos) e de Ne-sienitos pegmatitos, com uma probabilidade de acerto superior a 80%. Zircões de granitóides, em geral, são reconhecidos com uma probabilidade superior a 75%.

Piroxênio

O uso de piroxênio como indicador de proveniência é severamente limitado pela sua instabilidade. Ele é rapidamente corroído e dissolvido em temperaturas relativamente baixas por fluidos intersticiais, aparecendo raramente em assembléias de minerais pesados em arenitos porosos, mesmo em profundidade de soterramento moderada (Morton, 1984). Muitos grãos de piroxênio em amostras de sedimentos de fundo oceânico são dissolvidos mesmo em temperatura ambiente. Contudo, em arenitos com baixa porosidade, o piroxênio é freqüentemente preservado como nos dois casos das sucessões clásticas referidas por Morton (1984).

A composição dos piroxênios ígneos tem relação com a afinidade química do magmatismo que o produziu e, conseqüentemente, com seu ambiente tectônico e fontes magmáticas (Fig. 2). Assim o magmatismo toleítico continental, exemplificado pela Formação Serra Geral, no sul do Brasil, mostra piroxênios que são classificados como alto Ca (augita) e baixo Ca (pigeonita) (Wilson, 1989). Já o magmatismo pós-colisional neoproterozóico de afinidade ultrapotássica e potássica ou shoshonítica (Lima & Nardi, 1998; Barros & Nardi, 1994; Plá Cid *et al.*, 2000) apresenta principalmente diopsídio, enquanto o magmatismo alcalino sódico pode conter hedenbergita, augita titanífera ou piroxênio sódico. Associações de rochas básicas e intermediárias de arcos magmáticos geralmente apresentam augita e ortopiroxênio (Wilson, 1989).

Hiperstênio é mineral característico de rochas metamórficas da fácies granulito, que podem também apresentar diopsídio ou augita. Embora o hiperstênio se assemelhe composicionalmente a pigeonita, pode ser distinguido da mesma pelas propriedades ópticas.

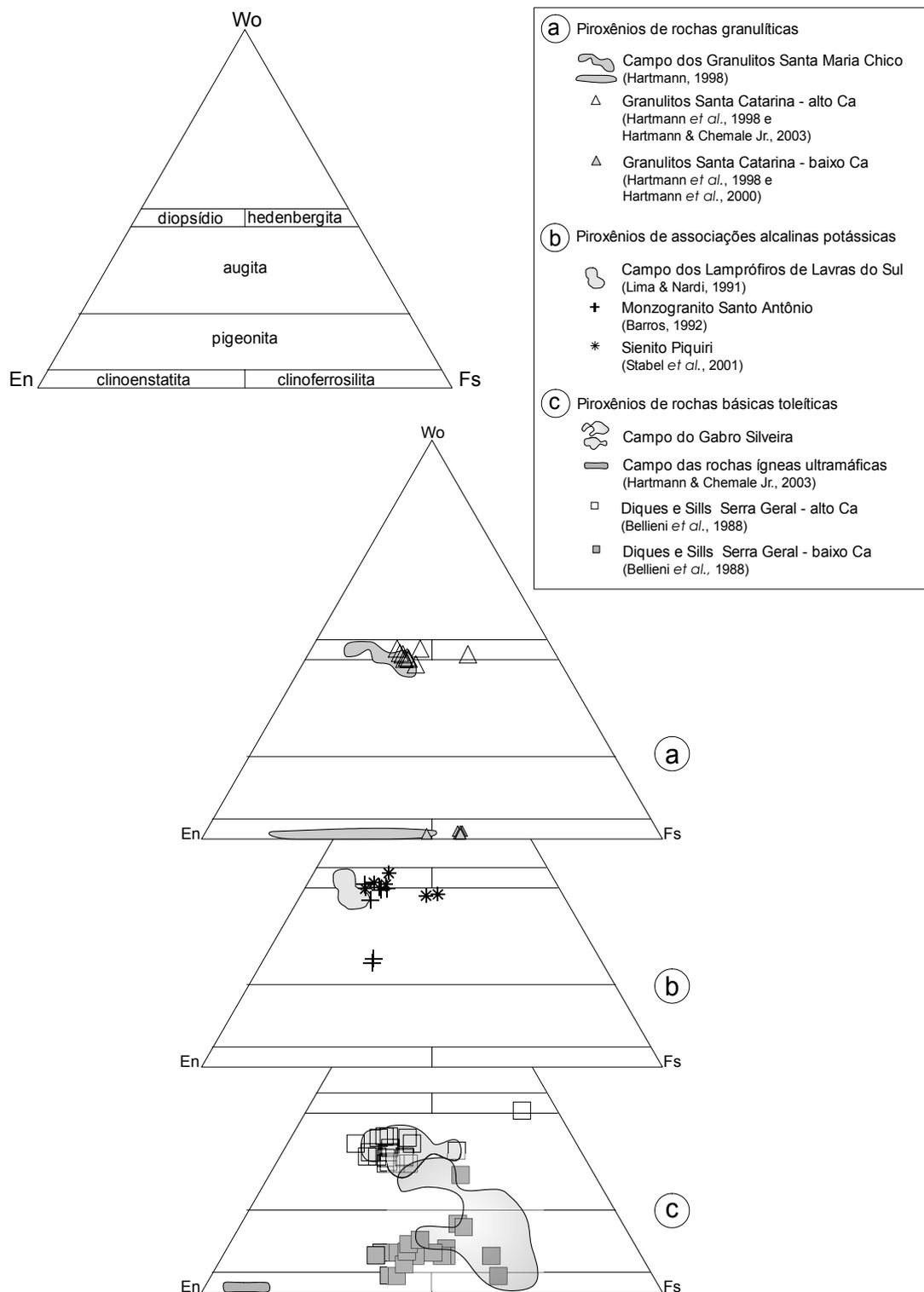


Figura 2- Classificação dos piroxênios (Morimoto *et al.* 1988) de rochas ígneas de diferentes ambientes tectônicos. Wo – Wollastonita; En – Enstatita; Fs - Ferrosilita

Leterrier *et al.* (1982) sugeriram que a determinação e a distinção da proveniência de piroxênios são possíveis pela análise dos conteúdos de Ca, Ti, Cr, Na e

Al, conforme ilustrado nos diagramas da figura 3, desenvolvidos para discriminar o ambiente tectônico de rochas basálticas alteradas. O esquema sugerido por Leterrier *et al.* (1982) abrange três estágios. No primeiro (Fig. 3a), piroxênios provenientes de fontes toleíticas e alcalinas são distinguidos pelos teores de Ti e (Ca+Na). No diagrama (Ti+Cr) *versus* Ca (Fig. 3b), piroxênios de associações ígneas anorogênicas e orogênicas são discriminados. O terceiro diagrama (Fig. 3c) permite a distinção de piroxênios de associações cálcio-alcalinas e toleíticas. Com base nesses critérios geoquímicos, Styles *et al.* (1989) reconheceram a afinidade cálcio-alcalina dos piroxênios de Portpatrick (terras altas ao sul da Escócia).

Nisbet & Pearce (1977) e Krawinkel *et al.* (1999) utilizam parâmetros químicos calculados com base nos teores de SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO, MnO, MgO, CaO, Na₂O para identificar os ambientes geotectônicos onde clinopiroxênios seriam gerados, concluindo assim quanto a sua proveniência primária (Fig. 4).

A proveniência do piroxênio também pode ser discutida a partir de seus conteúdos de Ti, Na e Mn (Nisbet & Pearce, 1977). Este método, inicialmente desenvolvido para investigar produtos da alteração de basaltos, tem sido aplicado com sucesso em estudos de proveniência Morton (1991). Por ser um potencial concentrador de Cr, piroxênios ígneos de rochas básicas e ultrabásicas tendem a possuir alto conteúdo deste elemento, ao contrário dos formados em magmas intermediários e ácidos. Pinto *et al.* (2004) discutem a proveniência de arenitos da Depressão Central e Altiplano dos Andes Centrais, utilizando a composição química de orto e clinopiroxênio, conjuntamente com a geoquímica de rocha total e da assembléia de minerais detríticos, concluindo que as fontes dos mesmos são as suítes vulcânicas das cordilheiras leste e oeste dos Andes Centrais.

Anfibólio

A geoquímica do anfibólio é complexa, com o grupo mostrando um amplo intervalo de composições, que em alguns casos se traduzem em mudanças nas propriedades ópticas. De modo geral, em estudos de proveniência, anfibólios verdes (cálcicos) são geralmente chamados de hornblenda e os anfibólios azuis (sódicos) de glaucofânio. A determinação da composição química do grão permite precisar tais identificações, sendo altamente relevante em estudos de proveniência, uma vez que o vasto espectro composicional dos anfibólios reflete uma grande variedade de fontes (Morton, 1991).

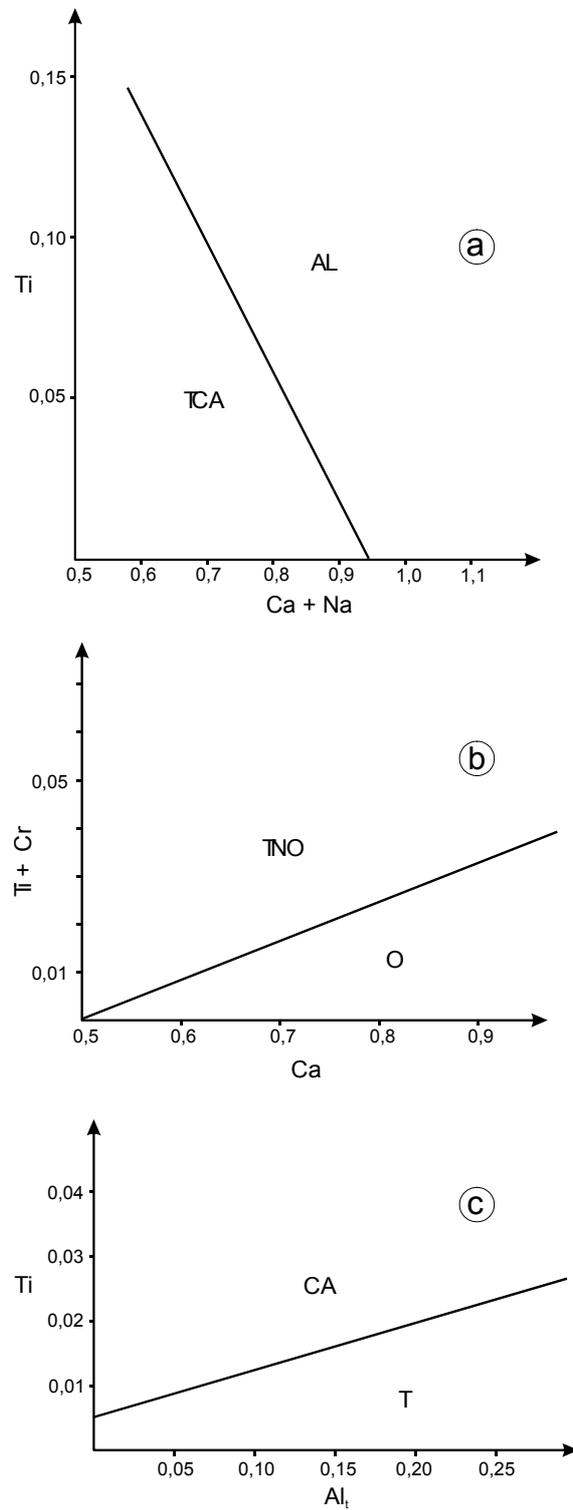


Figura 3 - Campo das composições dos piroxênios de basaltos (modificado de Leterrier *et al.*, 1982). (a) basaltos; (b) basaltos não alcalinos toleíticos e cálcio-alcalinos; (c) basaltos orogênicos não alcalinos toleíticos e cálcio-alcalinos. AL – alcalinos; TCA – toleíticos e cálcio-alcalinos; TNO – toleíticos não-orogênicos; O – orogênicos; CA – cálcio alcalinos; T - toleíticos

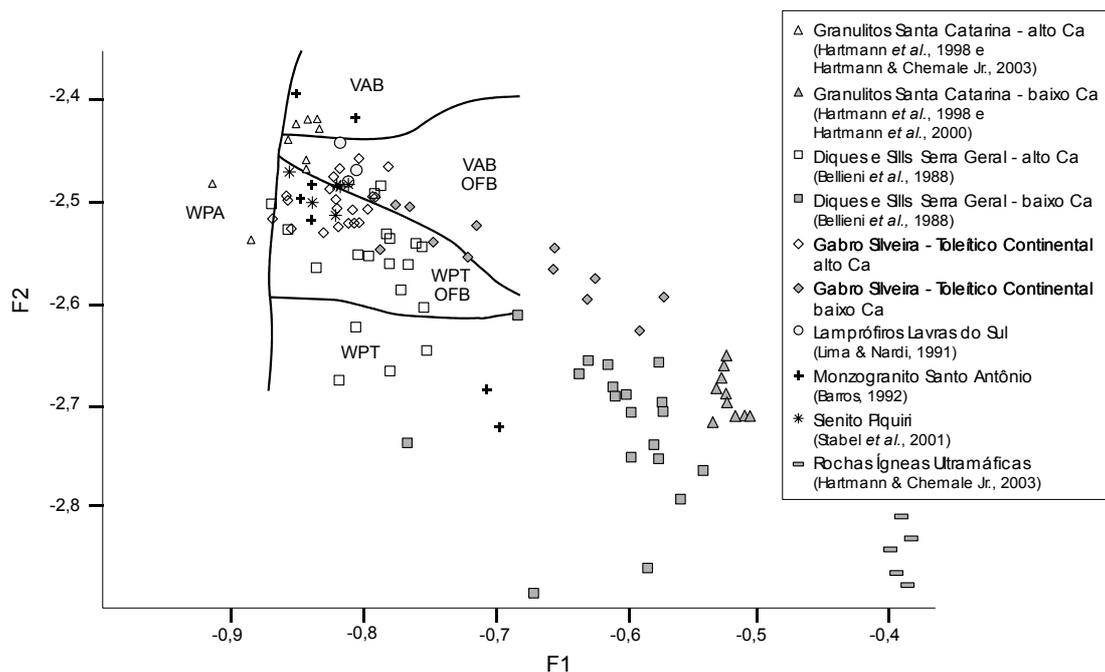


Figura 4 - Campo das composições dos piroxênios em diferentes ambientes (modificado de Nisbet & Pearce, 1977). OFB – basalto de fundo oceânico; VAB – basaltos de arco vulcânico; WPT – basalto toleítico intraplaca; WPA - basalto alcalino intraplaca. $F1 = - (0.012 \times SiO_2) - (0.0807 \times TiO_2) + (0.0026 \times Al_2O_3) - (0.0012 \times FeO^*) - (0.0026 \times MnO) + (0.0087 \times MgO) - (0.0128 \times CaO) - (0.0419 \times Na_2O)$ $F2 = - (0.0469 \times SiO_2) - (0.0818 \times TiO_2) - (0.0212 \times Al_2O_3) - (0.0041 \times FeO^*) - (0.1435 \times MnO) - (0.0029 \times MgO) + (0.0085 \times CaO) + (0.016 \times Na_2O)$

Anfibólitos detríticos cálcicos e alcalinos têm sido utilizados como indicadores de fontes de sedimentos. Morton, 1984b (*apud* Morton, 1991) diferenciou duas suítes de anfibólitos cálcicos em rochas sedimentares eopaleógenas vindas do SW da área do Rockall Plateau (NE do Oceano Atlântico), um incluindo actinolita, actinolita hornblenda e magnésio hornblenda, e o outro edenita e pargasita. O primeiro está associado a minerais do grupo do epidoto, incluindo piemontita, tido como proveniente do sudeste da Groenlândia, e o último está associado com clinopiroxênio, granada e apatita e foi derivado do embasamento pré-cambriano do Rockall Plateau. A composição dos anfibólitos alcalinos nos sedimentos molássicos de Savoy (França) foi estudada por Mange-Rajetzky & Oberhänsli (1982) que os identificaram como glaucofânio, ferroglaucofânio e crossita. Gradações para composições menos aluminosas refletem mudanças nas condições metamórficas na área fonte dos Alpes Ocidentais.

A geoquímica dos anfibólitos também tem sido usada para determinar a proveniência de materiais arqueológicos. Por exemplo, a areia encontrada na cerâmica da idade do ferro, provavelmente de origem romana, vinda do SE da Inglaterra, contém

dois tipos de população de anfíbólio, uma com baixo Na e Ti e outra com alto Na e Ti (Morton, 1991). Isto indica que rochas vulcânicas e plutônicas/metamórficas estavam presentes na área fonte, levando Freestone & Middleton (1987) a concluir que o material utilizado na cerâmica tem sua origem no Maciço Central Francês.

Um fator limitante na utilização do anfíbólio em estudos de proveniência é a sua instabilidade, mesmo em relação a fluidos intersticiais de baixa temperatura que causam sua dissolução nos poros dos arenitos, em profundidade rasa (Morton, 1984). Contudo, em antigos arenitos de baixa porosidade, o anfíbólio pode estar preservado, como nas rochas sedimentares do Paleozóico do sudeste de Uplands (Styles *et al.*, 1989), e seu estudo em tal caso pode aumentar a sofisticação e detalhamento dos modelos de proveniência.

As rochas graníticas de associações magmáticas distintas, freqüentemente retratando ambientes tectônicos diversos, podem mostrar anfibólitos de composição característica. Assim, granitóides cálcio-alcálicos, associados a ambientes de arcos magmáticos, comumente possuem anfibólitos cálcicos com razões $FeO_T/(FeO_T/MgO)$ inferior a 0,70, enquanto granitóides de associações pós-colisionais e principalmente anorogênicas tendem a ser os mais ricos em álcalis e apresentar razões $FeO_T/(FeO_T/MgO)$ mais elevadas, conforme citado em Nardi (1991). Associações pós-colisionais e anorogênicas podem conter rochas intermediárias e ácidas com anfibólitos sódicos.

Anfibólitos metamórficos de seqüências metabásicas são geralmente cálcicos, enquanto no metamorfismo de alta P, da fácies xistos azuis, forma-se o glaucofânio.

Anfibólitos provenientes de rochas metamórficas afetadas por eventos metamórficos distintos podem exibir composições distintas, como exemplificado nos anfibólitos dos eventos metamórficos paleoproterozóicos e neoproterozóicos do sul do Brasil (Hartmann *et al.*, 2003; Hartmann, 2002). Os anfibólitos gerados no evento mais antigo são mais ricos em Al, Cr e Ti.

Os conteúdos de elementos traços também auxiliam a identificação das fontes de anfibólitos. De modo geral, os anfibólitos metamórficos ou hidrotermais tendem a apresentar menores concentrações de ETR, Nb e Y. Já, os anfibólitos precoces, de granitóides de afinidade alcalina, potássica ou sódica, mostram concentrações mais elevadas e superiores às das rochas que os geraram.

Granada

Granadas de diferentes paragêneses ocupam diferentes campos composicionais (Wright, 1938), em diagramas triangulares com AS (almandina + espessartina) – P (piropo) – G (grossulária). A identificação da área fonte é possível, embora a mistura de diferentes fontes, causada pela complexidade da área fonte original ou pela reciclagem e diagênese, possa limitar de modo considerável na interpretação.

As variações composicionais da granada detrítica têm sido utilizadas com sucesso nos estudos de proveniência dos arenitos do Mar do Norte (Morton, 1991), derivados principalmente de fontes do embasamento metamórfico, diretamente ou por sucessivos episódios de reciclagem. Tem também permitido o aumento da sofisticação nos estudos de proveniência e a identificação das seqüências deposicionais com reservatórios de hidrocarbonetos como os do Jurássico Médio (Grupo Brent, Morton, 1985; 1987; Hurst & Morton, 1988; Morton *et al.* 1989) e do Paleoceno (Formação Forties, Morton, 1987).

Granadas magmáticas ocorrem predominantemente em rochas graníticas peraluminosas mostrando composição variável na série almandina-espessartina (Du Bray, 1988). Podem apresentar núcleos ricos em almandina ($\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$; 30-80%) com conteúdos crescentes de espessartina ($\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$; 20-70%) nas bordas. As almandinas metamórficas tendem a ter zoneamento composicional inversa. Andradita ($\text{Ca}_3(\text{Fe}^{+3}, \text{Ti})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) e grossulária ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) são produzidas pelo metamorfismo de seqüências enriquecidas em carbonatos de cálcio, enquanto piropo ($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) é geralmente relacionado a rochas magmáticas ultramáficas (Deer *et al.*, 1966). Granadas magnesianas são típicas do manto e são freqüentemente associadas com kimberlitos.

As granadas de fácies granulito, em geral, mostram altas razões Sm_N/Gd_N ($>0,6$), anomalias negativas de Eu mais pronunciadas (Eu/Eu^* aprox. 0,01-0,2) e padrão normalizado, pelo condrito para os elementos terras raras pesados, horizontalizado (Bea, 1996). As granadas de fácies anfíbolito são similares às de granitóides, mostrando Sm_N/Gd_N ($<0,6$), enriquecimento em terras raras pesadas e Y, leves anomalias negativas de Eu, e padrões com decréscimo progressivo até o Lu.

Outros minerais detríticos indicadores de proveniência

A **apatita** também é um mineral com potencial de utilização em estudos de proveniência, a exemplo dos estudos de Fleischer & Altschuler (1969) que utilizaram as variações no conteúdo de ETR e Y. A apatita é um mineral estável, exceto em ambientes com águas intersticiais de pH ácido, onde ela sofre rápida dissolução (Morton, 1984, 1986). Seus conteúdos de F são variáveis e apresentam utilização potencial em estudos de proveniência. Toledo & Pereira (2001) registram que a fluorapatita é tipicamente de origem ígnea, a hidroxiapatita é geralmente de origem sedimentar, em ambientes com ocorrência de guano, e a carbonato-fluorapatita é de ambientes sedimentares. Fluorapatita, cloroapatita e hidroxiapatita ocorrem também em rochas metamórficas (Deer *et al.*, 1966). Os padrões de terras raras de apatitas normalizadas pelos valores condríticos também podem ser indicativos de sua origem (Plá Cid *et al.* - submetido): apatitas de rochas graníticas mostram padrões com pouco fracionamento de ETRL/ETRP (La_N/Yb_N próximos de 1), valores levemente superiores a 1 são encontradas nas de rochas básicas, enquanto valores muito superiores a estes são típicos de apatitas geradas em condições mantélicas, encontradas em lamprófiros e xenólitos de piroxenitos, por exemplo.

De acordo com Bea *et al.* (1992), a concentração de terras raras, Y, Th e U, na apatita, depende da aluminosidade da rocha. Assim, apatitas de rochas peraluminosas são as mais enriquecidas em Y, U, Th e terras raras pesadas têm padrões de ETR normalizados pelo condrito horizontalizados com forte anomalia negativa de Eu. Apatitas de granitóides metaluminosos mostram menor enriquecimento desses elementos e padrões de ETR com leve anomalia negativa de Eu e La_N/Lu_N de 0,1 a 0,4. Em rochas peralcalinas as apatitas têm teores muito baixos de Y, ETR, Th e U, mas mostram aumento forte das terras raras leves, forte fracionamento das terras raras leves e pesadas (La_N/Lu_N de 50 a 100) e ausência de anomalias de Eu.

O grupo do **epidoto** (zoisita, clinozoisita, epidoto, alanita e piemontita) mostra um largo intervalo de composição e uma grande parte destas variedades é identificada pelas variações das propriedades ópticas. Possivelmente, por esta razão, pouca atenção tem sido dada para a composição química dos epidotos detríticos. A estabilidade do epidoto também é relativamente reduzida, embora maior que a dos anfíbólios (Morton, 1984). Variações na composição do epidoto no delta de Bengala (margens continentais da Índia e Bangladesh) têm sido descritas por Yokoyama (1990). Estes epidotos, provenientes principalmente dos Himalaias, embora apresentem poucas

variações na sua composição química, refletem heterogeneidades da área fonte himalaiana e também o aporte de materiais subcontinentais indianos.

De acordo com diversos autores (e.g. Zen & Hammarstrom, 1984; Campos *et al.*, no prelo) epidotos magmáticos possuem conteúdos de componente pistacita ($Ps = Fe^{+3} / (Fe^{+3} + Al)$) variáveis entre 20 a 30%, os derivados da alteração do plagioclásio possuem conteúdos inferiores a 20% e os produzidos a partir da alteração da biotita entre 30 e 50%. Epidotos magmáticos são geralmente formados em rochas graníticas cristalizadas em profundidades superiores a 15km, descartando-se, portanto, intrusões hipabissais e epizonais como suas possíveis fontes. Bea (1996) observa que epidotos magmáticos apresentam elevados teores de terras raras leves e U, e moderados de terras raras pesadas e Y.

Os minerais do grupo da **turmalina** têm elevada estabilidade e composição química relativamente complexa. Embora haja um grande número de variações de composições dos membros finais, a maioria das variações pode ser descrita em termos da abundância do Fe e Mg. Deer *et al.* (1966) representam os campos composicionais das turmalinas mais comuns, dravita, uvita, shorlita e elbaita, em um diagrama binário com FeO *versus* MgO. Dravita e uvita são de origem tipicamente metamórfica ou metassomática; entretanto, shorlita e elbaita são incluídas em paragêneses de granitos ou pegmatitos.

As variedades de turmalinas, determinadas opticamente, têm sido usadas na interpretação de proveniência, conforme referido por Pettijohn (1975).

Estudos das variações composicionais de turmalinas, de acordo com sua fonte primária, têm demonstrado grande aplicabilidade em estudos de proveniência, utilizando, por exemplo, os teores de Fe, Al, Mg e Ca (Henry & Guidotti, 1985) ou Ti e Zn (Viator, 2003).

O **rutilo** é um dos minerais mais estáveis nas rochas sedimentares. O rutilo proporciona informações sobre o metamorfismo da rocha fonte, por não ser estável em condições de fácies xistos verdes. Várias características geoquímicas do rutilo podem ser utilizadas para traçar a proveniência (Zack *et al.*, 2004). Assim, os conteúdos de Nb e Cr permitem distinguir rutilos de metapelitos daqueles de metabasitos. O conteúdo de Zr do rutilo metamórfico é correlacionado com a temperatura do metamorfismo, justificando seu uso como geotermômetro e, portanto, indicando o grau de metamorfismo da rocha fonte (Zack *et al.*, 2004).

Feldspato alcalino e plagioclásio têm sido utilizados em estudos de proveniência principalmente por suas características texturais. Sua composição, no entanto, pode dar importantes indicações de sua fonte primária. Plagioclásios com conteúdos de An superiores a 50% indicariam fontes ígneas básicas, plagioclásio mais albitico (An <50) pode ter proveniência de rochas ígneas mais enriquecidas em sílica ou de rochas metamórficas. Esses minerais possuem concentrações de Sr aproximadamente similares às de suas fontes; portanto, feldspatos com teores de Sr em torno de 1000 ppm poderiam indicar fontes de afinidade alcalina potássica; já granitóides de anatexia produziriam feldspatos com teores de Sr inferiores a 400 ppm. O mesmo raciocínio, com base nos coeficientes de partição mineral/líquido pode ser aplicado ao Ba e Eu, por exemplo. Isótopos de Pb, em feldspatos detríticos, têm sido utilizados com sucesso no estudo de proveniência de arenitos (McDaniel & McLennan, 1997).

A **titanita** é um mineral acessório primário comum das rochas graníticas e também mineral secundário ou hidrotermal, proveniente da alteração da magnetita titanífera, quando assume formas anédricas e composição química distinta. A titanita é quimicamente instável e dificilmente resiste aos estágios iniciais da diagênese, sendo, portanto, mineral detrítico incomum em arenitos (Asiedu *et al.*, 2000). Piccoli *et al.* (2000) distinguem titanitas secundárias de primárias pelos teores mais elevados de Cr, Zn e Mo e menores de ETR das primeiras.

A **estauroлита**, mineral tipicamente metamórfico não sendo conhecida em rochas magmáticas (Clarke, 1981), é relativamente estável durante o intemperismo e os estágios iniciais de diagênese, mas sofre dissolução em altas temperaturas. Kepezhinskas & Koryluk (1973) sugerem que a proporção de (Fe + Mn)/ Mg na estauroлита é controlada pelo grau metamórfico. Os teores de Zn da estauroлита detrítica, em sedimentos do Mar do Norte, foram utilizados como indicadores de fontes metassedimentares (Ashworth, 1975).

Considerações finais

O aprimoramento de técnicas analíticas tem contribuído muito na produção de melhores informações a respeito da gênese e proveniência de minerais detríticos, particularmente a partir de estudos geoquímicos em grãos de minerais. Os estudos utilizando microsonda eletrônica e iônica, microscopia eletrônica, e

espectrometria de massa com ICP e canhão LASER para análises de grãos minerais, adicionam precisão e sofisticação às determinações composicionais de espécies minerais, aumentando também a eficiência na determinação de suas fontes primárias. As vantagens de estudos desta natureza não somente incluem a confirmação da identificação óptica e a identificação de minerais raros, como também a determinação da variação composicional, incluindo-se os elementos traços, de vários minerais detríticos mais comuns. Um grande número de minerais pesados detríticos tem variação composicional suficiente para mediante estudo geoquímico revelar sua fonte primária. Neste sentido, a comparação dos dados obtidos com aqueles produzidos por estudos de geoquímica mineral em rochas magmáticas e metamórficas de diferentes afinidades geoquímicas e ambientes magmáticos fornece subsídios fundamentais para estudos de proveniência de sedimentos.

Os estudos de geoquímica mineral em grãos detríticos têm, assim, um importante papel na determinação da sua proveniência primária, embora não possam indicar clara e diretamente o quanto o grão foi reciclado. Por exemplo, estaurolitas ricas em Zn das rochas sedimentares eocênicas do Mar do Norte, quase certamente têm sua última proveniência de Grampian Highlands (Grã Bretanha), mas não existem evidências claras de que elas representem minerais retrabalhados a partir de depósitos permo-triássicos (Morton, 1991). Da mesma forma, zircões gerados em rochas antigas podem ser preservados mantendo composição química e isotópica original, em rochas sedimentares ou graníticas mais jovens, que poderão ser as fontes imediatas de sedimentos.

Muitas espécies minerais, notadamente aquelas com alta estabilidade química como o zircão, o rutilo e a turmalina são mais comumente policíclicas e, a primeira vista, isto pode ser um importante fator limitante na aplicação de técnicas geoquímicas. A análise e comparação das variações composicionais de uma ou mais espécies minerais dos sedimentos e de suas potenciais rochas fontes podem constituir importante auxílio na avaliação das porções recicladas, na distinção dos corpos de areia e formações, na estimativa do grau de mistura de diferentes fontes, e mesmo na identificação do aporte de sedimentos recentes (Morton, 1991).

Adicionalmente, podem ser buscadas evidências para enfrentar complexidades encontradas, por exemplo, no estudo de assembléias minerais detríticas de arenitos que foram depositadas sob regimes hidráulicos diferentes ou a comparação

de conjuntos minerais representativos de arenitos que sofreram graus variáveis de alteração diagenética.

Além das variações composicionais para os elementos maiores, são também de grande importância as determinações de elementos traços e isótopos. Embora as datações de minerais de grande estabilidade, como o zircão, sejam os dados mais valorizados atualmente em vários estudos de proveniência (Cliff *et al.*, 1991; Morton *et al.*, 1996; Carter, 1999; Sircombe, 1999; Hoskin & Ireland, 2000; Morton *et al.*, 2001 e Kosler *et al.*, 2002) sua validade sofre diversas restrições, principalmente porque a mesma fonte ígnea ou metamórfica, em geral, apresenta zircões com idades diversas. Minerais que apresentam pouca variação composicional, como titanita, apatita e o próprio zircão, podem se tornar importantes ferramentas no estudo de proveniência quando os elementos traços são considerados.

Um importante acréscimo no estudo da fonte primária de um mineral detrítico de origem ígnea pode resultar da consideração do coeficiente de partição mineral/fusão do mesmo, que pode fornecer informação quanto ao quimismo do magma que o gerou. Assim, o teor esperado de Nb e Ta nos zircões de associações magmáticas alcalinas anorogênicas deve ser duas ou mais vezes maior do que em zircões de associações calci-alcalinas orogênicas ou de granitóides produzidos pela fusão de seqüências metassedimentares. Feldspatos enriquecidos em Sr e Ba são típicos de rochas de afinidade alcalina potássica, já os granitos de origem puramente crustal apresentarão feldspatos empobrecidos nesses elementos.

Os estudos de proveniência com base na geoquímica dos minerais detríticos assumem maior eficiência e precisão quando dados das potenciais fontes na região estudada são disponíveis, ampliando e fortalecendo-se assim a aplicação de critérios de uso universal.

Agradecimentos - Este projeto é financiado parcialmente pelo CNPq, edital universal, proc. n^o 471867/03-9. Agradecemos aos revisores *ad hoc*, prof. Kenitiro Suguio e prof. Werner Truckenbrodt, pelas sugestões e correções que acrescentaram qualidade ao trabalho.

Referências bibliográficas

- Ahrens, L.H. & Erlank, A. J. 1969. Hafnium. In: Wedepohl, K.H. (ed.). **Handbook of Geochemistry**. New York, Springer-Verlag. v. II/5, sections B-O.
- Ashworth, J.R. 1975. Staurolite at anomalously high grade. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **53**:281-291.
- Asiedu, D.K.; Suzuki S. & Shibata, T. 2000. Provenance of sandstones from the Lower Cretaceous Sasayama Group, Inner Zone of Southwest Japan. **Sedimentary Geology**, **131**(1-2):9-24.
- Barros, C.E. 1992 **Petrologia e Litoquímica do Monzogranito Santo Antônio, Dom Pedrito, RS**. Porto Alegre, 123p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Barros, C.E. & Nardi, L.V.S. 1994. O Maciço Granítico Santo Antônio,RS: Magmatismo Neoproterozóico de Afinidade Shoshonítica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **66** (4):441-465.
- Bau, M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **123**:323-333.
- Bea, F. 1996. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; Implications for the chemistry of crustal melts. **Journal of Petrology**, **37**(3):521-552.
- Bea, F., Fershtater, G. & Corretgé, L.G. 1992. The geochemistry of phosphorous in granite rocks and the effect of aluminium. **Lithos**, **29**:43-56.
- Bellieni, G.; Piccirillo, E. M.; Comin-Chiaramonti, P.; Melfi, A. J. & Da Roit, P. 1988 Mineral chemistry of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Paraná Basin (Brazil) In: Melfi, A.J., Piccirillo, E.M. (eds.) **The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects**. São Paulo, IAG/USP. v.1., p.73-92.
- Belousova, E.A.; Griffin, W.L.; O'Reilly, S.Y. & Fisher, N.I. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **143**:602-622,.
- Campos, T.F.C.; Neiva, A.M.R.; Nardi, L.V.S.; Pereira, L. S. & Bonzanini, L.F. The magmatic epidote and amphibole from the Rio Espinharas hybrid complex, northeastern Brazil. **Pesquisas em Geociências** (no prelo).
- Carter, A. 1999. Present status and future avenues of source region discrimination and characterization using fission track analysis. **Sedimentary Geology**, **124**:31-45.
- Catalán, J.R.M.; Fernández-Suárez, J.; Jenner, G.A.; Belousova, E. & Montes, A. 2004. Provenance constraints from detrital zircon U–Pb ages in the NW Iberian Massif: implications for Palaeozoic plate configuration and Variscan evolution. **Journal of the Geological Society**, **161**(3):463-476
- Cherniak, D.J., Hanchar, J.M. & Watson, E. B. 1997. Rare-earth diffusion in zircon. **Chemical Geology**, **134**:289–301.
- Clarke, D.B. 1981. The mineralogy of peraluminous granites: a review. **Canadian Mineralogist**, **19**:3-17.
- Cliff, R.A.; Drewery, S.E. & Leeder, M.R. 1991. Sourcelands for the Carboniferous Pennine river system: constraints from sedimentary evidence and U-Pb

- geochronology using zircon and monazite. In: Morton, A.C.; Todd, S.P.; Haughton, P.D.W. (eds.). **Developments in Sedimentary Provenance Studies**. UK. p. 137-159. (Geological Society special publication, 57)
- Cornell, D.H. & Hegardt, E.A. 2003. No more blind dates with zircon! **Geophysical Research Abstracts**, **5**:02523.
- Deer, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. 1966. **An introduction to the rock-forming minerals**. Longman Group Ltd., Londres, 528p.
- Dickinson, W.R. 1970. Interpreting detrital modes of greywacke and arkose. **Journal of Sedimentary Petrology**, **40**:695-707.
- Dickinson, W.R.; Beard, L.S.; Brakenridge, G.R.; Erjavec, J.L.; Ferguson, R.C.; Inman, K. F.; Knepp, R.A.; Lindberg, F.A. & Ryberg. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. **Geological Society of America Bulletin**, **94**:222-235.
- Du Bray, E.A. 1988. Garnet compositions and their use as indicators of peraluminous granitoid petrogenesis - southeastern Arabian Shield. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **100**:205-212.
- Duddy, I.R. & Kelly, P.R. 1999. Uranium in mineral sands: measurement and uses. **Australian Institute of Geoscientists Bulletin**, **26**:1-5. Disponível em: <http://www.geotrack.com.au/minsand.htm>. Acesso em: 27 jul. 2003.
- Fleischer, M. & Altschuler, Z.S. 1969. The relationship of the rare-earth composition of minerals to geological environment. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **33**:725-732.
- Freestone, I.C. & Middleton, A.P. 1987. Mineralogical applications of the analytical SEM in archaeology. **Mineralogical Magazine**. **51**:21-31.
- Gehrels, G.E., Yin, A., Wang, X.F. 2003. Detrital zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau. **Geological Society of America Bulletin** **115**(7): 881-896.
- Hartmann, L.A. 1998. Deepest Exposed Crust of Brazil - Geochemistry of Paleoproterozoic depleted Santa Maria Chico Granulites. **Gondwana Research**, **1**(3/4):331 – 341.
- Hartmann, L.A. 2002. The Mesoproterozoic Supercontinent Atlantica. **Gondwana Research**, **5**(1):157-163.
- Hartmann, L.A., Basei, M.A. S. & Simas, M.W. 1998. Geochemistry of the Lower Proterozoic granulite-facies Grant syenite gneiss, Barra Velha, Santa Catarina State, southern Brazil. **Pesquisas**, **25**(2):3-9.
- Hartmann, L.A. & Chemale Jr., F. 2003. Mid amphibolite facies metamorphism of harzburgites in the Neoproterozoic Cerro Mantiqueiras Ophiolite, southernmost Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **75**(1):109-128.
- Hartmann, L.A.; Santos, J.O.S.; Leite, J.A.D.; Porcher, C.C. & McNaughton, N.J. 2003. Metamorphic evolution and U-Pb zircon SHRIMP geochronology of the Belizário ultramafic amphibolite, Encantadas Complex, southernmost Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **75**(3):393 – 403.

- Hartmann, L.A.; Santos, J.O.S.; McNaughton, N.J.; Vasconcellos, M.A.Z.; Silva, L.C. 2000. Ion microprobe (SHRIMP) dates complex granulite from Santa Catarina, southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **72**(4):560-572.
- Haughton, P.D.W.; Todd, S.P. & Morton, A.C. 1991. Sedimentary provenance studies. In: Morton, A.C.; Todd, S.P. & Haughton, P.D.W. (eds.). **Developments in Sedimentary Provenance Studies**. p. 01-11. (Geological Society Special Publication, 57)
- Heaman, L.M.; Bowins, R. & Crocket, J. 1990. The chemical composition of igneous zircon suites: Implications for geochemical tracer studies. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **54**:1597-1607.
- Henry, D.J. & Guidotti, C.V. 1985 Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. **American Mineralogist**, **70**:1-15.
- Hoskin, P.W.O. & Black, L.P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. **Journal of Metamorphic Geology**, **18**:423-439.
- Hoskin, P.W.O. & Ireland, T.R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. **Geology**, **28**(7):627-630.
- Hurst, A.R. & Morton, A.C. 1988. An application of heavy-mineral analysis to lithostratigraphy and reservoir modeling in the Oseberg Field, northern North Sea. **Marine and Petroleum Geology**, **5**:157-169.
- Kepezhinskas, K.B. & Koryluk, V.N. 1973. Range of variations in the composition of staurolite from typical metapelites with pressure and temperature of metamorphism. **Doklady**: **212**, 121-125.
- Kosler, J.; Fonneland, H.; Sylvester, P.; Turbrett, 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.
- Krawinkel, H.; Wozazek, S.; Krawinkel, J. & Hellmann, W. 1999. Heavy-mineral analysis and clinopyroxene geochemistry applied to provenance analysis of lithic sandstones from the Azuero-Soná Complex (NW Panama). **Sedimentary Geology**, **124**:149-168.
- Krynine, P.D. 1946. The tourmaline group in sediments. **Journal of Geology**, **54**:65-87.
- Leterrier, J.; Maury, R.C.; Thonon, P.; Girard, D. & Marchal, M. 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. **Earth and Planetary Science Letters**:**59**:139-154.
- Lima, E.F. & Nardi, L.V.S. 1998. Química mineral das rochas vulcânicas e lamprófiros espessartíticos da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul-RS. **Revista Brasileira de Geociências**, **28**(2):113-124.
- Lima, E.F. & Nardi, L.V.S. 1991. Os lamprófiros espessartíticos da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS. **Geochimica Brasiliensis**, **5**:117-131.
- Mange-Rajetzky, M.A. & Oberhänsli, R. 1992. Detrital lawsonite and blue sodic amphibole in the Molasse of Savoy, France and their significance in assessing Alpine evolution. **Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen**, **62**:415-436.

- McDaniel, D.K. & McLennan, S.M. 1997. A comparison of provenance information obtained from detrital zircon and feldspar grains in a sandstone from the Devonian Catskill clastic wedge. In: Annual V.M. Goldschmidt Conference, 7, 1997. Tucson, Arizona. [Abstracts...] 1p. Disponível em: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/gold/pdf/2363.pdf> Acesso em: 12 de novembro de 2004.
- Morimoto, N.; Fabries, J.; Ferguson, A.K.; Ginzburg, I.V.; Ross, M.; Seifert, F.A.; Zussman, J.; Aoki, K. & Gottardi, G. 1988. Nomenclature of pyroxenes. **American Mineralogist**, **73**:1123-1133.
- Morton, A.C. 1984. Stability of detrital heavy minerals in Tertiary sandstones from the North Sea Basin. **Clay Minerals**, **19**:287-308.
- Morton, A.C. 1985. A new approach to provenance studies: electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones of the northern North Sea. **Sedimentology**, **32**(4):553-566.
- Morton, A.C. 1986. Dissolution of apatite in North Sea Jurassic sandstones: implications for the generation of secondary porosity. **Clay Minerals**, **21**:711-733.
- Morton, A.C. 1987. Influences of provenance and diagenesis on detrital garnet suites in the Paleocene Forties Sandstone, Central North Sea. **Journal of Sedimentary Petrology**, **57**(6):1027-1032.
- Morton, A.C. 1991. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. In: Morton, A.C.; Todd, S.P.; Haughton, P.D.W. (eds.). **Developments in Sedimentary Provenance Studies**. p. 31-45. (Geological Society Special Publication, 57)
- Morton, A.C.; Stiberg, J.P.; Hurst, A. & Qvale, H. 1989. Lithostratigraphic correlation using heavy minerals: the Brent Group, Oseberg Field, North Sea. In: Collinson, J. (ed.). **Correlation in Hydrocarbon Exploration**. Graham & Trotman, London. p. 217-230.
- Morton, A.C.; Claoué-Long, J.C. & Berge, C. 1996. Shrimp constraints on sediment provenance and transport history in the Mesozoic Statfjord Formation, North Sea. **Journal of the Geological Society**, **153**:915-929.
- Morton, A.C.; Claoué-Long, J.C. & Hallsworth, C.R. 2001. Zircon age and heavy mineral constraints on provenance of North Sea Carboniferous sandstones. **Marine and Petroleum Geology**, **18**:319-337,
- Morton, A.C. & Hallsworth, C. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. **Sedimentary Geology**, **124**:3-29.
- Nardi, L.V.S. 1991. Caracterização petrográfica e geoquímica dos granitos metaluminosos da associação alcalina: revisão. **Pesquisas**, **18**(1):44-57.
- Nisbet, E.G. & Pearce, J.A. 1977. Clinopyroxene compositions in mafic lavas from different tectonic settings. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **63**:149-160.
- Pettijohn, F.J. 1975. **Sedimentary Rocks**. New York, Harper & Row, 628 p.
- Pettijohn, F.J.; Potter, P.E. & Siecer, R. 1973. **Sand and sandstone**. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag. 618p.

- Piccoli, P., Candela, P., Rivers, M. 2000. Interpreting magmatic processes from accessory phases: titanite- a small-scale recorder of large-scale processes. Royal Society of Edinburgh, **Transactions: Earth Sciences**, v. 91, p. 257-267.
- Pinto, L.; Hérail, G.; Moine, B.; Fontana, F.; Charrier, R., & Dupré, B. 2004. Using geochemistry to establish the igneous provenances of the Neogene continental sedimentary rocks in the Central Depression and Altiplano, Central Andes. **Sedimentary Geology**, **166**:157-183.
- Pittman, E.D. 1963. Use of zoned plagioclase as an indicator of provenance. **Journal of Sedimentary Petrology**, **33**:380-386.
- Plá Cid, J.; Nardi, L.V.S.; Conceição, H.; Bonin, B. & Jardim de Sa, E. 2000. The alkaline silicasaturated ultrapotassic magmatism of the Riacho do Pontal Fold Belt, NE Brazil: an example of syenite-granite Neoproterozoic association. **Journal of South America Earth Science**, **13**(7):661-683.
- Plá Cid, J.; Nardi, L.V. S.; Gisbert, P.E.; Merlet, C. & Boyer, B. La, Ce, Nd, and Sr behaviour in minette magmas during fractionation of apatite-clinopyroxene-mica paragenesis under upper-mantle pressures. **Lithos** (submetido)
- Pupin, J.P. 1980. Zircon and granite petrology. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **73**:207-220.
- Pupin, J.P. 2000. Granite genesis related to geodynamics from Hf-Y in zircon. **Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, **91**:245-256.
- Rubatto, D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. **Chemical Geology**, **184**:123-138.
- Rubatto, D. & Hermann, J. 2003. Zircon formation during fluid circulation in eclogites (Monviso, Western Alps): Implications for Zr and Hf budget in subduction zones. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **67**(12):2173-2187.
- Sircombe, K.N. 1999. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia. **Sedimentary Geology**, **124**:47-67.
- Stabel, L.Z., Nardi, L.V.S., Cid, J.P. 2001. Química mineral e evolução petrológica do Sienito Piquiri: magmatismo shoshonítico, Neoproterozóico, pós-colisional no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, **31**(2):211-222.
- Sturm, R. 2004. Analysis of magmatic crystal growth by backscattered electron imaging. **Microscopy and Analysis**, **18**(4):25-27.
- Styles, M.T.; Stone, P. & Floyd, J.D. 1989. Arc detritus in the Southern Uplands: mineralogical characterization of a 'missing' terrane. **Journal of the Geological Society**, **146**:397-400.
- Thomas, J.B., Bodnar, R.J., Shimizu, N., Sinha, A.K. 2002. Determination of zircon/melt trace element partition coefficients from SIMS analysis of melt inclusions in zircon. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **66** (16):2887-2901
- Toledo, M.C.M. & Pereira, V.P. 2001. Variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. **Revista do Instituto Geológico de São Paulo, São Paulo**, **22**(1/2):27-64.
- Viator, D.B. 2003. **Detrital tourmaline as an indicator of provenance: a chemical and sedimentological study of modern sands from the Black Hills, South Dakota**. Louisiana, 85p. Dissertação de Mestrado, Louisiana State

University. Disponível em: <http://etd02.lnx390.lsu.edu/docs/available/etd-0611103-101847>. Acesso em: 12 de setembro de 2004.

Vitanage, P.W. 1957. Studies of zircon types in the Ceylon pre-Cambrian complex. **Journal of Geology**, **65**:117-128.

Vollbrecht, A.; Oberthü, T.; Ruedrich, J. & Weber, C. 2002. Microfabric analyses to the Witwatersrand gold-and uranium-bearing conglomerates: constrains on the provenance and post-depositional modification of rock and ore components. **Mineralium Deposita**, **37**: 433-451.

Wilson, M. 1989. **Igneous Petrogenesis**. Londres, Unwin Hyman, 466p.

Wright, W.I. 1938. The composition and occurrence of garnets. **American Mineralogist**, **23**:436-449.

Yokoyama, K., Amano, K., Taira, A. & Saito, Y. 1990. Mineralogy of silts from the Bengal Fan. In: OCEAN DRILLING PROGRAM, 116B, Science Results. **Proceedings...**p.59-73.

Zack, T.; von Eynatten, H. & Kronz, A. 2004. Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. **Sedimentary Geology**, in press. Disponível em: http://nt-server.min.uni-heidelberg.de/tzack/Zack_etal_04b.pdf .Acesso em 12 de novembro de 2004.

Zen, E-An & Hammarstrom, J. 1984. Magmatic epidote and its petrologic significance. **Geology**, **12**:515-518.

CAPÍTULO 3

DETRITAL MINERALS OF MODERN BEACH SEDIMENTS IN SOUTHERN BRAZIL: A PROVENANCE STUDY BASED ON CHEMISTRY OF ZIRCON

Running Head: Detrital minerals of beach sediments

Carla Ennes de Barros¹, Lauro V S Nardi¹, Sergio R Dillenburg¹, Ricardo Ayup¹,
Kym Jarvis², Ricardo Baitelli¹

¹Instituto de Geociências
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Agronomia
91509-900 - Porto Alegre – Brazil
Tel/Fax 55 51 33167320 / 55 51 33167302
carla.barros@ufrgs.br

² School of Earth Sciences and Geography,
Kingston University,
Penrhyn Road,
Kingston upon Thames,
Surrey KT1 2EE
Kingston, UK.
Tel: +44 (0)20 8547 2000

Abstract - The trace-element content of zircon grains from Holocene beach sands from the Rio Grande do Sul state in southern Brazil was investigated in order to discuss their probable primary source. Zircon grains from ten samples were separated and analysed by LA ICP-MS for REE, Nb, U, Th, Y, Hf, and Ta and by microprobe and MEV for Si, Zr, and P. The results obtained are similar to those suggested by the zircon classification developed by BELOUSOVA et al. (2002), nevertheless, additional information and a more detailed characterization of zircon sources was yielded. The probable geotectonic setting and geochemical affinity of zircon igneous-sources was predicted mainly based on Th/U, Y/Ho, Nb/Ta ratios, La and Nb contents, and REE patterns of zircons. The statistical groups identified by multivariate analysis were an additional useful tool for identifying compositional groups of zircons. Zircon grains from the studied sediments are probably derived from an association of subalkaline to alkaline granitic rocks with their mafic counterparts and metamorphic rocks of amphibolite to granulite facies. The

metamorphic sources were more important in the southern sector of the studied coastal segment, whilst in the northern sector zircons from A-type granites are more abundant. The so-called Pelotas Batholith, situated in the eastern part of Sul-rio-grandense Shield, which is composed mainly of a post-collisional granitic association of Neoproterozoic age, and Paleo to Neoproterozoic high-grade metamorphic sequences is proposed as the probable source of the studied zircons. The compositional variations of zircons from southern to northern sector are coherent with the hypothesis that the studied sediments came from relatively near continental source areas, probably transported by several small streams and rivers during phases of sea level low-stands. The chemical composition of zircons, particularly trace element contents and ratios, can be a powerful tool for determining the primary sources of detrital zircons.

Key words: coastal sediments, heavy minerals, mineral chemistry, sedimentary sources

Introduction

Modern beach sediments of Rio Grande do Sul (RS) coast show small amounts of heavy minerals (average < 1%). Exceptions are two well known areas for their heavy mineral-enriched beach deposits: Hermenegildo and Bujuru. The primary sources of these heavies are the inland rocks of RS, which have been intensively eroded by drainage systems during sea-level lowstands. Sediment budget of the modern beach sands of RS was provided by coastal plain deposits which were reworked during the course of the Postglacial Marine Transgression, by the littoral drift system, and also by the continental shelf after the maximum sea level was achieved at 5.6 ka (DILLENBURG et al. 2000, DILLENBURG et al. 2004). The mineralogy of the heavy minerals fraction comprises: zircon, tourmaline, rutile, ilmenite, magnetite, epidote, sillimanite, kyanite, staurolite, garnet, amphibole, pyroxene, titanite and apatite. In the very fine sand fraction their concentration ranges from 0.042 to 9.60%.

The provenance of these heavies was investigated in the past, but only very general conclusions were presented, connecting these minerals with metamorphic, igneous and sedimentary rocks occurring at the adjacent highlands (MARTINS DA SILVA, 1979, VILLWOCK et al., 1979, LOSS and DEHNHARDT, 1983). Worldwide provenance studies in the last years are focusing on heavy minerals chemistry. In some of these studies chemical properties of zircon have been considered as a promising tool on

provenance studies (e.g. BELOUSOVA et al., 2002, RUBATTO, 2002, HOSKIN and SCHALTEGGER, 2003, GEHRELS et al., 2003). Zircon is a zirconium silicate - $ZrSiO_4$ - with variable amounts of Hf, which occupies part of the octahedral sites. It is highly resistant to natural physical and chemical processes, preserving their structural and chemical properties, even when submitted to severe physico-chemical changes. RUBATTO and HERMANN (2003) observed that zircon can be expected as a residual phase even after melting of subducted sediments under mantle conditions. Zircon is generally present among the detrital fraction even of very mature sediments and sedimentary rocks, preserving their original compositional features, and so, provide information about their provenance. Granitic and metamorphic rocks can preserve inherited zircons with ages much older than that of rock crystallization (RUBATTO and HERMANN, 2003), and in spite of the problems that this causes for dating, it is a powerful tool for provenance studies. A very useful review of zircon physical and chemical properties, as well as of their uses for provenance and petrogenetic studies is that of HOSKIN and SCHALTEGGER (2003).

The progress of analytical technologies for microscopic grains in the last decades has allowed a significant advance in the use of zircon geochemistry for provenance and petrogenetic studies of sedimentary and igneous or metamorphic rocks, respectively. RUBATTO (2002) related the REE (Rare Earth Element) content of zircons with the metamorphic conditions under which they were crystallized. HOSKIN and BLACK (2000) observed that during metamorphic recrystallization zircon grains lost trace elements. Th/U ratios of metamorphic zircons are generally less than 0.1 whilst those of magmatic ones are generally greater (HOSKIN and BLACK, 2000). BELOUSOVA et al. (2002) suggested a binary fluxogram, based on Lu, Ta, U, Hf, Ce/Ce* and Nb contents, for the identification of primary sources of detrital zircons. Thus the composition of zircons is a useful tool in several areas of geologic research. However, an important debate is still alive concerning the use of zircon chemistry for the identification of igneous sources (e.g. HOSKIN and SCHALTEGGER, 2003, BELOUSOVA et al., 2002, PUPIN, 2000, HOSKIN and BLACK, 2000, HOSKIN and IRELAND, 2000). Dating of detrital zircons is one of the most widely used tools for provenance studies (CATALÁN et al., 2004, THOMAS et al., 2004, GEHRELS et al., 2003, HOSKIN and SCHALTEGGER, 2003) and most authors discard the use of zircon geochemistry for this purpose. HOSKIN and IRELAND (2000) concluded that the geochemistry of zircons could not be used for provenance studies because of the large variation of trace-element

contents in zircons, even in a single grain, proposing that a study of zircon inclusions could be a more effective tool. The integrated use of zircon chemistry with heavy-mineral assemblages, and zircon age determinations have been successfully used for provenance studies of sedimentary deposits by MORTON et al. (2005) and VEEVERS et al. (2005) amongst others.

The aim of this paper is to describe a test of zircon chemistry as an important tool for investigating the provenance of Holocene beach sands in southern Brazil.

A brief review of the use of zircon chemistry in provenance studies

Zircon optical properties and crystallinity have been used for a long time in studies of sedimentary provenance (TYLER et al., 1940 and VITANAGE 1957). Their geochemistry, however, has only been employed since improvements in analytical techniques have allowed appropriate data to be measured for provenance studies (MURALI et al, 1983, SHUKLA, 1988, HEAMAN et al., 1990). This subject has been discussed in several papers such as those by BELOUSOVA et al. (2002), RUBATTO and HERMANN (2003), HOSKIN and SCHALTEGGER (2003), BARROS et al. (2005).

Some criteria based upon zircon geochemistry and element contents or elemental ratios such as Th/U, Zr/Hf, Ce/((La+Nd)/2), REE, Y, Nb/Ta, and P have reached a reasonable credibility for provenance studies.

Th/U ratios show different values in metamorphic and igneous zircons. The metamorphic ones, even those formed under granulite facies conditions show Th/U ratios less than 0.1 (HOSKIN and BLACK, 2000, RUBATTO, 2002). Zircons crystallized from granitic magmas have Th/U ratios around 0.5, whilst those from more basic magmas have higher values, over 0.8 (HEAMAN et al., 1990, HOSKIN and SCHALTEGGER, 2003). The abundance of U is useful for discriminating zircons from less differentiated mantle-derived magmas, which have low U contents, from those more differentiated or of crustal origin which are U enriched (DUDDY and KELLY, 1999, BELOUSOVA et al., 2002).

According to PUPIN (2000) only zircons from pegmatites have HfO₂ contents higher than 2 wt%. Zircons from feldspatoid-bearing syenites may have very high Zr/Hf ratios varying from 73 to 135 and low Hf contents -6,000 to 8,000 ppm–

(HEAMAN et al., 1990). Data from the post-collisional Piquiri Syenite Massif in southern Brazil indicate that zircons from the same magmatic suite show Zr/Hf ratios varying from 60 in the intermediate rocks to <30 in the co-magmatic granites, which is consistent with the values of Zr/Hf ratios referred by BELOUSOVA et al. (2002). Data from RUBATTO and HERMANN (2003) suggest that Zr/Hf ratios in zircon from basic rocks have a sharp decrease during metamorphism due to Hf enrichment. Zr/Hf ratios in zircons are usually high – about 60 – in basic to intermediate rocks and in some anorogenic granites (PUPIN, 2000), mainly due to their low Hf contents. Very low Hf contents, *ca* 0.15% (HOSKIN and SCHALTEGGER, 2003) and Zr/Hf ratios over 300 were observed in zircons from granodiorites from magmatic arc settings. Granitic rocks have magmatic zircons with Hf contents generally over 1 wt%, which consequently show lower Zr/Hf ratios – under than 45 - even when these granites are derived from less differentiated magmas derived from mantle sources. Zircons from peraluminous crustally-derived granites, such as those associated with migmatites, are Hf enriched, and consequently show very low Zr/Hf ratios (HEAMAN et al., 1990, LINNEN and KEPPLER, 2002).

According to BAU (1996), Y/Ho chondritic values are close to 28, and most igneous rocks with less than 70 wt% of SiO₂ show values in the range 24-34. Most zircons show chondritic Y/Ho ratios, except for those from highly evolved granites or those affected by hydrothermal fluids, particularly where the F activity is high (HINTON and UPTON 1991, BAU 1996). Non-chondritic Y/Ho and Zr/Hf ratios in zircons are uncommon and are found mostly in zircons crystallized from high-silica magmas (BAU, 1996).

The Hf and Y contents of zircons were used by PUPIN (2000) for discriminating zircons from: (i) tholeiitic granitoids - low Hf and high Y contents, (ii) from alkaline granitoids - low Hf and medium to high Y, (iii) from calc-alkaline granitoids - medium Hf and low Y, and, (iv) from anatectic granitoids - high Hf and low Y.

REE patterns of zircons normalized against the chondritic values show strong enrichment of Heavy Rare Earth Elements (HREE), reflecting the high mineral/melt partition coefficients, which increase from approximately 1 for the Light Rare Earth Elements (LREE) to up to 1,000 for HREE (FUJIMAKI, 1986, THOMAS et al., 2002, MAHOOD and HILDRETH, 1983, NARDI et al., 2005). Positive Ce anomalies are generally observed in igneous zircon patterns and they are ascribed to Ce^{+IV} relative

enrichment (HINTON and UPTON, 1991 and THOMAS et al., 2002). The REE concentration in zircons can reflect the abundance in the melts from where they were crystallized; nevertheless, this is strongly affected by the order of zircon crystallization in plutonic rocks and by the mineral phases crystallized previously and concomitantly with it. A recent study of zircons in co-magmatic dioritic, monzonitic and granitic rocks from the Lavras do Sul Shoshonitic Association (NARDI et al., 2005) shows that in spite of these complexities the REE patterns of zircons show large variations of concentrations, but maintain regular and coherent patterns that could be used for provenance studies.

BELOUSOVA et al (2002) suggest the intensities of Ce anomalies (Ce_N/Ce_N^*) and the Lu contents as useful parameters for provenance studies. The REE contents of metamorphic zircons were used by RUBATTO (2002) for distinguishing rocks from eclogite, granulite or greenschist facies.

According to LINNEN and KEPPLER (1997) Nb and Ta are highly incompatible elements in magmatic systems, where they generally maintain the chondritic proportions with Nb/Ta ratios around 17.5. Zircons from granites nevertheless show lower ratios because Ta is more mobile during the differentiation of granites magmas. Thus, zircons from granitic rocks are expected to show Nb/Ta ratios lower than 15, basic and intermediate rocks preserve the chondritic values, whilst no information is available about metamorphic zircons. The contents of Nb and Ta in magmatic rocks related with orogenic cycles vary around 15 ± 5 ppm and 1 ± 0.5 respectively, whilst the highest values are found among anorogenic rocks derived from mantle sources not previously modified by subduction-related metasomatism. BELOUSOVA et al. (2002) observed that Ta is enriched relative to Nb in zircons and that is why their Nb/Ta ratios are generally around 3. Based on partition coefficient data zircons are expected to show Nb and Ta contents roughly close to those of parental magmatic liquids, except in more evolved acid magmas where these values are up to 10 times higher. Therefore, zircons with Nb contents over than 100 ppm are expected in anorogenic granitoids; orogeny-related granitoids probably have zircons with Nb contents roughly between 10 and 100. Low Nb contents, under than 10 ppm, are expected in zircons from intermediate to basic rocks (RUBATTO and HERMANN, 2003, BELOUSOVA et al., 2002) or from crustally-derived leucocratic peraluminous granites. Ta follows a similar pattern although with lower abundance in most rocks and minerals.

Regional setting

The RS coast occurs on a continental margin that evolved as a rifted plate boundary since Early Cretaceous times. In the vicinity of RS (29° to 34° south latitudes) deposition of a huge amount of post-rift, mainly clastic sediments, produced a wide, shallow and gently sloping continental shelf. At the upper slope seismic records revealed a sedimentary thickness of at least 10 km (FONTANA, 1990). The coastal plain is wide (20 to 80 km) and shows a very low relief due to its formation during the Quaternary by juxtaposition of sedimentary deposits of four barrier/lagoon systems designated I (oldest) to IV by VILLWOCK et al. (1986). Landward the coastal plain is bordered by alluvial fan deposits and bedrock highlands (Fig. 1). Climate is in general humid temperate, with a rainfall ranging from 1000 to 1500 mm evenly distributed throughout the year.

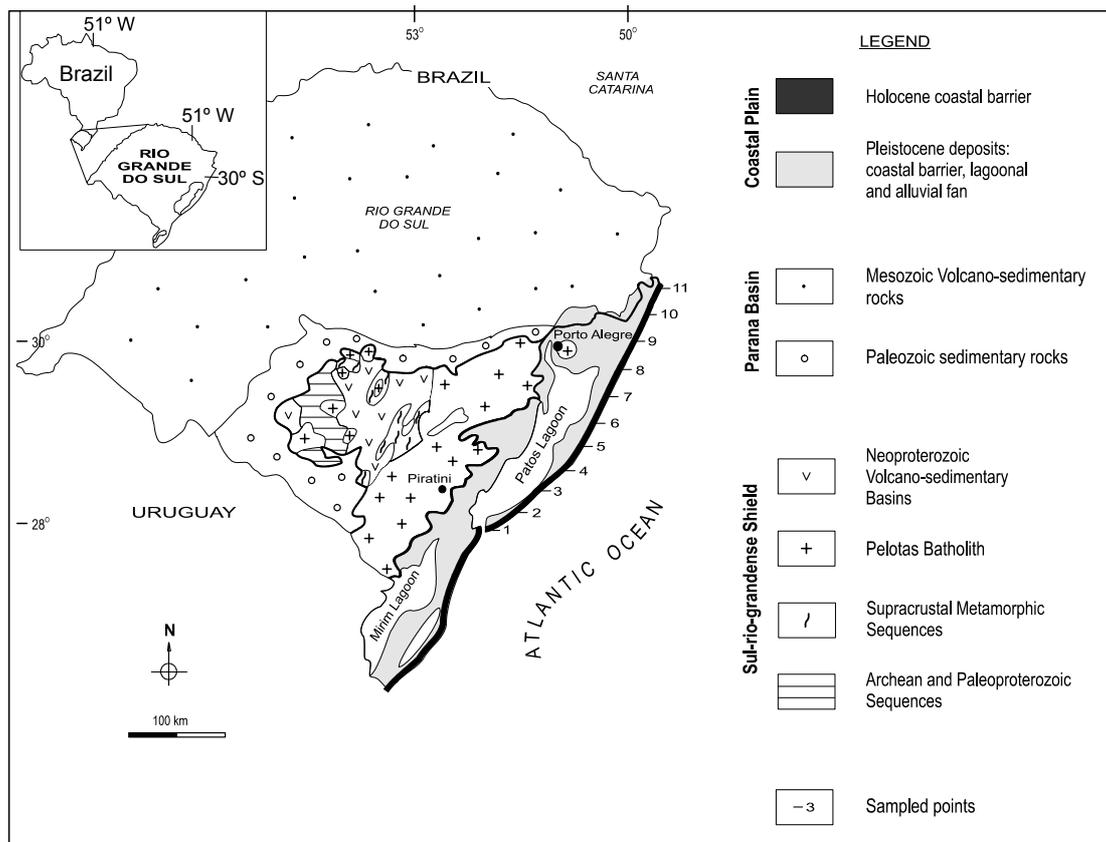


Figure 1 - Map of the coast and continental nearby areas.

The littoral of RS is characterized by a monotonous and gentle undulating barrier coast, oriented NE-SW and subject to dominant swell waves generated in southern latitudes, and wind-generated waves produced by strong spring-summer sea breezes from the northeast. The average significant wave height is 1.5 m, measured in 15-20 m water depth (MOTTA, 1969). Due to changes in coastline orientation and inner shelf morphology and gradient, beaches of RS are exposed to different degrees of wave energy (DILLENBURG et al., 2004). The coast is microtidal with semidiurnal tides that have a mean range of only 0.5 m. Consequently, sediment transport and deposition along the open coast is primarily dominated by wave action. A net northward littoral drift is evident in coastal geomorphic features (TOMAZELLI and VILLWOCK, 1992), and by field measurements (TOLDO JR. et al., 1993). The present day beaches of RS receive very little sand from inland because most of the beadload carried by the few streams and rivers that drain to the coast is trapped in lagoons and other coastal plain environments (TOMAZELLI et al., 1998).

The post-glacial sea level history of the Rio Grande do Sul coast extends from about 17.5 ka BP when the sea was positioned at about -120 to -130 m. Since that time sea level has risen at an average rate of 1.2 cm/yr until 6.5 ka BP when the rate of sea level rise slowed (CORRÊA, 1996). At 5.6 ka the maximum sea level of the Postglacial Marine Transgression (± 2 m) was established subsequently followed by a slow sea-level fall (DILLENBURG et al., 2004).

Sands in the holocene beach deposits

The sediments of RS modern beaches are sands with more than 99 wt% of quartz, feldspars, and organic components, such as foraminifera tests - sometimes with radial incrustations of opaque minerals - and shell fragments. The sand grains are well rounded and sub-spheric; fine sands are predominant but the heavy detrital grains are concentrated in the very-fine sand fraction.

The heavy mineral contents in the sediments are generally lower than 1 wt% (Table 1) and in the very fine-sand fraction it varies from 0.04 to 9.60 wt%.

The heavy mineral contents in the very fine-sand fraction show the highest concentration in samples 3 and 4 and show a general decrease northwards. They

were identified as zircon, tourmaline, rutile, ilmenite, magnetite, epidote, sillimanite, kyanite, staurolite, garnet, amphibole, pyroxene, titanite and apatite. The location site of these two samples corresponds to the site of the well-known economic heavy minerals deposit of Bujuru (MUNARO, 1994, DILLENBURG et al., 2004).

Table 1 - Light and heavy mineral (wt%) in the barrier IV sediments. Numbers 1 to 11 represent location of samples (see Figure 1).

Light and heavy components (weight%) in the studied sands	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Light components	99.96	99.97	99.55	99.23	97.94	99.80	99.53	99.88	99.40	99.63	99.66
Heavy components	0.04	0.03	0.45	0.77	2.06	0.20	0.47	0.12	0.60	0.37	0.34
weight % of heavy minerals in the very fine-sand fraction	0.042	1.32	9.60	4.56	0.09	2.04	3.18	0.60	1.82	1.20	0.97

Zircon grains in the very-fine-sand fraction are colorless, pink, orange and rarely yellowish green, with sub-spheric and prismatic forms. Pinkish zircon occurs only in the southern part of the coast. Their abundance varies from 1 to 16 vol% in the very-fine sand fraction and the highest concentrations were observed in sample 5. They show variable roundness and crystalline forms and can be compositionally homogeneous or show complex zonings. Metamict grains are relatively rare.

Analytical techniques and data processing

Eleven samples were collected in April 2002 along 130 km of the northern RS coast, approximately at each 40 km. About 1 kg of sand was collected at each site at 25 cm of depth. Samples were washed, dried and about 80 g was taken from each one for granulometric analyses. The heavy fraction ($d > 2.89$) was weighted at granulometric intervals of $1/2\phi$. From the very fine sand fraction of each sample the heavy minerals were taken and separated according to their magnetic susceptibility. Zircons were taken mostly from the least magnetic fractions where they were concentrated.

Zircon grains were separated from the very-fine-sand fraction of eleven samples. About 50 grains from each concentrate were studied under microscope and

analyzed for SiO₂, HfO₂ and ZrO₂ through a Cameca SX50 electronic microprobe from the Center of Petrological and Geochemical Researches - CPGQ - in the Federal University of Rio Grande do Sul - UFRGS. Analytical conditions were: 15Kv, 25nA, beam diameter of 1 µm. Several grains were analyzed for phosphorous by Electron Microscopy in laboratories of the Center of Electronic Microscopy - UFRGS. Trace elements were determined in about 200 grains by LA ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer) in the laboratories of Kingston University, Kingston, UK under the supervision of Drs. Kym Jarvis and Kathryn Lange. The resin mounted samples used for electron microprobe analysis were also analysed by LA-ICP-MS. The laser used was a CETAC LSX100 Nd:YAG operating at 266nm. The laser power was optimised so that a clean, ablation pit was created during each ablation. Single spot analyses were performed with 3 replicate measurements being made during the 6s analysis time. ⁹⁰Zr was used as an internal standard and external calibration was carried out using NIST 610 glass. Results were blank corrected using 'gas' blanks collected at the start of each run. Data were processed manually using MS Excel.

Geochemical data were processed through conventional techniques - graphics and basic statistics - and by multivariate analysis through Principal Components Analysis (PCA) and Cluster Analysis. The PCA multivariate data analysis was performed in order to identify compositional parameters useful for discriminate groups of zircons from different sources, and the cluster analysis was applied to investigate the spatial and geographic distribution of these groups.

Chemistry of zircon grains

About 500 zircon grains were studied from 11 samples collected along the coast (Fig. 1) and trace element determinations in 155 grains from 10 samples were computed and considered in the following discussions.

Microprobe determinations of zircon major components show Si contents varying from 12.84 to 16.33 wt%, with most determination in the range from 15 to 15.5 wt%. Samples 3 and 4 show most of the zircon grains with high Si contents. Zr contents vary from 46 to 50 wt%. Zr contents lower than 44 wt% were observed in grains from samples 2 and 7. The phosphorous contents determined in the zircons grains by electron

microscopy - EDS- are lower than the limit of detection except for a few grains with higher magnetic susceptibility where it reaches up to 1.47 wt%.

Hf contents are in the range 0.1 to 2.3 wt%. Samples 1, 2, 4 and 11 show zircons with higher Hf contents, generally over than 1 wt%. Grains with maximum Hf contents - with more than 2.0 wt% - are only in sample 2, and Hf depleted zircons - with less than 0.1 wt% - are observed only in sample 3. Hf-depleted zircons show low contents of REE, Ta, Th, and U. Zircon grains with lower magnetic susceptibility show lower concentrations of Y and Nb (Fig. 2).

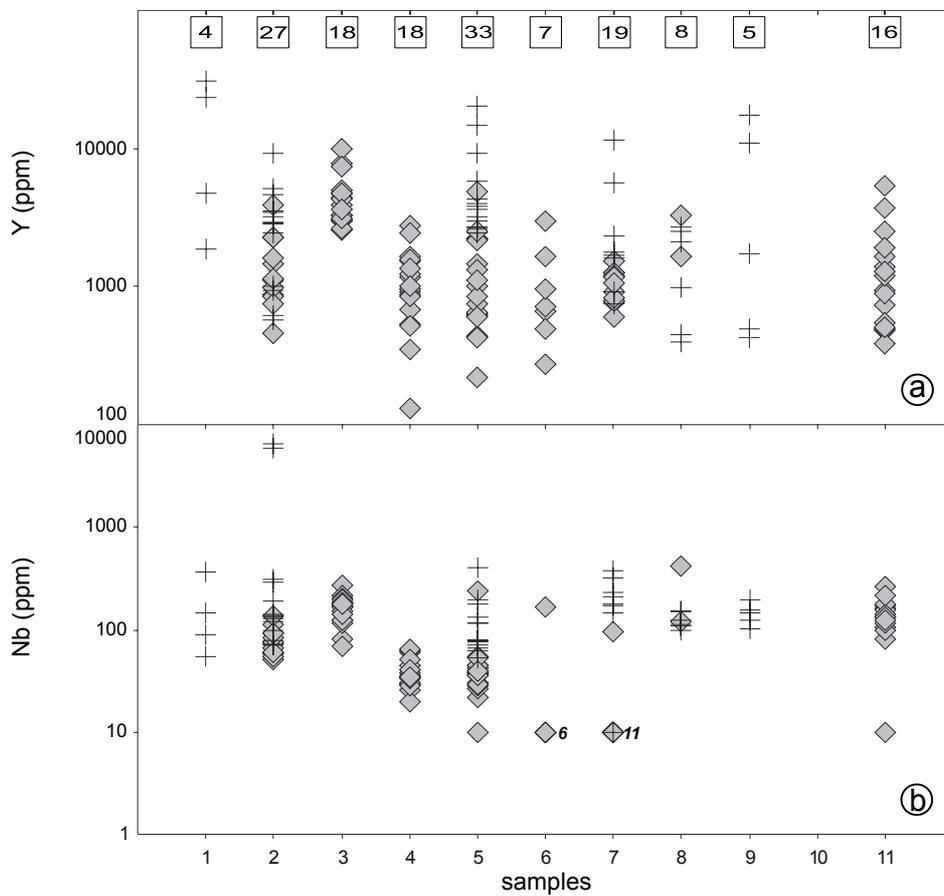


Figure 2 - Y and Nb content range in zircon grains from the sampled locations. Symbols: grains with higher (crosses) and lower (diamonds) magnetic susceptibility; \square and \diamond number of analyzed grains.

Interpretations of graphic correlation show that zircons with lower Si contents can have higher LREE contents (Fig. 3a). Th shows moderate to strong positive correlation with U, REE and Y (Fig. 4 a, b, c). REE show moderate positive correlation among themselves (Fig. 3b). Hence REE, Th, and U are enriched generally in those zircons with lower SiO₂ contents.

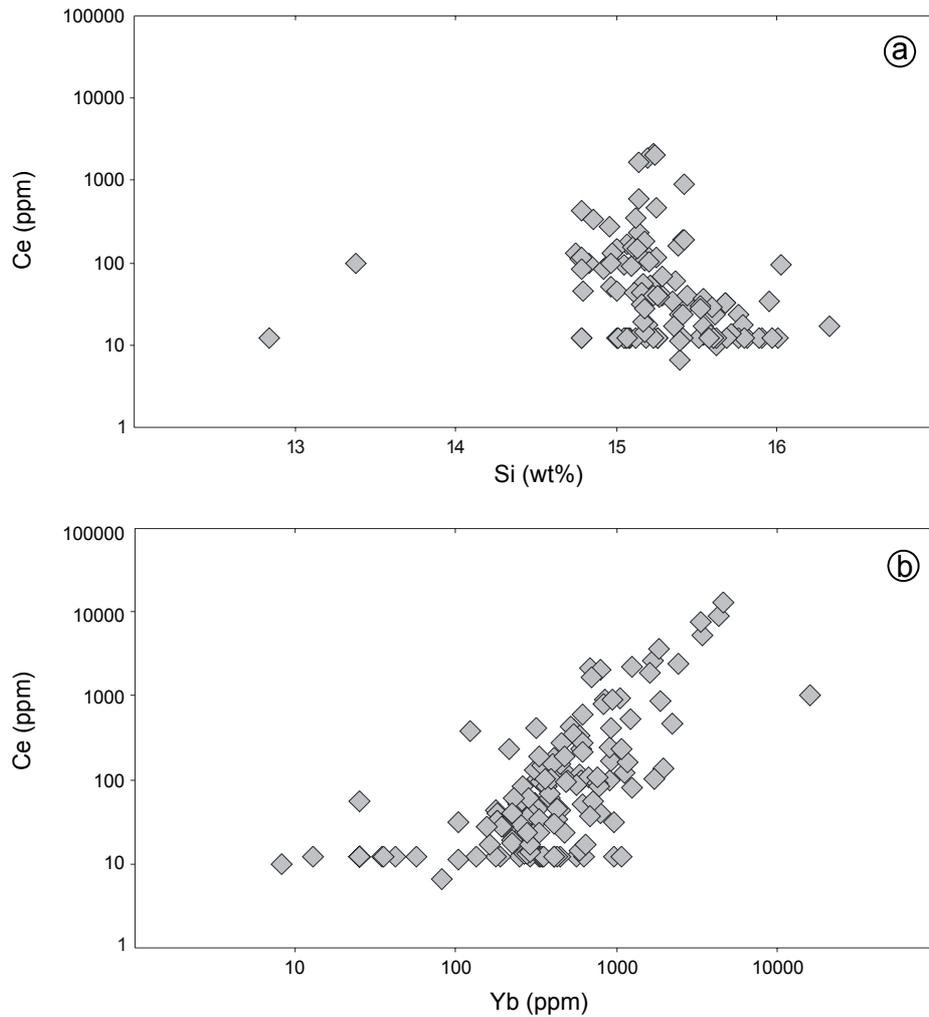


Figure 3 - LREE (Ce) content variation in relation to Si and HREE (Yb) contents.

Yttrium and rare earth elements

Chondrite normalized REE patterns showed by the zircon grains show variable Ce anomalies and enrichment of HREE elements - La_N/Lu_N ratios are mostly *ca* 0.01 - as expected from partition coefficient data for zircons from magmas with La_N/Lu_N ratios around 10. Zircon grains from samples 2, 5, and 7 with different magnetic susceptibility were compared for REE concentrations. Those with higher magnetic susceptibility generally show higher REE concentrations and more prominent positive Ce anomalies (Fig. 5).

Light rare earth elements - represented here by La - in the studied zircons show contents generally lower than 20 ppm (Fig. 6a). Samples 3, 4, and 11 show only zircons with low La contents - < 20 ppm, whilst moderate and high values are found

sporadically in the other samples. Zircons grains with La < 20ppm are predominant and found in all samples.

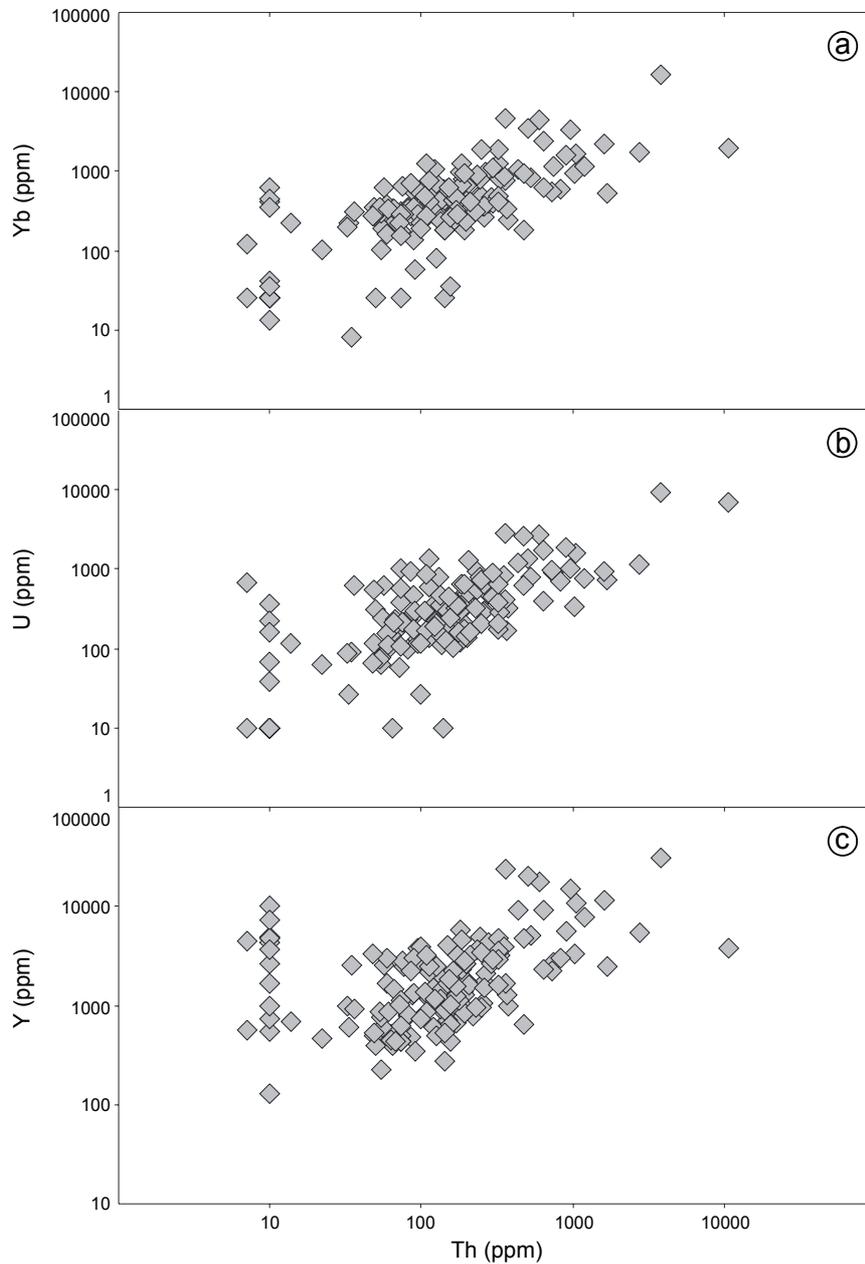


Figure 4: Variation of Th contents in relation to HREE (Yb), U and Y contents of zircon grains.

Sample 3 show zircons with very low HREE contents here represented by Yb (Fig. 6b). Most zircon grains, present in all samples, show concentrations of Yb in the range from 200 to 800 ppm. Yb-enriched zircons with contents over than 4,000ppm are more frequent in samples 1 and 9. The samples 1, 7, and 11 show only zircons with Yb contents over 250 ppm.

Zircon grains with yttrium contents under than 2,000 ppm are predominant in all samples except 1, and 3, where grains with more than 1,800 ppm are the most abundant (Fig. 2a). According to PUPIN (2000) zircons with $Y < 2,000$ ppm would come from granitoids of calc-alkaline to alkaline affinity, like those generated in collisional settings (HARRIS et al., 1986).

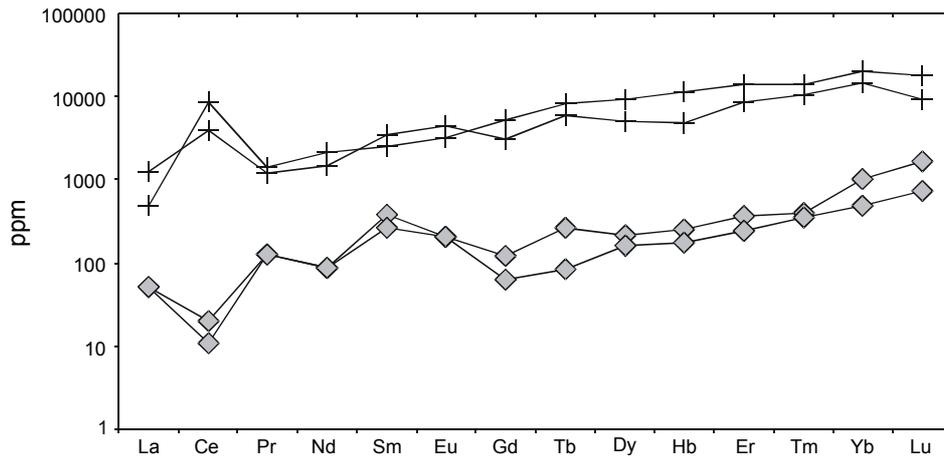


Figure 5 - Chondrite normalized REE patterns of zircon grains with different magnetic susceptibilities. Symbols: grains with higher (crosses) and lower (diamonds) magnetic susceptibility; □ number of analyzed grains.

Niobium, Thorium and Uranium

Nb contents of most of the studied zircons vary in the range 50 - 400, which is consistent with magmatic zircons from rocks with Nb contents in the range 10 to 80 ppm, which is reported in most metaluminous granitoids from within-plate or mature arc settings. Samples 4, 5, 6, and 7 show several grains with very low Nb contents lower than 60 ppm (Fig. 2b). Other samples show most zircons with Nb contents varying from 50 to 400 ppm. In the northern-coast samples (8 to 11) most zircon grains show more than 80 ppm of Nb.

Most samples contain zircons with variable U content, generally from 25 to 1000 ppm. Samples 1, 5, 9, and 11 show some grains with high U contents, higher than 2,600 ppm (Fig. 7a). Sample 1 shows only grains with U contents higher than 450 ppm. U shows sympathetic correlation with Th in the studied zircons (Fig. 4b). Samples 1 and 6 show only zircons with Th contents higher than 140 ppm, whilst in other samples the contents are generally under 400 ppm (Fig. 7b).

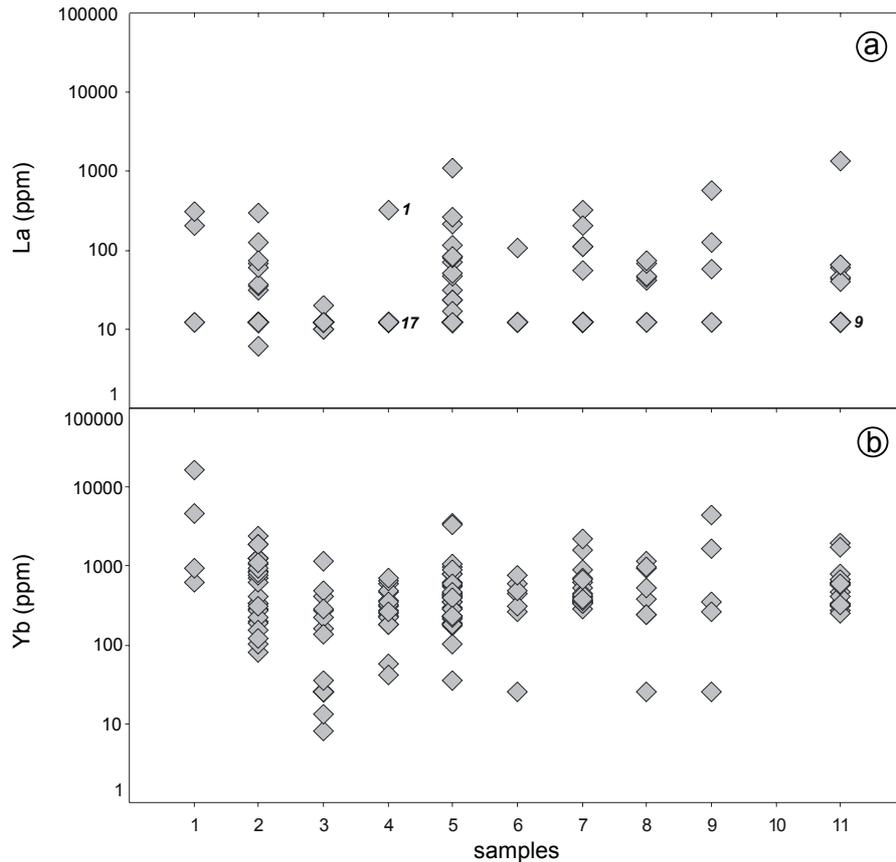


Figure 6 - Variation of La and Yb contents in zircon grains along the coast. 9 number of analyzed grains.

**Cart (classification and regression trees) zircon classification
(after BELOUSOVA et al., 2002)**

BELOUSOVA et al. (2002) proposed a cart for classifying zircons from different igneous sources, based upon their contents of Lu, Hf, U, Yb, and Y. Following their proposition distinct sources are suggested for the southern brazilian coastal sediments (Fig. 8).

12.90% of the zircon grains show Lu contents from 8 to 20.71 ppm and variable Hf, so they could be derived from syenites, kimberlites and carbonatites (Fig. 8). Those with the lowest Hf content, probably coming from syenites are in sample 3. Lu contents over than 601 ppm were found in three grains that could be derived from silica-undersaturated syenites (nepheline syenites and pegmatitic syenites). 10.32% of zircon grains, with Lu in between 20.71 and 601 ppm, show Hf lower than 8,000 ppm, and can be derived from basalts. They were found in samples from 5 to 9.

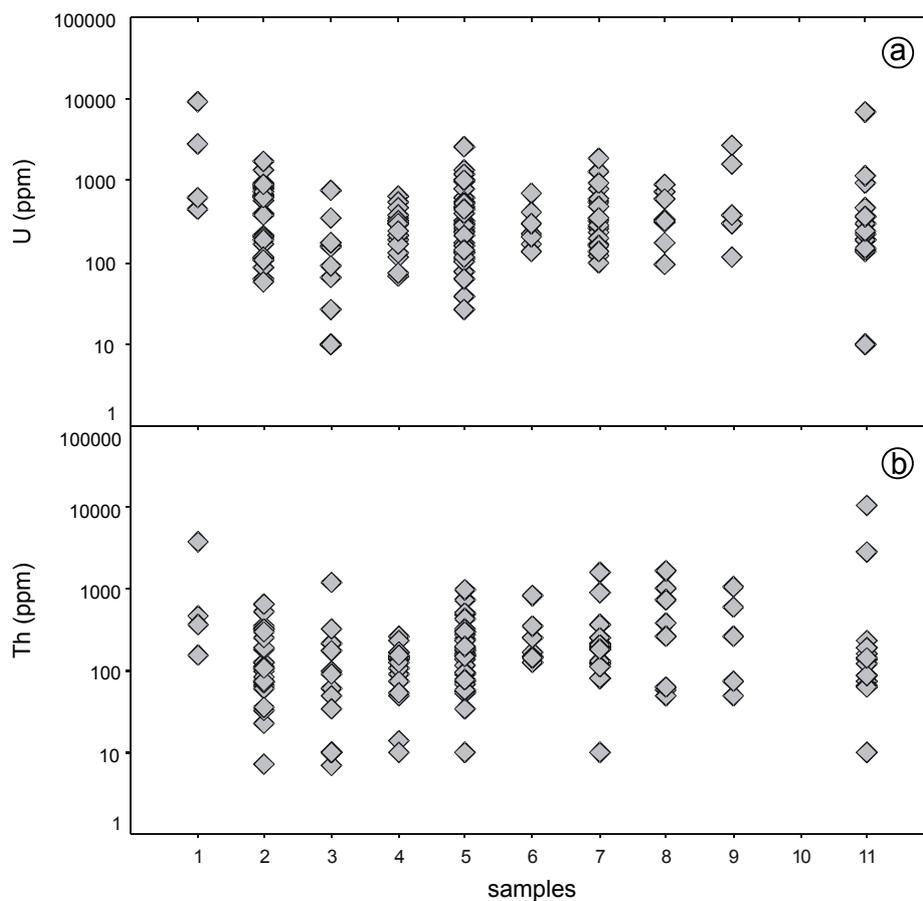


Figure 7 - Variation of U and Th contents in zircon grains along the coast.

9.67% of zircon grains show Y content over 4,433 ppm and variable U contents, so that they can be derived from highly differentiated granitoids or from syenites and monzonites (Fig. 8). The major part of zircon grains in the studied samples show Y contents under 4,433 ppm and Hf and Yb values variable in the ranges predicted by Belousova et al for dolerite, and granitoids with less than 75 wt% of SiO₂ in general. Sample 5 show most grains with Yb under 501, which suggests they are derived from granitoids with SiO₂ under 65 wt%, whilst in sample 2 most grains show Yb contents over 501, which suggest a granitic source with SiO₂ varying from 70 to 75 wt%.

Samples 6, 7, 8, and 9 have most of the zircons coming from dolerites and basalts, whilst in the others zircons from granitic rocks are predominant.

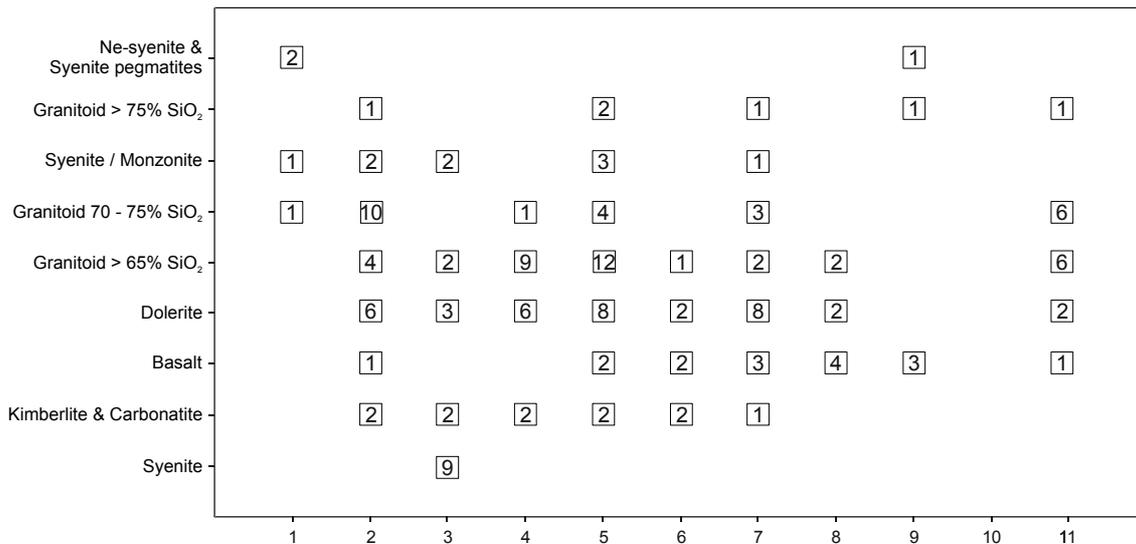


Figure 8 - Amount of the different zircon types, as classified according to BELOUSOVA et al. (2002) proposal, in the studied samples.

Th/U, Y/Ho, Nb/Ta, and Zr/Hf ratios in zircon grains

Zircons grains from southern - samples 1 to 5 - and northern coastal segments - samples 6 to 11 - show distinct patterns when trace element ratios are considered (Fig. 9).

Th/U ratios in zircon grains are mostly in the range 0.28-1.0 (Fig. 9a). Zircon grains with ratios over 1.0 were found in all samples except for samples 1 and 9. Very low values, under 0.12, were observed in the southern segment - samples 1 to 5 - whilst values from 0.12 to 0.25 were only found in the northern sector - samples 6 to 11. The samples 3 and 6 show only zircons with Th/U ratios over than 0.35.

This indicate that most zircon grains - Th/U ratios in the range 0.12 - 1.0 - come from granitoids; those with high Th/U ratios - larger than 1.0 - could be derived from mafic plutonic rocks, and eventually, those with very low ratios, observed in the southern sector, probably come from high-grade metamorphic sources, probably granulites or amphibolites.

A similar distribution is observed for Y/Ho ratios: lower values, from 8 to 35 are found mainly in the northern segment, whilst in the southern one predominate values from 19 to 50 (Fig. 9b). Values over 50 were observed only in samples 3 and 5. Zircons with low ratios, found mostly in the northern, could be derived from highly

evolved granitoids, whilst those with very high ratios can be derived from anorogenic sources.

Nb/Ta ratios in zircon grains from all set of samples are generally in the 5 to 15 range; some grains with Nb/Ta ratios over 20 were found in samples 2, 3 and 5, in the southern sector, whilst very low values under 5 are found mostly in the northern sector (Fig. 9c). The dominant low values are usual in zircons from orogenic granitoids, whilst the highest ones could indicate magmatic anorogenic sources.

Zr/Hf ratios vary from 40 to 70 except for some grains with lower ratios found in samples 2, 4, 7, and 11, and for some with ratios over 80 and low Hf contents that were found only in sample 3 (Fig. 9d). The lower Zr/Hf values can indicate granitic sources with high silica contents, whilst most zircon grains would come from orogenic granitoids. Very high Zr/Hf ratios, like those of sample 3, are usually derived from silica-undersaturated rocks.

Multivariate statistical analysis

Since the trace element contents of zircon grains are highly variable, which represent a serious prejudice for source identification, another discriminating parameter was tested through a multivariate statistical technique. A Principal Components Analysis identified six principal components (or Factors) reflecting most of the variation in trace element contents and represented by cluster tree and similarity. The Factor I was represented principally by Th and HRE elements, and involved 31% of the total minerals analyzed. So that, those zircon grains which are correlated with this factor constitute a group of grains where these elements have a sympathetic behaviour. In this way, it is possible to distinguish zircons, not by their trace element contents, but by the behavior of trace element sets, such as Th + HREE in group 1. Group 2 is characterized by sample correlation with LREE, in group 3 by correlation among Si, Hf and Gd, in group 4 by Nb and Sm. Two additional groups, 5 and 6, are constituted of a small number of samples. Group 4 zircons include those grains with the lowest Hf contents (lower than 6,000 ppm) and show lower Zr contents than groups 2, 3, 5 and 6. Zircons with high Zr/Hf and Y/Ho ratios were found in groups 1 and 4 and with high Th/U ratios only in group 1. Very low Th/U ratios (under 0.1) typical of metamorphic zircons are found only in groups 1 and 2. Th/U and Y/Ho ratios show a similar

behavior and Y/Ho reach maximum values in group 4 zircons. Zircons with the lowest contents of Hf and HREE are found in groups 1 and 4.

Zircon grains from groups 5 and 6 were observed only in sample 2, and from group 2 only in sample 7.

Group 3 zircons were observed in samples 2 and 7, whilst those of group 4 are present in samples 2, 3 and 5 and are predominant in sample 3.

Group 1 zircons are present in all samples and are the only constituents of samples 4, 6, 8, 9, and 11. This is the major group and probably is composed of zircons from granitic rocks.

Sources of detrital zircon grains

Following BELOUSOVA et al. (2002) criteria, zircons from syenites are present only in sample 3; zircons from carbonatites and kimberlites are rare but uniformly distributed in sediments from the southern part of the studied area. Zircons from basalts occur mainly in the northern sector; zircons from dolerites and granitoids with less than 65%SiO₂ are widespread in the sediments but predominate in the central segment of the coast; zircons from granites with SiO₂ higher than 65 wt% are observed in all samples; in sample 2 those from granitoids with SiO₂ contents between 70 and 75 wt% predominate; and zircons from undersaturated syenites were detected only in samples 1 and 9. According to these criteria samples 6 to 9 show most of the zircons as derived from dolerites and basalts, however, their Th/U, Zr/Hf, and Nb/Ta ratios, as well as their Nb, Hf and U contents are similar to those of zircons from granitoids.

The trace element geochemistry of zircon grains in the studied samples allows us to conclude that:

- the major part of the studied zircon grains is derived from orogenic granitoids, or more precisely, from granitoids related to a collisional setting. The moderate Nb content, low LREE (La), low Y content, and the moderate fractionation of REE patterns (La_N/Lu_N close to 10) of most grains is consistent with zircons from granitic rocks of within-plate post-collisional settings;
- zircons from metamorphic rocks, with low Th/U ratios, are present in the southern part of the studied coastal segment;

- basic to intermediate rocks were an additional source of zircons, which are identified by their higher Th/U and Y/Ho ratios, low U and Hf contents and a stronger correlation with group 4. These grains are more abundant in samples 2, 3 and 5 in the southern sector;

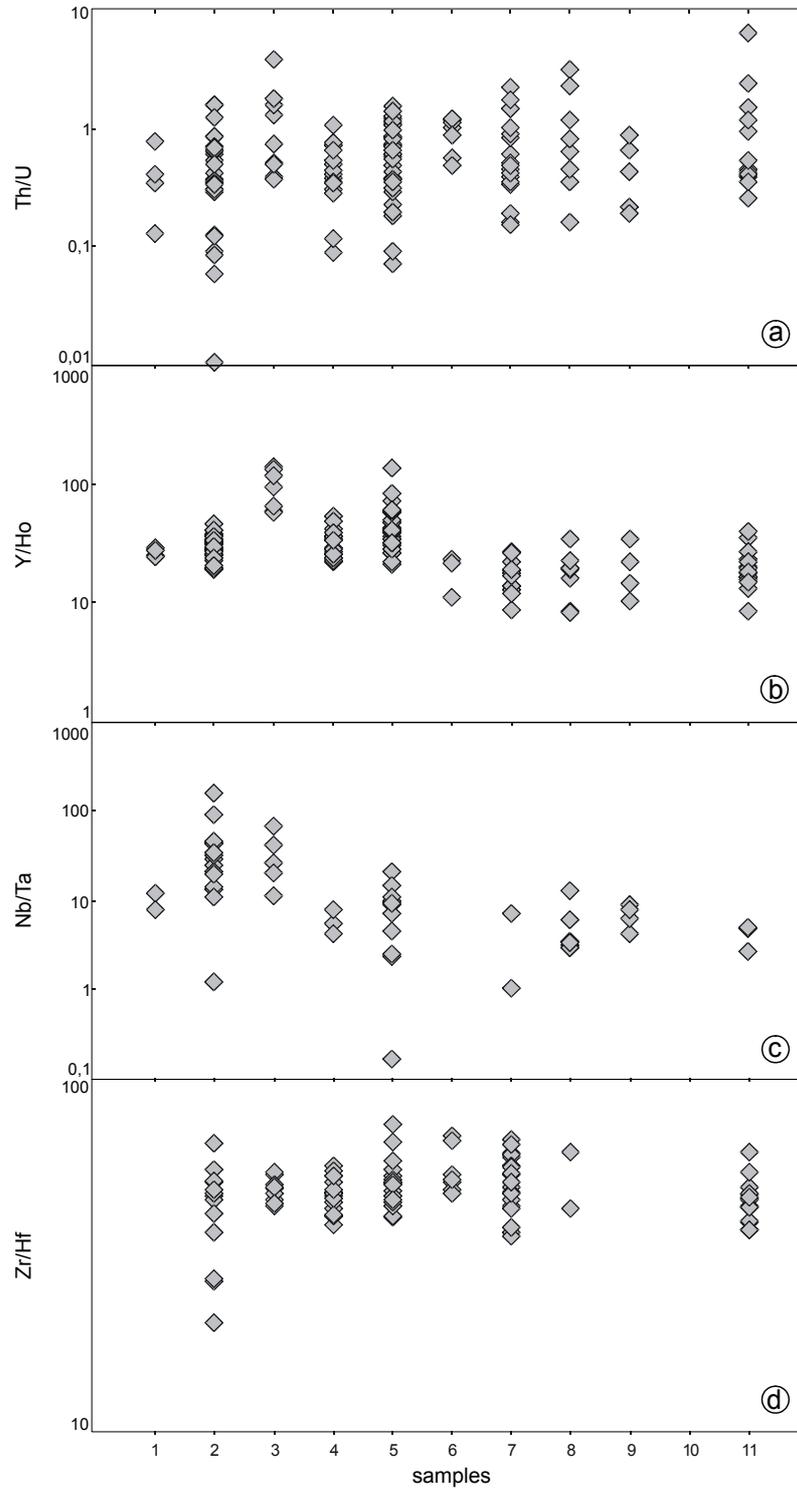


Figure 9 - Variation of Y/Ho, Th/U, Nb/Ta e Zr/Hf ratios in zircon grains from the studied samples. Grains with Zr/Hf ratios over 100 from sample 3 are not shown.

- zircons from sectors north and south of the sampled coastal segment have distinct dominant sources: zircons from the northern segment are compositionally more homogeneous, all belong to statistical groups 1, 2, and 3, show higher Nb contents, and metamorphic grains were not observed. The relatively low values of Th/U and Y/Ho ratios of some zircons in the northern sector suggest that highly evolved granites were present among the source rocks. In the southern segment there are zircons from statistical groups 1, 3, 4, 5, and 6, zircons from metamorphic rocks, and zircons with high Y/Ho and Nb/Ta ratios, which indicate they are derived from anorogenic igneous rocks;

- zircons from sample 3 show particular characteristics, which suggests they come from a distinct source: presence of zircon grains with high Zr/Hf ratios (>80), and Y/Ho ratios (>60), low HREE contents, high Y contents, and predominance of zircons from group 4. Zircon grains with Hf under than 1,000 ppm, very low U and Th, and extremely high Zr/Hf ratios, observed only in this sample, can come from silica-undersaturated basic to intermediate rocks.

Regional geology and potential sources of the studied zircons

RS continental areas nearby the studied sediments can be envisaged as constituted by the following major lithological associations: (1) anorogenic volcanic and plutonic rocks from the Parana Basin, (2) sedimentary rocks from the Paraná Basin, (3) High-grade metamorphic rocks from northeastern and southwestern parts of Sul-rio-grandense Shield, (4) Low- and medium-grade metamorphic rocks from central and eastern parts of Sul-rio-grandense Shield, (5) post-collisional volcanic and plutonic rocks from Neoproterozoic basins, (6) post-collisional granitic and associated mafic rocks from eastern Sul-rio-grandense Shield - Pelotas Batholith, (7) orogenic tonalite-diorite and associated orthogneisses from western and central parts of Sul-rio-grandense Shield, (8) post-collisional syenitic-quartz- monzonitic associations from northeastern parts of Sul-rio-grandense Shield, (9) anorogenic silica-undersaturated rocks from southeastern Sul-rio-grandense Shield.

Zircons from the southern sector of the studied area are probably derived from the Pelotas Batholith (6) and from high grade metamorphic rocks of the

northeastern part of Sul-rio-grandense Shield (3). Sample 3 show zircons which can be derived from anorogenic silica-undersaturated rocks (9).

Zircons in the northern sector samples are probably derived mainly of later granitoids of alkaline affinity, which are predominant in the northeastern part of the Pelotas Batholith (6). Zircons from basic rocks, more abundant in the southern sector, are probably derived from mafic Neoproterozoic rocks (6) associated to the granitic magmatism.

This zircon distribution suggests that in general modern beach sediments of Rio Grande do Sul are quite homogeneous in respect of their source rocks. However, sample 3 from southern sector show zircons derived from alkaline anorogenic rocks, which occur in the southern part of the Sul-rio-grandense shield. Also the northern sector shows zircons mainly derived from A-type granites that are predominant in the northeastern part of the RS shield. Thus, despite of a general homogeneity, a discrete and punctual mineralogical identity exists between beach sands of RS and nearby source rocks. This mineralogical identity with nearby inland source rocks allow us to present some important considerations concerning the RS coast: i) coastal processes (e.g. those related with longshore currents) were not effective enough to homogenize beach sediments of the study area; ii) this non-homogeneity of the modern beach sediments of RS might be a consequence of a relatively recent input of fluvial sediments into the continental margin of southern Brazil, which could be related with the last major sea-level lowstand ended at 17.5 ka; and iii) the Pleistocene age (123 ka – Last Interglacial) barrier of RS was sectioned by the main drainage systems during the last major sea-level lowstand, as previously suggested by CORRÊA (1995).

The distinct chemistry of zircons from sample 3 suggest that sediment in this place has a particular source, from silica-undersaturated basic to intermediate rocks, and confirm that it is possibly reflecting an influence of a paleo-channel of the Camaqua river over the present coastal area during events of sea level lowstands as pointed out by TOLDO JR. et al. (1991), CORRÊA (1996), WESCHENFELDER et al. (2006).

Conclusions

The chemistry of zircons from Holocene beach sands from RS, southern Brazil, is a relevant tool for investigating their probable igneous or metamorphic source.

The results obtained in this study are similar to those suggested by the zircon classification CART developed by BELOUSOVA et al. (2002), nevertheless, additional information and a more detailed characterization of zircon sources was yielded. Some conclusions based on the suggested CART are not consistent with other geochemical data, so that were not followed in this paper. The proposed zircon classification CART should be complemented with other geochemical criteria in order to produce more reliable results.

The probable geotectonic setting and geochemical affinity of zircon igneous-sources was predicted mainly based on Th/U, Y/Ho, Nb/Ta ratios, La and Nb contents, and REE patterns of zircons. The statistical groups identified by multivariate analysis were an additional useful tool for identifying compositional groups of zircons.

Trace element characteristics of zircons from the studied sediments indicate that their main primary source is an association of subalkaline to alkaline granitic rocks with their mafic counterparts and metamorphic rocks of amphibolite to granulite facies. The metamorphic sources were more important in the southern sector of the studied coastal segment. This sort of lithological association is found in the eastern part of Sul-rio-grandense Shield, the so-called Pelotas Batholith (PHILLIP et al., 2002) composed mainly of post-collisional rock associations of Neoproterozoic age, and Paleo to Neoproterozoic high-grade metamorphic sequences. The higher abundance of granitoids of alkaline affinity, A-type granitoids, in the northeastern part of the batholith, explains the predominance of Nb-enriched zircons in the northern sector. The compositional variations of zircons from southern to northern sector are coherent with the hypothesis that the studied sediments came from relatively near continental source areas, probably delivered to the RS continental margin by several small streams and rivers during the last sea level lowstand ended at 17.5 ka.

Acknowledgments - This research was supported by CNPq- Universal Program (project n^o 471867/2003-9) and project 453061/2003-6. The CNPq GRANT for LVSN and for SRD was also important for the financial support of this research.

References

- BARROS, C.E.; NARDI, L.V.S. and DILLENBURG, S.R., 2005. Geoquímica de Minerais Detríticos em Estudos de Proveniência: Uma Revisão. *Pesquisas*, 32(1), 03-15.

- BAU, M., 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123, 323-333.
- BELOUSOVA, E.A.; GRIFFIN, W.L.; O'REILLY, S.Y. and FISHER, N.I., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator on source rock type. *Contribution Mineral Petrology*, 143, 602-622.
- CATALÁN, J.R.M., FERNÁNDEZ-SUÁREZ, J., JENNER, G.A., BELOUSOVA, E.A. and MONTES, A., 2004. Provenance constraints from detrital zircon U-Pb ages in the NW Iberian Massif: implications for Paleozoic plate configuration and Variscan evolution. *Journal of the Geological Society*, 161(3), 463-476.
- CORRÊA, I.C.S., 1996. Les Variations Du Niveau de La Mer Durant Les 17.500 Ansbp: L'Exemple de La Plate-Forme Continentale du Rio Grande do Sul-Bresil. *Marine Geology*, 130(1/2), 163-178.
- DILLENBURG, S.R., ROY, P.S., COWELL, P.J. and TOMAZELLI, L.J., 2000. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the Shoreface Translation-Barrier Model (STM). *Journal of Coastal Research*, 16, 71-81.
- DILLENBURG, S.R.; ESTEVES, L.S, and TOMAZELLI, L.J., 2004. A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76(3), 611-623.
- DUDDY, I.R. and KELLY, P.R., 1999. Uranium in mineral sands: measurement and uses. Australian Institute of Geoscientists Bulletin, Australia, 26:1-5. Disponível em: <http://www.geotrack.com.au/minsand.htm>. Acesso em: 27 jul. 2003.
- FONTANA, E.L., 1990. Investigações geofísicas preliminares sobre o Cone de Rio Grande, Bacia de Pelotas - Brasil. *Acta Geológica Leopoldensia*, 13(30), 161-170.
- FUJIMAKI, H., 1986. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite and liquid. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94, 42-45.
- GEHRELS, G.E., 2003. Detrital zircon constraints on sediment dispersal patterns in Western North America. Seattle Annual Meeting, Washington, Paper n. 159-2. Disponível em: http://gsa.confex.com/gsa/2003AM/finalprogram/abstract_60016.htm. Acesso em: 23 jan. 2004.
- HARRIS, N.W.B., PEARCE, J.A., and TINDLE, A.G., 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M.P. and Ries, A.C. (ed.), *Collision Tectonics*. Geological Society of London, Special Paper, 19, 115-158.
- HEAMAN, L.M.; BOWINS, R. and CROCKET, J., 1990. The chemical composition of igneous zircon suites: Implications for geochemical tracer studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 1597-1607.
- HINTON, R.W. and UPTON, B.G.J., 1991. The chemistry of zircon: variations within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(11), 3287-3302.

- HOSKIN, P.W.O. and BLACK, L.P., 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(2), 423-439.
- HOSKIN, P.W.O. and IRELAND, T.R., 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28(7), 627-630.
- HOSKIN, P.W.O. and SCHALTEGGER, U., 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53, 27-62.
- LINNEN R L. and KEPPLER, H., 2002. Melt composition control of Zr/Hf fractionation in magmatic processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(18), 3293-3301.
- LINNEN, R.L. and KEPPLER, H., 1997. Columbite solubility in granitic melts: consequences for the enrichment and fractionation of Nb and Ta in the Earth's crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128: 213-227.
- LOSS, E. and DEHNHARDT, E.A., 1983. Concentração de areias negras ao longo da costa do Rio Grande do Sul – Áreas Fontes: Geologia e Contribuição Mineralógica. *Acta Geológica Leopoldensia*, 7(14), 93-130.
- MAHOOD, G. and HILDRETH, W., 1983. Large partition coefficients for trace elements in high-silica rhyolites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 11-30.
- MARTINS DA SILVA, da M.A., 1979. Provenance of heavy minerals in beach sands, southeastern Brazil: from Rio Grande to Chuí (Rio Grande do Sul State). *Sedimentary Geology*, 24(1-2), 133-148.
- MORTON, A.C.; WHITHAM, A.G. and FANNING, M.C., 2005. Provenance of Late Cretaceous-Paleocene submarine fan sandstones in the Norwegian Sea: integration of heavy mineral, mineral chemical and zircon age data. *Sedimentary Geology*, 182, 3-28.
- MOTTA, V.F., 1969. Relatório-diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela barra de Rio Grande. Porto Alegre: *Instituto de Pesquisas Hidráulicas*, UFRGS. (Inédito).
- MUNARO, P., 1994. Geologia e Mineralogia do Depósito de Minerais Pesados de Bojuru - RS. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 96 p
- MURALI, A.V., PARTHASARATHY, R., MAHADEVAN, T.M. and SANKAR das M., 1983. Trace element characteristics, REE patterns and partition coefficients of zircons from different geological environments – a case study on Indian zircons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 2047-2052.
- NARDI, L.V.S., LIZ, J.D., LIMA, E.F., FORMOSO, M.L.L. and JARVIS, K., 2005. Geochemistry of Rare Earth Elements in zircons from the Lavras do Sul Shoshonitic Association, Southernmost Brazil. In: *X Congresso Brasileiro de Geoquímica* (Porto de Galinhas, Recife), Extended Abstracts, v. 1.
- PHILIPP, R.P.; MACHADO, R.; NARDI, L.V.S. and LAFON, J.M., 2002. O Magmatismo Granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no Sul do Brasil: Novos Dados e Revisão da Geocronologia Regional. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(2), 277-290.

- PUPIN, J.P., 2000. Granite genesis related to geodynamics from Hf-Y in zircon. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91, 245-256.
- RUBATTO, D., 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184, 123-138.
- RUBATTO, D. and HERMANN, J., 2003. Zircon formation during fluid circulation in eclogites (Monviso, Western Alps): Implications for Zr and Hf budget in subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(12), 2173-2187.
- SHUKLA, B., 1988. Provenance of Oligocene Lough Neagh Group, Northern Ireland. United Kingdom (abstract). In: James, D.P. and Leckie, D.A. (eds) Sequences, stratigraphy, sedimentology: surface and subsurface. *Memoir of the Canadian Society of Petroleum Geologists*, 15, 583-584.
- THOMAS, J.B.; BODNAR, R.J.; SHIMIZU, N. and SINHA, A.K., 2002. Determination of zircon/melt trace element partition coefficients from SIMS analysis of melt inclusions in zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(16), 2887-2901.
- THOMAS, W.A.; BECKER, T.P.; SAMSON, S.D. and HAMILTON, M.A., 2004. Detrital Zircon Evidence of a Recycled Orogenic Foreland Provenance for Alleghanian Clastic-Wedge Sandstones. *Journal of Geology*, 112:23-37.
- TOLDO JR., E.E.; AYUP-ZOUAIN, R.N.; CORRÊA, I.C.S. and DILLENBURG, S.R., 1991. Barra Falsa: Hipótese de um Paleocanal holocênico de Comunicação entre a Laguna dos Patos e o Oceano Atlântico. *Pesquisas*, 18(2), 99-103.
- TOLDO JR., E.E.; DILLENBURG, S.R.; ALMEIDA, L.E.S.B. TABAJARA, L.L.; MARTINS, R.R. and CUNHA, L.O.B.C., 1993. Parâmetros Morfodinâmicos da Praia de Imbé, RS. *Pesquisas*, 20(1), 27-32.
- TOMAZELLI, L.J. and VILLWOCK, J.A., 1992. Considerações Sobre o Ambiente Praial e a Deriva Litorânea de Sedimentos ao Longo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, 19, 3-12.
- TOMAZELLI, L.J.; VILLWOCK, J.A.; DILLENBURG, S.R.; BACHI, F.A. and DEHNHARDT, B.A., 1998. Significance Of Present-Day Coastal Erosion And Marine Transgression, Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70(2), 221-229.
- TYLER, S.A.; MARSDEN, R.W.; GROUT, F.F. and THIEL, G.A., 1940. Studies of the Lake Superior pre-Cambrian by accessory-mineral methods. *Bulletin Geological Society of American*, 51, 1429-1538.
- VEEVERS, J.J., SAEED, A., BELOUSOVA, E.A. and GRIFFIN, W.L., 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton. *Earth Science Review*, 68, 245-279.
- VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; HORN, N.O.; BACHI, F.A. and DEHNHARDT, B.A., 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. (ed.). *Quaternary Of South America and Antartic Peninsula*. A.A. Balkema, Rotterdam. v. 4, pp. 79-97.

- VILLWOCK, J.A.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; TOMAZELLI, L.J. and HOFFMEISTER, T., 1979. Concentraciones de arenas negras a lo largo de la costa de Rio Grande do Sul. *Memorias del seminario sobre ecología bentónica y sedimentación de la plataforma continental del atlántico sur* (Montevideo) pp. 407-414.
- VITANAGE, P.W., 1957. Studies of zircon types in the Ceylon pre-Cambrian complex. *Journal of Geology*, 65, 117-128.
- WESCHENFELDER, J.; MEDEANIC, S.; CORRÊA, I.C.S. and ALIOTTA, S., 2006. Holocene paleoinlet of the Bojuru region, Lagoa dos Patos. *Journal of Coastal Research*, 22(3), 171-181.

CAPÍTULO 4

**DISTRIBUIÇÃO E ORIGEM DOS MINERAIS DETRÍTICOS
PESADOS DAS AREIAS PRAIAIS HOLOCÊNICAS DO LITORAL
NORTE DO RIO GRANDE DO SUL**

Carla Ennes de Barros, Lauro V S Nardi, Sergio R Dillenburg, Ricardo Baitelli &
Beatriz Appel Dehnhardt

Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica
Instituto de Geociências
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Agronomia
91509-900 - Porto Alegre – Brazil
carla.barros@ufrgs.br

Resumo A geoquímica de minerais detríticos de sedimentos é uma ferramenta de importância crescente em estudos de proveniência. Neste trabalho é testada e discutida sua aplicação na identificação das fontes primárias dos minerais pesados detríticos das areias de praias holocênicas do sul do Brasil. Ao longo do litoral norte do Rio Grande do Sul, foram coletadas 5 amostras de areia a cada 40km. Os grãos de zircão foram separados e analisados por LA-ICP-MS, por microsonda eletrônica e MEV. Piroxênios, epidotos, anfibólios, granadas e turmalinas foram analisados para seus principais componentes químicos com microsonda eletrônica. A interpretação dos dados de elementos maiores e traços nos minerais estudados permitiu uma precisa e acurada definição de suas potenciais fontes primárias. A composição dos piroxênios indica fontes metamórficas de fácies granulito e rochas básicas toleíticas pós-colisionais. Rochas metamórficas metapelíticas e margosas de fácies granulito e anfíbolito são fontes importantes e tem sua participação indicada pela presença de estauroлита, rutilo, silicatos de alumínio, granadas (almandina e grossulária), zoisita, turmalinas cálcicas e cumingtonita presentes em praticamente todas amostras. Granitóides do tipo A são fontes indicadas pela presença de zircões com alto teor de Nb e ETR, por razões Nb/Ta superiores a 20, e por anfibólios com alta razão Fe/(Fe+Mg). Granitóides peraluminosos têm sua presença nas áreas fontes indicadas por granada rica em espessartina e turmalina rica em ferro, enquanto, granitóides shoshoníticos e

subalcalinos médio e alto-K, tem sua participação sugerida pela presença de epidoto magmático, titanita, anfíbólios cálcicos com razões Fe/(Fe+Mg) moderadas e zircões com razões Th/U de 0,3–0,5 e Nb/Ta entre 5–15. Anfíbólios magnesianos indicam a contribuição de fontes ultramáficas. Rochas hidrotermalizadas são também constituintes das áreas fontes e tem sua presença apontada por turmalinas litiníferas, actinolita e epidoto hidrotermal. A homogeneidade dos tipos e abundâncias dos minerais detríticos em todas amostras do litoral norte indicam uma área fonte comum para esses sedimentos praias, embora possa haver o predomínio local de fontes como por exemplo, as hidrotermalizadas na porção mais a sul. O extremo nordeste do Batólito Pelotas constituído predominantemente pelas suítes graníticas Encruzilhada do Sul, Cordilheira e *greisens* associados, Viamão e Dom Feliciano e pelo complexo metamórfico Várzea do Capivarita é a provável área fonte primária potencial dos sedimentos estudados. A pesquisa realizada demonstra que a química mineral de zircões e dos demais minerais utilizados pode produzir informações detalhadas quanto à área fonte primária de minerais pesados detríticos, constituindo poderosa ferramenta para este tipo de investigação.

Palavras chave: proveniência, química mineral, minerais detríticos, planície costeira do Rio Grande do Sul, sedimentos praias.

Abstract The geochemistry of detrital minerals in sediments has an increasing importance in provenance studies. This study discusses the primary sources of detrital heavy minerals of the Holocenic beach sediments from southern Brazil, based mainly on their chemical composition. Five samples of beach sand were collected at each 40km along the northern littoral of Rio Grande do Sul state. Zircon grains from these samples were analysed for trace elements by LA-ICP-MS, and for major elements by microprobe and electron microscopy. Pyroxene, amphibole, epidote, garnet, and tourmaline from the northern segment samples were analysed for their main components by electron microprobe. The interpretation of trace and major elements in the studied minerals led to an accurate determination of their potential primary sources. The pyroxene compositions indicate the contribution of metamorphic sources of granulite facies and of basic rocks formed at post-collisional settings. High grade metapelitic rocks and amphibolites are important sources suggested by the occurrence of staroullite, rutile, aluminium silicates, almandine, grossular, zoisite, Ca-rich tourmaline, and commingtonite, in the whole set of samples. A-type granitoids are

abundant in the source area as indicated by zircons with high Nb and ETR contents, and Nb/Ta ratios greater than 20, and, by amphiboles with Fe/(Fe+Mg) higher than 0.9. Peraluminous granitoids have their presence in the source indicated by Mn-rich garnet and Fe-rich tourmaline, whilst the occurrence of shoshonitic and medium to high-K subalkaline granitoids is pointed out by magmatic epidote, titanite, calcic amphiboles with moderate Fe/(Fe+Mg) ratios and zircons with Th/U in the range 0.3–0.5, and Nb/Ta varying from 5 to 15. Magnesian amphiboles indicate ultramafic sources. Hydrothermal products are also indicated in the primary sources by the occurrence of Li-rich tourmaline, actinolite, and hydrothermal epidotes. The homogeneity of abundance and typology of detrital minerals in the northern littoral indicate a common source for the studied sediments, although, in some places a localised source may be important, such as the hydrothermally altered rocks for the southern segment. The northeastern part of the Pelotas Batholith, composed of Encruzilhada do Sul, Cordilheira, Viamão e Dom Feliciano granitic suites, with associated greisens, and of the Varzea do Capivarita metamorphic complex is the probable source region. This study confirms that the mineral chemistry of zircons, including trace elements, and of the other studied minerals can yield detailed and accurate information about the primary source of heavy detrital minerals, and so be of high relevance for provenance studies.

Key words: provenance, mineral chemistry, detrital minerals, coastal plain of Rio Grande do Sul, beach sediments.

Introdução

Os primeiros trabalhos referentes à presença de minerais pesados, ao longo da planície costeira do Rio Grande do Sul, foram os de Delaney (1965) e Martins (1967). Abreu (1973) descreveu a existência de areias ilmeníticas na área de Santa Vitória do Palmar. Pomerancblum & Costa (1972) estudando os minerais pesados da plataforma continental da região do Rio Grande até o Chuí, determinaram que estes sedimentos da região interna da plataforma provinham de rochas metamórficas e os da região externa principalmente de rochas básicas.

Martins da Silva (1979) estudou a origem dos minerais pesados presentes nas areias de praia entre Rio Grande e Chuí, concluindo que esta assembléia

mineralógica teve como área fonte primária as rochas do Escudo Sul-rio-grandense e as basálticas da formação Serra Geral.

Villwock *et al.* (1979) estudando as areias negras ao longo da costa do Rio Grande do Sul propuseram que estes sedimentos são derivados de rochas metamórficas e ígneas do Escudo Sul-rio-grandense e de formações sedimentares e cobertura vulcânica de idade Paleozóica a Mesozóica. Loss & Dehnhardt (1983) confirmaram esta proposição a partir de estudos da concentração das areias negras.

Munaro (1994) estudou os minerais pesados da região de Bojuru (litoral médio do Rio Grande do Sul) e sugere sua fonte primordial é derivada do leque deltáico associado à paleodrenagem do Rio Camaquã na plataforma interna, cujos sedimentos foram retrabalhados e redepositados no decorrer das variações eustáticas posteriores. Também propõe que os minerais de interesse econômico (ilmenita, leucoxênio, rutilo, zircão e cianita) provêm das rochas do Escudo Sul-rio-grandense, enquanto os minerais pesados derivados dos basaltos da Formação Serra Geral são a magnetita e titanomagnetita.

Dillenburg *et al.* (2004) propõe que a formação do placer de Bojuru se dá pelo retrabalhamento dos depósitos da planície costeira existentes e pela retenção, em Bojuru, de parte dos minerais pesados transportados pelas correntes costeiras (deriva litorânea).

Tomazelli (1978) estudando os minerais pesados da plataforma continental classifica-os em quatro províncias diferentes: Rio-grandense interna que apresenta como área fonte o Escudo Sul-rio-grandense; Patos cuja fonte seriam os rios que deságuam na lagoa dos Patos; Rio-grandense externa da qual a fonte seria de rios provenientes do continente (escudo e basalto) em épocas de nível do mar mais baixo e Platina originada pelo rio de La Plata em níveis de mar mais baixo.

Corrêa *et al.* (2001) estudaram os minerais pesados nos sedimentos de fundo da plataforma continental sul-brasileira e baseado na composição mineralógica propõe como fontes rochas metamórficas e basálticas, sedimentos pampeanos-patagônicos e rochas do Escudo sul-rio-grandense e uruguaio.

Ayup-Zouain *et al.* (2001 e 2002) com base na identificação dos minerais pesados presentes nos sedimentos superficiais da plataforma continental adjacente a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, sugerem quatro fontes de proveniência destes minerais: sedimentos de origem Pampeano-patagônico (na parte mais a sul), sedimentos Guaraní formados por sistemas de drenagem do setor central do Escudo Sul-rio-

grandense em direção aos basaltos para o norte, sedimentos Gaúchos formados por rochas metamórficas e de metamorfismo de contato, e sedimentos Platenses derivados das rochas do Escudo Sul-rio-grandense e Uruguaio a partir de paleodrenagem continental adjacente ao estuário do Plata.

A proveniência destes minerais pesados foi estudada no passado, mas somente conclusões muito gerais foram apresentadas, sugerindo a origem destes minerais com rochas ígneas, metamórficas e sedimentares que se encontram nas terras altas adjacentes (Martins da Silva 1979, Villwock *et al.* 1979, Loss & Dehnhardt 1983). Os estudos de proveniência no mundo nos últimos anos são focados na química dos minerais pesados. Em muitos destes trabalhos, as propriedades químicas do zircão tem sido consideradas como uma promissora ferramenta para estudos de proveniência. Belousova *et al.* (2002), Rubatto (2002), Hoskin & Schaltegger (2003), Gehrels *et al.* (2003).

A costa do Rio Grande do Sul

A margem continental do sul do Brasil constitui um limite de placa formada nos primórdios do Cretáceo. No Rio Grande do Sul (entre 29° e 34° de latitude sul) a deposição de uma grande quantidade de sedimentos clásticos pós-*rift*, gerou uma ampla plataforma continental (100 a 200 km), rasa (100 a 140 m) e de mergulho suave (0,03° a 0,08°). Registros sísmicos da parte superior do talude revelaram uma espessura sedimentar de no mínimo 10 km (Fontana 1990). Na parte continental, durante o Quaternário, formou-se uma planície costeira de baixo relevo pela justaposição de depósitos sedimentares de quatro sistemas do tipo barreira-laguna designados por Villwock *et al.* (1986) de I (o mais antigo) a IV (o mais novo). A planície costeira varia de 20 a 80 km de largura bordejada por depósitos de leques aluviais e altos topográficos rochosos (Fig. 1). O clima é úmido com temperaturas variando de amenas a muito quentes no verão e muito frias no inverno. As precipitações oscilam entre 1000 e 1500 mm sendo uniformemente distribuídas por todo o ano.

O extremo sul do Brasil é sujeito a regime de ondas do tipo *swell*, geradas nas latitudes sul e também por ondas do tipo *sea* (vagas) formadas pela ação do vento nordeste. A altura média das ondas é de 1,5m medida entre as profundidades de 15 a 20 m (Motta 1969). O transporte litorâneo é para Norte. Apresenta ainda, regimes

de micromarés semidiurnas com variação de apenas 0,5 m. Atualmente, as praias do Rio Grande do Sul (RS) recebem muito pouca areia do continente, porque a maior parte do aporte sedimentar feito pelos poucos riachos e rios que drenam a costa é retido nas lagoas e outros ambientes da planície costeira (Tomazelli *et al.* 1998). Devido a mudanças na orientação da linha de costa, e na morfologia interna e no gradiente da plataforma continental interna, as praias do RS são expostas a diferentes graus de energia de ondas (Dillenburg *et al.* 2004).

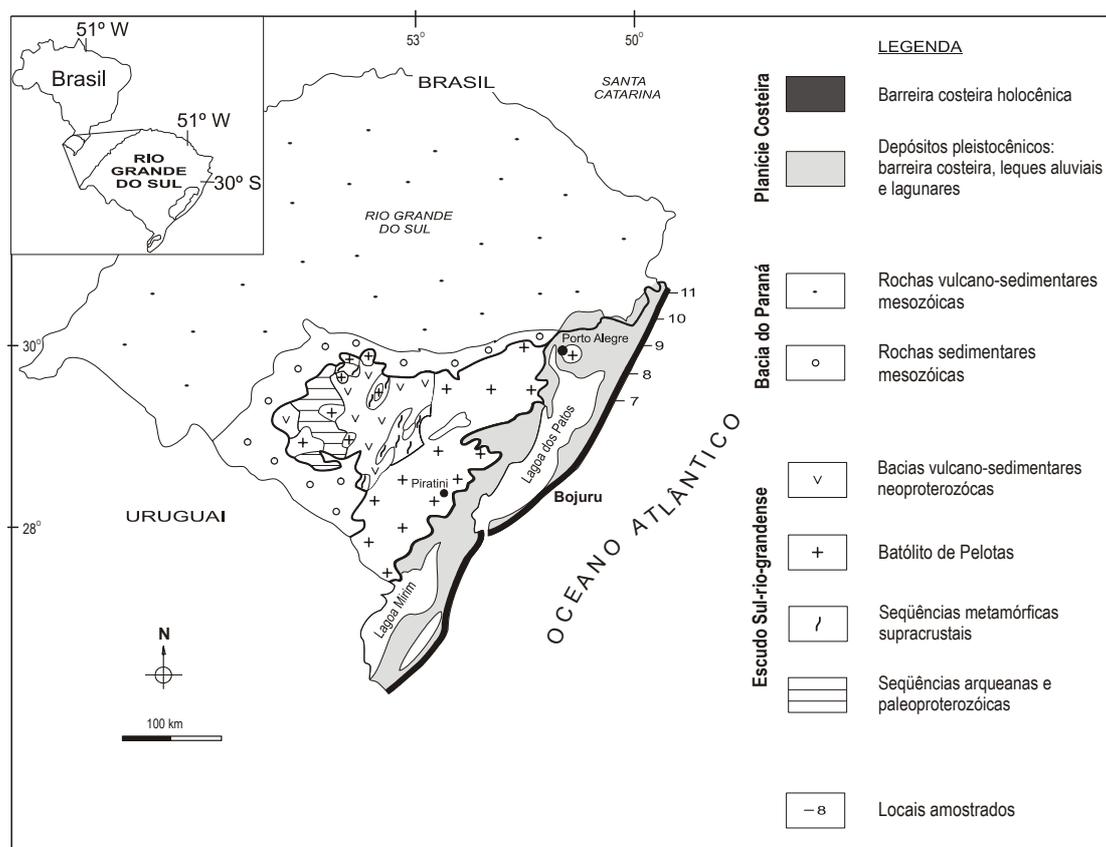


Figura 1: Mapa da Planície Costeira do Rio Grande do Sul e a localização das amostras.

Amostragem e procedimentos analíticos

Em abril de 2002, ao longo do litoral norte, numa extensão de 160 km, foram coletadas 5 amostras de areia a cada 40km. Estas amostras, com em torno de 1kg, foram retiradas da face de praia. Em laboratório, foram lavadas, para a retirada do sal, secas em estufa a 50°C e, posteriormente, quarteadas e reduzidas a sub-amostras com 70-90g. A parte quarteadas foi separada em intervalo de 1φ. Cada intervalo foi pesado em

balança de precisão e submetido à separação dos minerais pesados com bromorfômio ($d=2,83\text{g/cm}^3$). A maior quantidade de minerais pesados encontra-se no intervalo $\phi=4,00-3,25$ (areia muito fina), razão pela qual este foi o intervalo analisado. Os minerais magnéticos (magnetita) foram separados com um ímã de mão. A fração menos magnética foi levada ao separador isomagnético Frantz para a separação de frações em diferentes intervalos de susceptibilidade magnética, utilizando amperagens diversas. Em cada intervalo, em lupa binocular, foram descritos e separados manualmente os diferentes minerais. As suítes de minerais selecionados foram preparadas em pastilhas para análises químicas por microsonda eletrônica, visando caracterizar as espécies minerais presentes e suas variações composicionais.

Os minerais estudados foram: zircão, piroxênio, anfibólio, epidoto, turmalina e granada.

O zircão foi estudado detalhadamente por Barros *et al.* (submetido). Nos demais minerais (TABELA 1), as análises foram feitas para os principais componentes químicos dos minerais com microsonda eletrônica – Cameca SX50 – do Centro de Pesquisas de Petrologia e Geoquímica – CPGQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

TABELA 1: Número de grãos e elementos químicos analisados dos diferentes minerais em cada amostra.

Total de grãos analisados	anfibólio	piroxênio	epidoto		granada	turmalina
	115	57	epidotos 108	zoisita 27	39	50
Amostra 11	40	26	41	12	17	25
Amostra 10	14	8	20	-	13	4
Amostra 9	31	13	22	1	3	2
Amostra 8	24	9	10	2	5	3
Amostra 7	6	1	15	12	1	16

Distribuição da variação granulométrica dos minerais leves e pesados ao longo do litoral

Ao longo de toda a área predominam sedimentos de granulação correspondente a areias (TABELA. 2). A distribuição modal dos minerais pesados (MP) ocorre no intervalo de areia muito fina ($AMF=4-3,25\phi$), e a dos minerais leves

predomina no intervalo da Areia Fina (AF= 3-2,25 ϕ). A mineralogia detrítica pesada é composta de: zircão, turmalina, rutilo, titanita, ilmenita, magnetita, epidoto, silimanita, cianita, estaurolita, granada, anfibólio, piroxênio e apatita e a mineralogia leve por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e material orgânico como carapaças de foraminíferos.

TABELA 2: Percentagem em peso dos minerais leves e pesados nas frações areia muito fina, fina e média.

	LEVES			PESADOS		
	Areia Muito Fina	Areia Fina	Areia Média	Areia Muito Fina	Areia Fina	Areia Média
	$\Phi=4,00-3,25$	$\Phi=3,00-2,25$	$\Phi=2,00-1,25$	$\Phi=4,00-3,25$	$\Phi=3,00-2,25$	$\Phi=2,00-1,25$
Amostra 11	33,68	65,53	0,45	0,33	0,01	0,00
Amostra 10	29,84	68,02	1,77	0,36	0,01	0,00
Amostra 9	31,92	63,67	3,81	0,59	0,01	0,00
Amostra 8	18,94	77,52	3,43	0,11	0,00	0,00
Amostra 7	14,05	78,62	6,86	0,46	0,01	0,00

Ao longo de todo o litoral, a fração areia fina é a predominante para os minerais leves (TABELA 2). A AMF varia de 33,68% na amostra 11 a 14,05% na amostra 7; a AF varia de 78,62% na amostra 7 a 63,67% na amostra 9 e a areia média (AM) varia de 6,86% na amostra 7 a 0,45% na amostra 11.

Os minerais pesados ocorrem em teores baixos e somente são encontrados nas frações areias fina e muito fina (TABELA 2), sendo predominantes nesta última. Na fração areia fina as concentrações são de 0,01%, enquanto na fração AMF variam de 0,11% a 0,59%.

Mineralogia e variação modal dos minerais pesados nas areias muito finas

A mineralogia pesada é composta de: zircão, turmalina, rutilo, titanita, ilmenita, magnetita, epidoto, silimanita, cianita, estaurolita, granada, anfibólio, piroxênio e apatita.

Os óxidos de ferro e titânio (magnetita e ilmenita) são os minerais detríticos pesados mais abundantes ao longo de todo o litoral. Apresentam um maior enriquecimento relativo no centro da área (ponto 9) com 33% de minerais pesados na

fração areia muito fina; e, no restante da área, variam de 21 a 26%. (TABELA 3 e Fig. 2). A abundância dos demais minerais detríticos pesados é listada na tabela 3 e ilustrada na figura 2.

A distribuição dos grãos de anfibólio e piroxênio é muito semelhante, somente se diferenciando por um leve enriquecimento relativo dos anfibólios (TABELA 3 e Fig. 2)

TABELA 3: Variação modal dos minerais detríticos pesados nas frações areia muito fina (% em peso)

	AMOSTRAS				
	7	8	9	10	11
Zircão	3	1	<1	1	1
Rutilo	1	1	<1	1	1
Alumino-silicatos	5	1	2	2	3
Estauroлита	2	1	<1	1	1
Granadas	6	4	6	6	1
Ilmenita+magnetita	21	21	33	26	21
Apatita	<1	<1	<1	<1	<1
Epidotos	23	26	23	24	30
Turmalinas	15	18	14	16	14
Anfibólios	11	14	10	12	13
Piroxênios	7	10	8	9	11
Titanita	6	3	4	2	6

Composição química dos minerais detríticos e sua aplicação na proveniência

Os estudos de química mineral em grãos detríticos têm um importante papel na determinação da origem dos grãos analisados, embora não possam indicar clara e diretamente o quanto os grãos foram reciclados (Morton 1991). Com o presente estudo, pretende-se, portanto, definir a origem primária dos grãos pesados detríticos dos sedimentos do litoral norte do estado do Rio Grande do Sul.

Piroxênio

A composição dos piroxênios magmáticos reflete a afinidade química do magmatismo que o produziu e, conseqüentemente, seu provável ambiente tectônico. Diopsídio, augita e hiperstênio são também importantes minerais de rochas

metamórficas de alto grau. Os piroxênios encontrados nas amostras estudadas (Fig 3) são diopsídio, augita baixo cálcio e hiperstênio. Os grãos de augita apresentam conteúdos de cálcio menores do que os encontrados nas augitas típicas da Formação Serra Geral descritas por Viero & Roisenberg (1992). Os grãos de diopsídio são composicionalmente similares aos identificados em granulitos do Escudo Sul-rio-grandense e os grãos de hiperstênio mostram conteúdos de enstatita semelhantes aos referidos por Silva *et al.* (2002) no Complexo Várzea do Capivarita, na porção nordeste do Escudo Sul-rio-grandense.

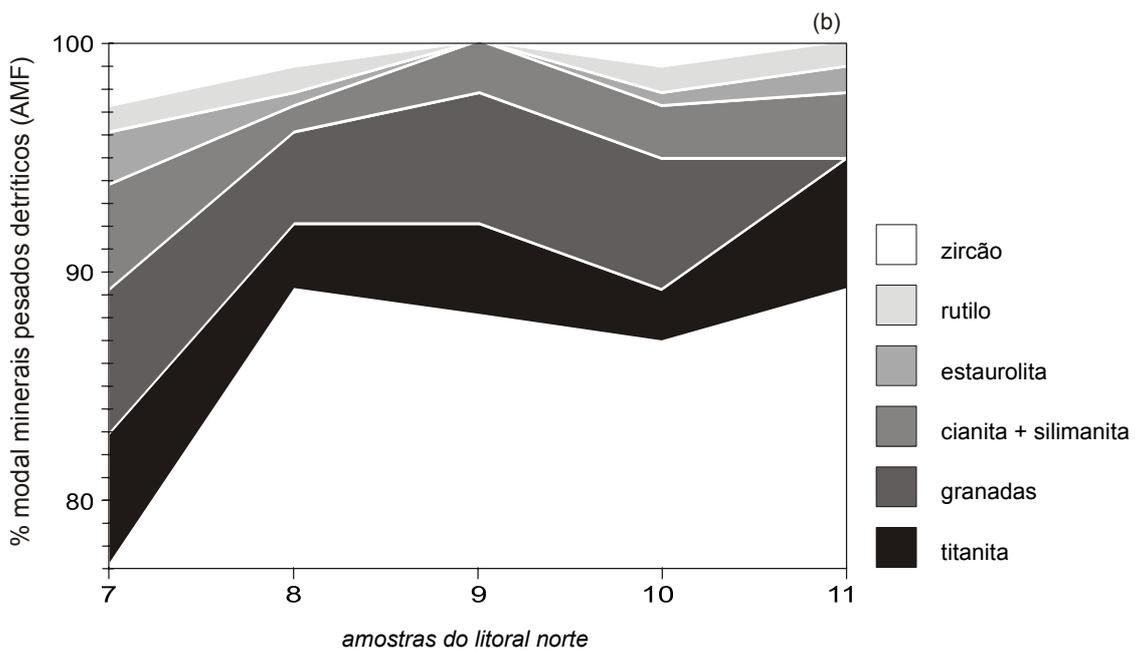
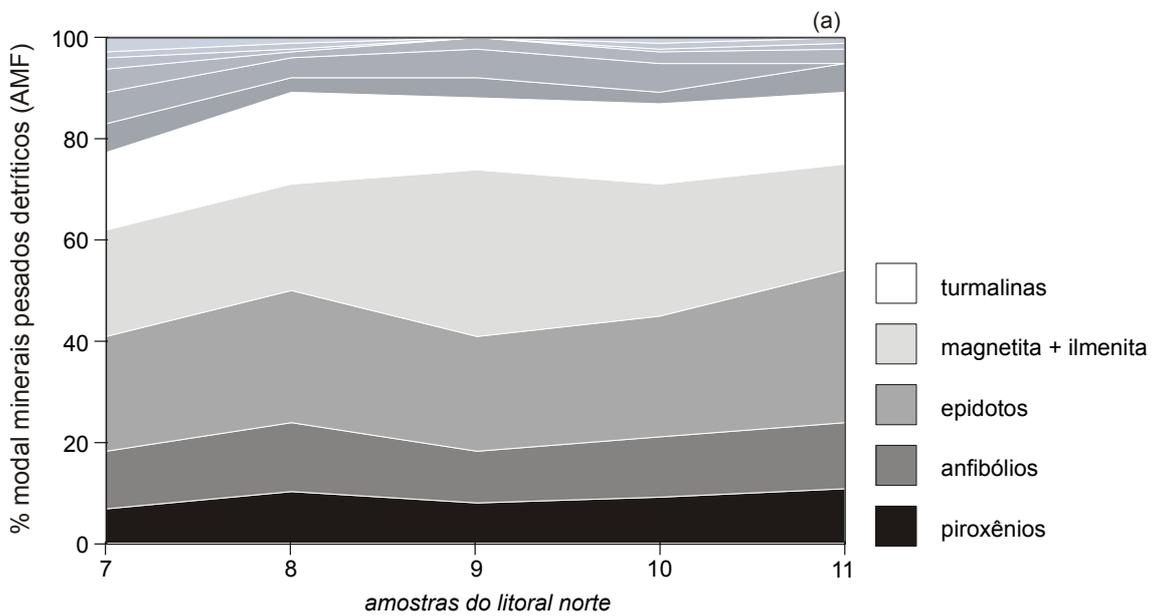


Figura 2: Porcentagem modal dos minerais pesados detríticos das areias praias muito finas do litoral norte do Rio Grande do Sul. (a) porcentagem modal dos minerais pesados detríticos, (b) detalhe do gráfico (a) AMF - Areia Muito Fina

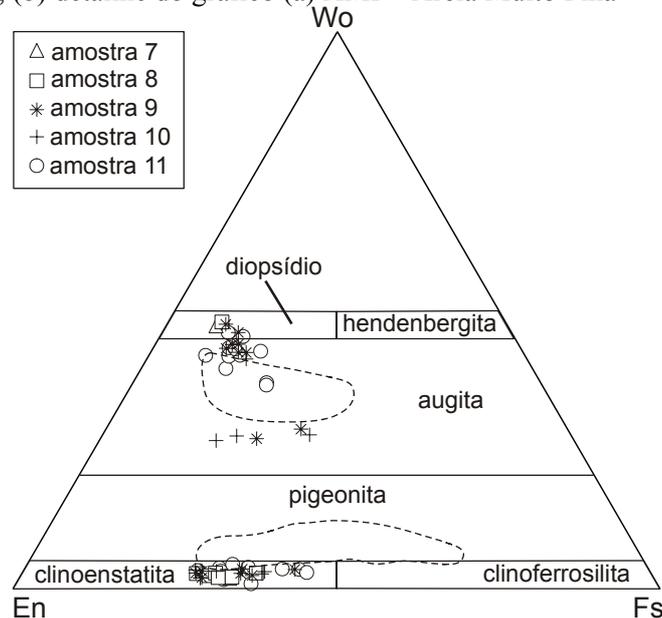


Figura 3: Classificação dos piroxênios (Morimoto *et al.* 1988) das areias praias muito finas do litoral norte do Rio Grande do Sul. Wo – Wolastonita, En – Enstatita, Fe – Ferrosilita, campo tracejado – Formação Serra Geral.

Letterrier *et al.* (1982) avaliam a proveniência de piroxênios pela análise do conteúdo de Ca, Ti, Cr, Na e Al, discriminando o ambiente tectônico das rochas basálticas alteradas que lhes deram origem. O esquema abrange três estágios: (a) piroxênios de fontes toleíticas e cálcio- alcalinas são distinguidos daqueles de fontes alcalinas pelos teores de Ti e (Ca+Na); (b) os conteúdos de (Ti+Cr) *versus* Ca, diferenciam piroxênios não orogênicos dos orogênicos e, (c) a distinção de piroxênios orogênicos, de suítes cálcio-alcalinas e de toleíticas, é feita pelos seus conteúdos de Al e Ti. Os piroxênios deste estudo, no diagrama de Ti *versus* (Ca+Na), encontram-se no campo dos piroxênios de rochas cálcio alcalinas e toleíticas (Fig. 4).

Os conteúdos de SiO₂ e Al₂O₃ de piroxênios são utilizados por Le Bas (1962) para diferenciar clinopiroxênios gerados de rochas alcalinas, subalcalinas ou peralcalinas. Os grãos de piroxênios das amostras estudadas situam-se predominantemente no campo das rochas subalcalinas, e apenas alguns grãos das amostras 9 e 11 posicionam-se no campo correspondente aos de rochas alcalinas (Fig. 5).

A abundância de SiO₂, Al₂O₃, FeO_T, MnO, MgO, CaO, Na₂O em clinopiroxênios é utilizada por Nisbet & Pearce (1977) para identificar o ambiente de rochas básicas que lhes deram origem. De acordo com esses critérios, os clinopiroxênios

estudados são provenientes de rochas básicas de fundo oceânico ou de arco vulcânico (Fig. 6).

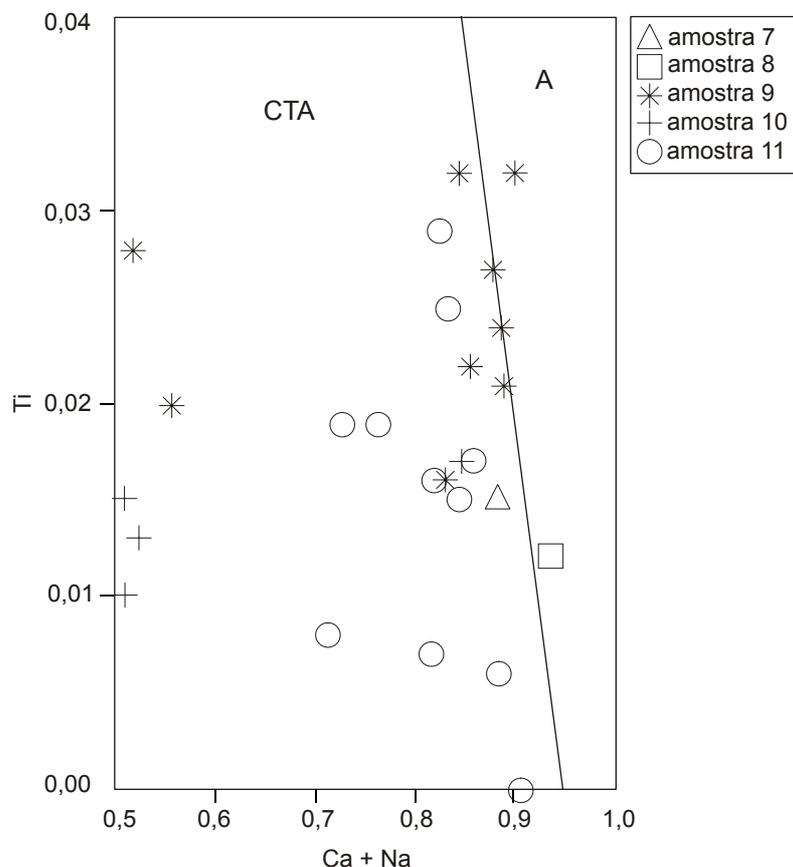


Figura 4: Classificação dos clinopiroxênios (Leterrier *et al.* 1982) das areias praias muito finas do litoral norte do Rio Grande do Sul. CTA – cálcio–alcalinos e toleíticos, A – alcalinos.

A consideração dos critérios de forma integrada sugere que os grãos de piroxênios dos sedimentos estudados provêm de rochas metamórficas da fácies granulito e de rochas básicas toleíticas relacionadas com ambientes pós-colisionais, como as referidas por Florisbal *et al.* (2005) no sul de Santa Catarina e que ocorrem associadas aos granitóides mais precoces do Batólito Pelotas (Bitencourt & Nardi 2000).

Anfibólio

A utilização da química do anfibólio é altamente relevante em estudos de proveniência, uma vez que o vasto espectro composicional dos anfibólios reflete uma larga variedade de fontes (Morton 1991).

As rochas graníticas ígneas de associações magmáticas distintas, freqüentemente retratando ambientes tectônicos diversos, podem mostrar anfibólios de composição característica. Assim, granitóides cálcio-alcalinos associados a ambientes

de arcos magmáticos, comumente possuem anfibólios cálcicos com razões $FeO_T/(FeO_T+MgO)$ inferior a 0,70, enquanto granitóides de associações pós-colisionais e principalmente anorogênicos tendem a ser os mais ricos em álcalis e apresentar razões $FeO_T/(FeO_T+MgO)$ mais elevadas (Nardi 1991). Associações pós-colisionais e anorogênicas podem conter rochas intermediárias e ácidas com anfibólios sódicos.

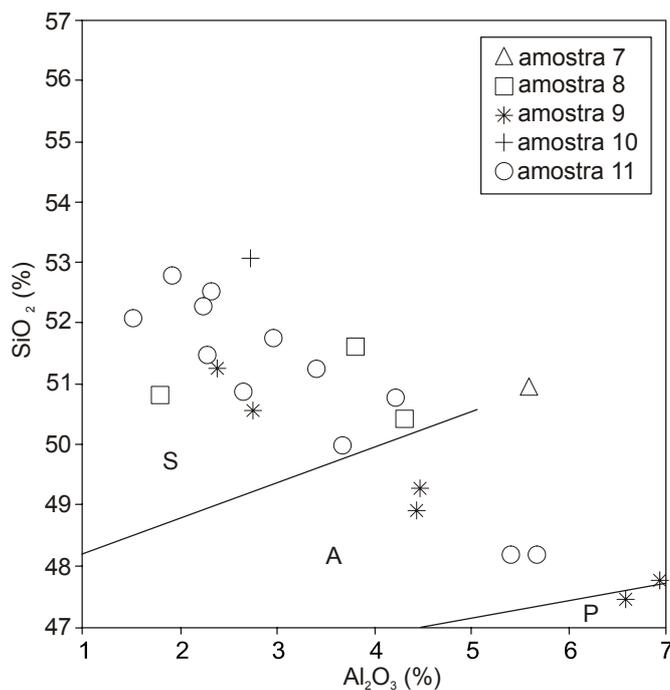


Figura 5: Classificação dos clinopiroxênios (Le Bas 1962) para as areias praias muito finas do litoral norte do Rio Grande do Sul. S – Subalcalino, A – Alcalino, P – Peralcalino.

Somente nas amostras 9, 10 e 11 e em poucos grãos observam-se razões $FeO_T/(FeO_T+MgO)$ superiores a 0,7, comuns em anfibólios de granitóides do tipo A. A maior parte dos grãos analisados apresentam razões $FeO_T/(FeO_T+MgO) < 0,7$ que indicam anfibólios metamórficos, ou de granitóides subalcalinos, também referidos como do tipo I, ou ainda de rochas intermediárias.

Os anfibólios identificados nas amostras 8, 9, 10, e 11 têm composições de Mg-hornblenda, actinolita, actinolita hornblenda, edenita, edenita hornblenda, Fe-hornblenda, Mg-cumintonita antofilita, Mg-hastingsita hornblenda, pargasita – hornblenda, tchermakita e tremolita. A maior parte dos grãos mostra composições de anfibólios metamórficos, freqüentemente derivados de rochas máficas e ultramáficas e de seqüências margosas. Anfibólios de rochas graníticas, tanto do tipo I como A, são encontrados em pequenas quantidades.

A amostra 7 apresenta somente actinolita e actinolita hornblenda, que podem provir de fontes metamórficas de baixo grau (xisto verde) ou de rochas hidrotermalizadas.

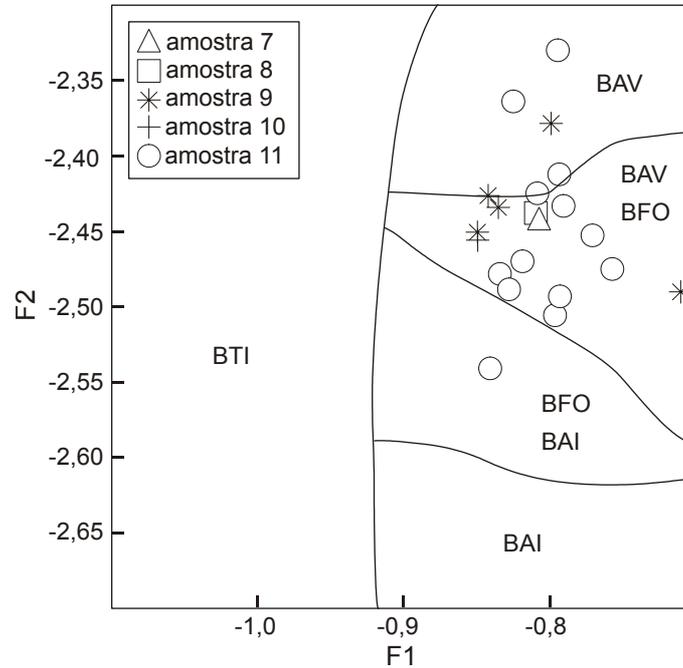


Figura 6: Campo das composições dos clinopiroxênios das areias praias muito finas do litoral norte do Rio Grande do Sul. (modificado de Nisbet & Pearce 1977). BFO – Basalto de Fundo Oceânico, BAV – Basalto de Arco Vulcânico, BTI – Basalto Toleítico Intraplaca, BAI – Basalto Alcalino Intraplaca. $F1 = -(0.012 \times SiO_2) - (0.0807 \times TiO_2) + (0.0026 \times Al_2O_3) - (0.0012 \times FeO^*) - (0.0026 \times MnO) + (0.0087 \times MgO) - (0.0128 \times CaO) - (0.0419 \times Na_2O)$; $F2 = -(0.0469 \times SiO_2) - (0.0818 \times TiO_2) - (0.0212 \times Al_2O_3) - (0.0041 \times FeO^*) - (0.1435 \times MnO) - (0.0029 \times MgO) + (0.0085 \times CaO) + (0.016 \times Na_2O)$

Epidoto

O grupo do epidoto (zoisita, clinozoisita, epidoto, alanita e piemontita) apresenta um grande intervalo na composição. A estabilidade do epidoto no ciclo sedimentar é relativamente reduzida, embora maior que a dos anfibólios (Morton 1984). De acordo com diversos autores (Zen & Hammarstrom 1984; Campos *et al.* 2005), epidotos podem possuir conteúdos de componentes pistacita ($PS = Fe^{+3} / (Fe^{+3} + Al)$) variáveis, conforme sua origem. Epidotos magmáticos de granitos metaluminosos cristalizados em profundidades superiores a 15km, apresentam PS entre 0,2 a 0,3 e em epidotos secundários (rochas metamórficas ou hidrotermais) a componente PS é inferior a 0,2 ou superior a 0,3. No litoral norte do Rio Grande do Sul, encontramos os dois tipos de epidotos em todas as amostras. Os epidotos magmáticos podem provir dos granitóides subalcalinos e shoshoníticos do Batólito Pelotas, enquanto os demais,

assinalam a presença de rochas metamórficas de fácies anfibolito ou de rochas hidrotermalizadas nas áreas fontes.

As zoisitas são minerais típicos de metamorfismo regional de grau médio em rochas de composição margosa, geralmente associada com granada, plagioclásios sódicos, biotita e hornblenda. Também podem ocorrer em eclogitos com hornblenda e alteração hidrotermal. (Deer *et al.* 1981) A zoisita está presente ao longo do litoral norte, não sendo encontrada somente na amostra 10.

Granada

As variações composicionais apresentadas pelas granadas podem ser utilizadas nos estudos de proveniência. Granadas de diferentes paragêneses ocupam diferentes campos composicionais (Wright 1938), em diagramas triangulares com AE (almandina+espessartina) – P (piropo) – GA (grossulária+andradita). Com base nos campos deste diagrama (Fig. 7), as granadas das amostras 10 e 11 seriam derivadas de granitos e pegmatitos, enquanto granadas de biotita xistos ou anfibolitos seriam encontradas nas amostras 8, 10 e 11.

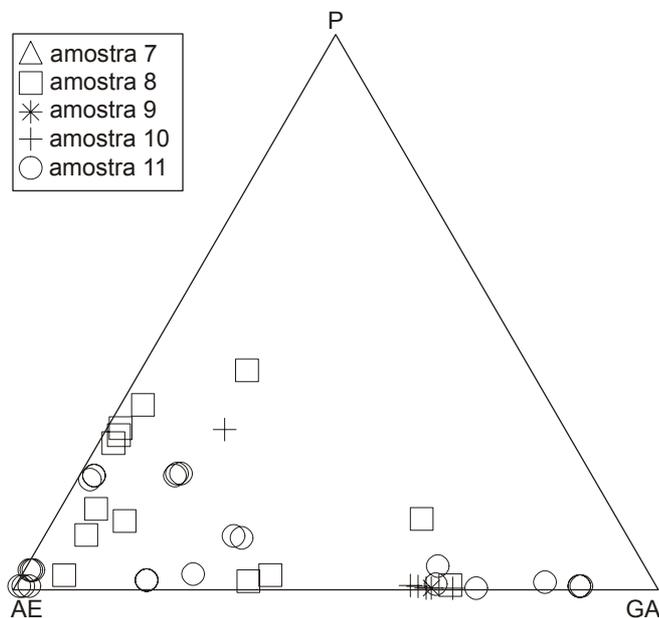


Figura 7: Composições das granadas das areias detríticas praias muito finas do litoral norte do Rio Grande do Sul. P – piropo, AE – almandina + espessartina, GA – grossulária + andradita.

As granadas ricas em almandina são em geral metamórficas de rochas quartzo–feldspáticas, as ricas em grossulária de rochas metassedimentares e as enriquecidas em espessartina são magmáticas de rochas graníticas meta a peraluminosas. Granadas deste último tipo são encontradas nas amostras 10 e 11, a almandina é encontrada principalmente nas amostras 8, 10 e 11, e a grossulária, presente em todas amostras indica, mais uma vez, a importância dos metapelitos nas áreas fontes.

Turmalina

A turmalina apresenta grandes variações composicionais e constitui-se assim em um importante indicador de proveniência (Henry & Guidotti 1985). No diagrama binário FeO x MgO, Morton (1991) mostra os campos das turmalinas mais comuns (dravita, uvita, shorlita e elbaíta). Dravita e uvita são de origem tipicamente metamórfica e metassomática, enquanto as shorlita e elbaíta são magmáticas de rochas graníticas ou pegmatíticas. As turmalinas identificadas em todas as amostras, são principalmente dravitas. Apenas nas amostras 7 e 11 foram também identificadas raras schorlitas (Fig. 8).

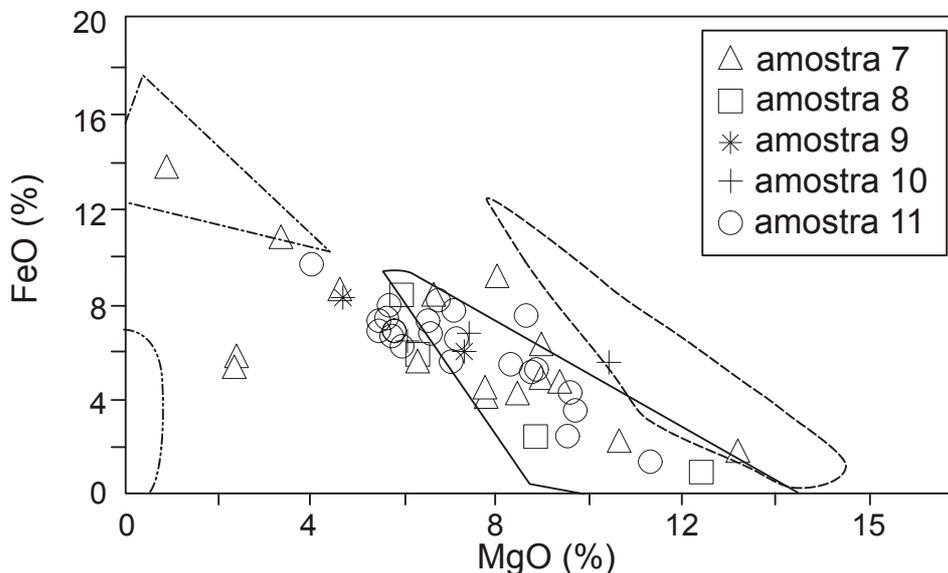


Figura 8: Campo das composições das turmalinas (Morton 1991) das areias praias muito finas do litoral norte do Rio Grande do Sul. Dravita – linha cheia, elbaíta – linha pontilhada, shorlita – linha pontilhada e tracejada, uvita – linha tracejada.

Os diagramas Al-Fe_T-Mg e Ca-Fe_T-Mg (Figs. 9 e 10) desenvolvidos por Henry & Guidotti (1985) indicam que as turmalinas identificadas são principalmente derivadas de: (a) granitóides pobres em Li associados a pegmatitos e aplitos; (b)

metapelitos pobres em Ca e metapsamitos e hidrotermalitos com quartzo e turmalina e (c) metapelitos ricos em Ca, metapsamitos e rochas cálcio silicatadas.

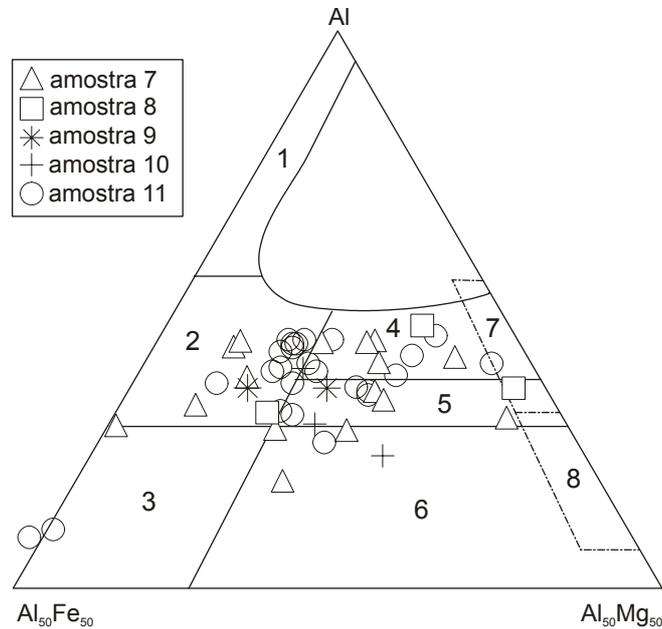


Figura 9: Diagrama Al-Fe_T-Mg para turmalinas (Henry & Guidotti 1985) de diferentes tipos de rochas. (1) granitóides pegmatíticos e aplitos ricos em Li; (2) granitóides pobres em Li e associados a pegmatíticos e aplitos; (3) rochas quartzo turmalina ricas em Fe⁺³; (4) metapelitos co-existindo com fase saturada em Al; (5) metapelitos sem uma fase saturada em Al; (6) rochas quartzo turmalina ricas em Fe⁺³; rochas cálcio-silicatadas e metapelitos; (7) meta-ultramáfica baixo Ca e metassedimentos ricos em Cr e V; (8) metacarbonatos e metapiroxenitos.

Zircão

A composição química, principalmente elementos traços, de zircões detríticos do litoral norte do RS foi determinada e relacionada com suas potenciais fontes primárias por Barros *et al.* (submetido). Concluem estes autores que o conteúdo de elementos traços do zircão detrítico é uma poderosa ferramenta em estudos de proveniência sedimentar. Com base principalmente nas razões Th/U, Y/Ho, Nb/Ta e nos conteúdos de Nb e elementos terras raras, utilizando adicionalmente os parâmetros sugeridos por Belousova *et al.* (2002), esses autores concluíram que os zircões detríticos estudados provêm de associações de rochas graníticas subalcalinas a alcalinas do tipo A, com rochas máficas associadas e de associações metamórficas de alto grau. As variações composicionais dos grãos de zircão, nas amostras coletadas, são coerentes, de acordo com aqueles autores, com a hipótese de que eles provêm de áreas fontes continentais próximas, transportados provavelmente por correntes fluviais de pequeno

porte durante fases de rebaixamento do nível do mar. A associação litológica de magmatismo granítico, subalcalino tipo A, e máfico com metamórficas de alto grau corresponde ao Batólito Pelotas (Philipp *et al.* 2002), situado imediatamente a oeste da planície costeira.

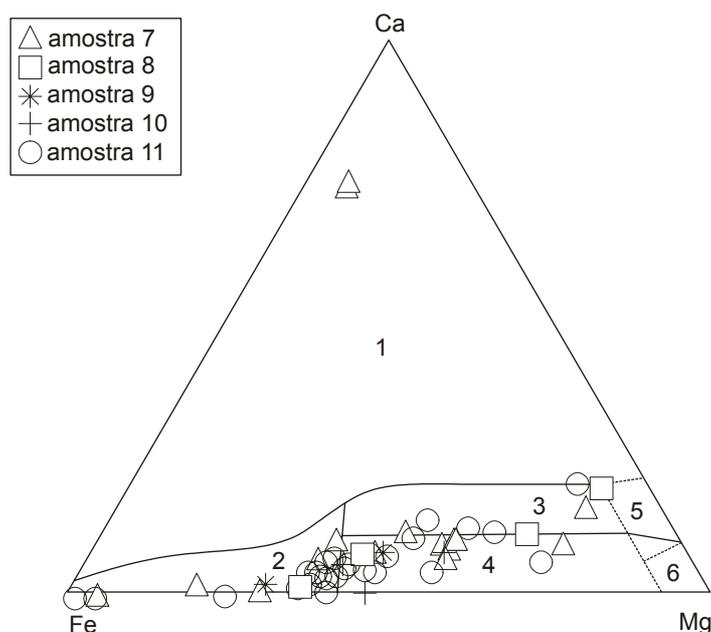


Figura 10: Diagrama Ca-Fe-T-Mg para turmalinas (Henry & Guidotti 1985) de diferentes tipos de rochas. (1) granitóides pegmatíticos e aplitos ricos em Li; (2) granitóides pobres em Li e associados a pegmatíticos e aplitos; (3) metapelitos ricos em Ca, metapsamitos e rochas cálcio-silicatadas; (4) metapelitos pobres em Ca, metapsamitos e rochas quartzo turmalina; (5) metacarbonatos; (6) meta-ultramáfica.

Rutilo

O rutilo é um mineral estável em sistemas sedimentares e a sua presença indica fontes constituídas por metabasitos ou metapelitos da fácies anfibolito ou granulito (Zack *et al.* 2004). O rutilo está presente ao longo de toda a área de estudo o que sugere a presença de rochas metamórficas de alto grau nas áreas fontes dos sedimentos estudados.

Estauroлита

A estauroлита é um mineral tipicamente metamórfico, não sendo conhecida em rochas magmáticas (Clarke 1981). É relativamente estável durante os estágios iniciais de diagênese, mas sofre dissolução em altas temperaturas. Grãos de

estauroлита são encontrados em todas as amostras, assinalando a presença de rochas metamórficas, possivelmente metapelitos, nas áreas fontes.

A proveniência dos minerais detríticos

A composição dos piroxênios (provavelmente ígneos) encontrados nas amostras estudadas indica que os mesmos provêm predominantemente de fontes toleíticas pós-colisionais, descartando-se o magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. Estes apresentam composições diferentes dos piroxênios encontrados nos sedimentos praias estudados (Fig. 3).

Granitóides são importantes fontes de vários dos minerais detríticos identificados: (1) granitóides peraluminosos são indicados por schorlitas e granadas ricas em componente espessartita (Mn); (2) granitóides do tipo A, isto é, de afinidade alcalina, são abundantes como fontes dos minerais detríticos e sua presença é indicada pelo zircão com mais alto teor de Nb e terras raras e por anfibólios com razões $FeOt/(FeOt+MgO) > 0,9$; (3) granitóides subalcalinos médio a alto-K, ditos do tipo I, e shoshoníticos são as prováveis fontes principais de anfibólios com razões $FeOt/(FeOt+MgO)$ entre 0,7 e 0,9, e de epidotos magmáticos, zircões e titanitas.

Rochas de alto grau metamórfico, das fácies anfíbolito superior e granulito, tanto orto como paraderivadas são indicadas como importantes fontes dos sedimentos estudados pela presença de zircões com baixas razões Th/U, hiperstênio e diopsídio.

A presença importante de metapelitos e metamargas de alto grau nas áreas fontes é indicada pela presença de estauroлита, rutilo, silicatos de alumínio- cianita e silimanita, granadas ricas em componente almandina e grossulária, turmalinas enriquecidas em Ca e cumingtonita entre os minerais detríticos de todas amostras estudadas.

Turmalinas de provável origem hidrotermal pós-magmática, epidotos e anfibólios hidrotermais indicam a provável presença de hidrotermalitos entre as rochas fontes dos sedimentos estudados.

Associações litológicas semelhantes às previstas pela presença dos minerais detríticos nos sedimentos do litoral norte do Rio Grande do Sul são encontradas na porção nordeste e leste do Escudo Sul-rio-grandense. O Batólito de Pelotas (Philipp *et al.* 2002) é caracterizado nesta região por granitóides subalcalinos

médio a alto-K, shoshoníticos e alcalinos ou do tipo A. Rochas máficas de afinidade toleítica à moderadamente alcalina ocorrem associadas à maior parte dos granitóides, tanto como diques, corpos concordantes ou enclaves máficos microgranulares. O Complexo Várzea do Capivarita, na mesma região, é constituído por metapelitos e metamargas de alto grau metamórfico (Fernandes *et al.* 1990) e apresenta granadas ricas em componente almandina, silicatos aluminosos, e ortopiroxênios com En entre 62 e 65% conforme Silva *et al.* (2002). Nesta mesma região ocorrem diversos corpos de granitos e *greisens* com turmalinas, por vezes associados com mineralizações de cassiterita e wolframita.

Conclusões

A identificação das associações minerais presentes nas frações detríticas pesadas das areias praias muito finas do litoral norte do estado do Rio Grande do Sul e principalmente a definição de suas composições químicas permitiram sugerir a área fonte desses sedimentos. A composição dos piroxênios indica fontes metamórficas de alto grau e rochas básicas relacionadas com fontes similares às de arcos magmáticos, como as do magmatismo pós-colisional Neoproterozóico do sul do Brasil. Rochas metamórficas metapelíticas e margosas de fácies granulito são fontes importantes e tem sua participação indicada pela estauroлита, rutilo, silicatos de alumínio- cianita e silimanita, granadas ricas em componente almandina e grossulária, turmalinas enriquecidas em Ca e cumingtonita presentes em praticamente todas amostras estudadas. Granitóides do tipo A, semelhantes aos descritos na Suíte Encruzilhada do Sul (Philipp *et al.* 2002) são fontes também importantes, indicadas pela presença de zircões com alto teor de Nb e ETR e razões Nb/Ta superiores a 20, e e anfibólios com alta razão Fe/Mg. Granitóides peraluminosos semelhantes aos da Suíte Cordilheira tem sua presença nas áreas fontes indicadas por: granada rica em espessartina e turmalina rica em ferro, enquanto granitóides shoshoníticos e subalcalinos médio e alto-K, como os descritos por Philipp *et al.* (2002) no Batólito Pelotas tem sua participação sugerida pela presença de epidoto magmático, titanita, anfibólios cálcicos com razões Fe/Mg moderadas e zircões com razões Th/U de 0,3 a 0,5 e Nb/Ta entre 5 e 15. Rochas hidrotermalizadas e ultramáficas são também constituintes das áreas fontes e tem sua presença apontada por turmalinas com Li, actinolita e anfibólios magnesianos.

A distribuição relativamente uniforme dos minerais detríticos estudados em todas as amostras coletadas indica uma área fonte comum para os sedimentos do litoral norte, embora possa haver o predomínio local de fontes como por exemplo, a de rochas hidrotermalizadas na amostra sete.

Este estudo indicou que o extremo nordeste do Batólito Pelotas, constituído predominantemente pelas suites Encruzilhada do Sul, Cordilheira e greisens associados, Viamão e Dom Feliciano (Philipp *et al.* 2002) e pelo Complexo Várzea do Capivarita (Fernandes *et al.* 1990) é a principal área fonte dos sedimentos praias do Litoral Norte do RS.

Agradecimentos - Este projeto foi financiado pelo CNPq - edital universal, processo número 471867/2003-9 e pela bolsa de produtividade do segundo autor. Agradecemos ao prof. Silvio Vlach - coordenador do laboratório de microsonda do IG-USP- São Paulo - pela oportunidade de realizar parte das análises de minerais.

Referências

- Abreu S.F. 1973. *Recursos Minerais do Brasil*. Universidade de São Paulo (ed.). São Paulo, 320p.
- Ayup R.N.Z., Corrêa I.C.S., Tomazelli L.J., Dillenburg S.R. 2001. Dispersão e proveniência dos minerais pesados nos sedimentos de fundo da Plataforma Continental Sul-Brasileira, Uruguia e Norte-Argentina. *In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8., Boletim de Resumos*, Mariluz, p. 126-127.
- Ayup R.N.Z., Corrêa I.C.S., Tomazelli L.J., Dillenburg S.R. 2002. Área fonte e dispersão dos minerais pesados nos sedimentos superficiais da plataforma continental norte do Atlântico Sul Ocidental. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XLI., Anais*, João Pessoa, SBG, p. 121.
- Barros C.E., Nardi L.V.S., Dillenburg S.R., Ayup R.N.Z., Jarvis K., Baitelli R. Detrital minerals of modern beach sediments in southern Brazil: a provenance study based on chemistry of zircon. *Journal of Coastal Research*. (submetido)
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. 2002. *Igneous zircon: trace element composition as an indicator on source rock type*. *Contribution Mineral Petrology*, 143:602-622.
- Bitencourt M.F. & Nardi L.V.S. 2000. Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 30:184-187.

- Campos, T.F. ; Neiva, A.M. ; Nardi, L.V.S. ; Pereira, L.S. ; Bonzanini, L.F. ; Petta, R. ; Meyer, F. M. 2005. The magmatic epidote and amphibole from the Rio Espinharas hybrid complex, northeastern Brazil.. *Pesquisas Em Geociências*, **30**(2):41-56.
- Clarke D.B. 1981. The mineralogy of peraluminous granites: a review. *Canadian Mineralogist*, **19**:3-17.
- Corrêa I.C.S., Ayup R.N.Z., Tomazelli, L.J., Toldo, E.E.Jr. 2001. Distribuição dos minerais pesados nos sedimentos de fundo da Plataforma Continental Sul-Brasileira, Uruguia e Norte-Argentina. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8., *Boletim de Resumos*, Mariluz. p. 124-125.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1981. Minerais Constituintes das Rochas – Uma Introdução. 576 pp.
- Delaney P. 1965. Fisiografia e a geologia de superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul. In: Publicação Especial da Escola de Geologia/UFRGS, n. **6**:1-105.
- Dillenburg S.R., Tomazelli L.J., Barboza E.G. 2004. Barrier evolution and placer formation at Bujuru southern Brazil. *Marine Geology*, **203**:43-56.
- Fernandes L.A.D., Tommasi A., Porcher, C.C. 1990. Esboço estrutural de parte do Batólito de Pelotas – região de Quitéria-Capivarita. *Acta Geológica Leopoldensia*, **13**:117-138.
- Florisbal L.M., Nardi L.V.S., Bitencourt M.F., Bettiollo LM. 2005. As rochas máficas da suíte pós-colisional Paulo Lopes: magmatismo básico e granítico cogenéticos de afinidade toleítica no sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, **32**(2):69-80.
- Fontana E.L. 1990. Investigações geofísicas preliminares sobre o Cone de Rio Grande, Bacia de pelotas – Brasil. *Acta Geológica Leopoldensia*, **13**:161-170.
- Gehrels G.E., Yin A., Wang X.F. 2003. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau. *Geological Society of America Bulletin*, **115**(7):881-896.
- Henry D.J. & Guidotti C.V. 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, **70**:1-15.
- Hoskin P.W.O. & Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, **53**:27-62.
- Le Bas M.J. 1962. The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, **260**:267-288.
- Leterrier J., Maury R.C., Thonon P., Girard D., Marchal M. 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, **59**:139-154.
- Loss E. & Dehnhardt E.A. 1983. Concentração de areias negras ao longo da Mineralógica. *Acta Geológica Leopoldensia*, **7**(14):93-130.

- Martins L.R.S. 1967. Aspectos texturais e deposicionais dos sedimentos praias e eólicos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. *In: Publicação Especial da Escola de Geologia/UFRGS*, 131-155.
- Martins da Silva M.A. 1979. Provenance of heavy minerals in beach sands, southeastern Brazil: from Rio Grande to Chui (Rio Grande do Sul State). *Sedimentary Geology*, **24**(1-2):133-148.
- Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Aoki K., Gottardi G. 1988. Nomenclature of piroxenes. *American Mineralogist*, **73**:1123-1133.
- Morton A.C. 1984. Stability of detrital heavy minerals in Tertiary sandstones from the North Sea Basin. *Clay Minerals*, **19**:287-308.
- Morton A.C. 1991. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to orivenance research. *In: A.C. Morton; S.P Todd & P.D.W. Haughton, (eds.) Developments in Sedimentary Provenance Studies*, 57, UK, Geological Society Special Publication, pp.: 31-45.
- Motta V.F. 1969. Relatório Diagnóstico Sobre a Melhoria e o Aprofundamento do Acesso pela Barra do Rio Grande. *In: Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS*, 144 p.
- Munaro P. 1994. *Geologia e Mineralogia do Depósito de Minerais Pesados de Bojuru, RS*. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS. Porto Alegre. 96 p. (Inédito)
- Nardi L.V.S. 1991. Caracterização petrográfica e geoquímica dos granitos metaluminosos da associação alcalina: revisão. *Pesquisas*, **18**(1):44-57.
- Nisbet E.G. & Pearce J.A. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **63**:149-160.
- Philipp R.P., Machado R., Nardi L.V.S., Lafon J.M. 2002. O Magmatismo Granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no Sul do Brasil: Novos Dados e Revisão da Geocronologia Regional. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(2):277-290.
- Pomerancblum M & Costa M.P.A. 1972. Integração de Informações sobre Minerais Pesados da Plataforma Continental Brasileira. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 26., *Anais*, Belém, **2**:179-186.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, **184**:123-138.

- Silva A.O.M., Porcher C.C., Fernandes L.A.D., Droop G. 2002. Termobarometria da Suíte Metamórfica Várzea do Capivarita (RS): Embasamento do Cinturão Dom Feliciano. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(4):419-432.
- Tomazelli L.J. 1978. Minerais pesados da Plataforma Continental do Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia*, **2**(5):103-135.
- Tomazelli L.J., Villwock J.A., Dillenburg S.R., Bachi F.A., Dehnhardt B.A. 1998. Significance of present-day coastal erosion and marine transgression, Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **70**:221-229.
- Viero A.P. & Roisenberg A. 1992. Petrologia e geoquímica do Complexo Básico de Lomba Grande, RS. *Pesquisas*, **19**(1):41-54.
- Villwock J.A., Loss E.L., Dehnhardt E.A., Tomazelli L.J., Hofmeister, T. 1979. Concentraciones de Arenas Negras a lo largo de la costa do Rio Grande do Sul. Memórias Del Seminário sobre Ecología Bentónica y Sedimentación de la plataforma continental Del Atlántico Sur. *In: Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe*, p. 405-414.
- Villwock J.A., Tomazelli L.J., Loss E.L., Dehnhardt E.A., Horn Filho N.O., Bachi F.A., Dehnhardt B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. *Quaternary of South America and Antartic Peninsula*, **4**:79-97.
- Wright W.I. 1938. The composition and occurrence of garnets. *American Mineralogist*, **23**:436-449.
- Zack T., Eynatten V.H., Kronz A. 2004. Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sedimentary Geology*, **17**(1-4):37-58.
- Zen E. & Hammarstrom J. 1984. Magmatic epidote and its petrologic significance. *Geology*, **12**:515-518.

CAPÍTULO 5

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu S.F. 1973. *Recursos Minerais do Brasil*. Universidade de São Paulo (ed.). São Paulo, 320p.
- Ahrens, L.H. & Erlank, A.J. 1969. Hafnium. In: Wedepohl, K.H. (ed.). **Handbook of Geochemistry**. New York, Springer-Verlag. v. II/5, sections B-O.
- Ashworth, J.R. 1975. Staurolite at anomalously high grade. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **53**:281-291.
- Asiedu, D.K.; Suzuki S. & Shibata, T. 2000. Provenance of sandstones from the Lower Cretaceous Sasayama Group, Inner Zone of Southwest Japan. **Sedimentary Geology**, **131**(1-2):9-24.
- Ayup R.N.Z. Corrêa I.C.S., Tomazelli L.J. & Dillenburg S.R. 2001. Dispersão e proveniência dos minerais pesados nos sedimentos de fundo da Plataforma Continental Sul-Brasileira, Uruguia e Norte-Argentina. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8., *Boletim de Resumos*, Mariluz, p. 126-127.
- Ayup R.N.Z., Corrêa I.C.S., Tomazelli L.J. & Dillenburg S.R. 2002. Área fonte e dispersão dos minerais pesados nos sedimentos superficiais da plataforma continental norte do Atlântico Sulocidental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XLI., *Anais*, João Pessoa, SBG, p. 121.
- Barros, C.E. 1992 **Petrologia e Litoquímica do Monzogranito Santo Antônio, Dom Pedrito, RS**. Porto Alegre, 123p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Barros, C.E. & Nardi, L.V.S. 1994. O Maciço Granítico Santo Antônio, RS: Magmatismo Neoproterozóico de Afinidade Shoshonítica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **66**(4):441-465.
- Barros, C.E.; Nardi, L.V.S. & Dillenburg, S.R. 2005. Geoquímica de Minerais Detríticos em Estudos de Proveniência: Uma Revisão. **Pesquisas em Geociências**, **32**(1):03-15.
- Barros C.E., Nardi L.V.S., Dillenburg S.R., Ayup R.N.Z., Jarvis K. & Baitelli R. Detrital minerals of modern beach sediments in southern Brazil: a provenance study based on chemistry of zircon. *Journal of Coastal Research*. (submetido)
- Bau, M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **123**:323-333.
- Bea, F. 1996. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; Implications for the chemistry of crustal melts. **Journal of Petrology**, **37**(3):521-552.
- Bea, F., Fershtater, G. & Corretgé, L.G. 1992. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effect of aluminium. **Lithos**, **29**:43-56.
- Bellieni, G.; Piccirillo, E. M.; Comin-Chiaramonti, P.; Melfi, A. J. & Da Roit, P. 1988 Mineral chemistry of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Paraná Basin (Brazil) In: Melfi, A.J., Piccirillo, E.M. (eds.) **The Mesozoic Flood**

Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. São Paulo, IAG/USP. v. 1., p. 73-92.

- Belousova, E.A.; Griffin, W.L.; O'Reilly, S.Y. & Fisher, N.I. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **143**:602-622.
- Bitencourt M.F. & Nardi L.V.S. 2000. Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**:184-187.
- Boggs, S. Jr. 1968. Experimental study of rock particles. **Journal of Sedimentary and Petrology**, **38**:1326-1339.
- Campos, T.F.C.; Neiva, A.M.R.; Nardi, L.V.S.; Pereira, L.S. & Bonzanini, L.F. 2005. The magmatic epidote and amphibole from the Rio Espinharas hybrid complex, northeastern Brazil. **Pesquisas em Geociências**, **30**(2):41-56.
- Carter, A. 1999. Present status and future avenues of source region discrimination and characterization using fission track analysis. **Sedimentary Geology**, **124**:31-45.
- Catalán, J.R.M.; Fernández-Suárez, J.; Jenner, G.A.; Belousova, E. & Montes, A. 2004. Provenance constraints from detrital zircon U–Pb ages in the NW Iberian Massif: implications for Palaeozoic plate configuration and Variscan evolution. **Journal of the Geological Society**, **161**(3):463-476.
- Cherniak, D.J., Hanchar, J.M. & Watson, E.B. 1997. Rare-earth diffusion in zircon. **Chemical Geology**, **134**:289–301.
- Clarke, D.B. 1981. The mineralogy of peraluminous granites: a review. **Canadian Mineralogist**, **19**:3-17.
- Cliff, R.A.; Drewery, S.E. & Leeder, M.R. 1991. Sourcelands for the Carboniferous Pennine river system: constraints from sedimentary evidence and U-Pb geochronology using zircon and monazite. In: Morton, A.C.; Todd, S.P.; Haughton, P.D.W. (eds.). **Developments in Sedimentary Provenance Studies**. UK. p. 137-159. (Geological Society special publication, 57).
- Cornell, D.H. & Hegardt, E.A. 2003. No more blind dates with zircon! **Geophysical Research Abstracts**, **5**:02523.
- Corrêa, I.C.S. 1996. Les Variations Du Niveau de La Mer Durant Les 17.500 Ansbp: L'Exemple de La Plate-Forme Continentale du Rio Grande do Sul-Bresil. **Marine Geology**, Amsterdam-Holanda, **130**(1/2):163-178.
- Corrêa I.C.S., Ayup R.N.Z., Tomazelli, L.J. & Toldo, E.E.Jr. 2001. Distribuição dos minerais pesados nos sedimentos de fundo da Plataforma Continental Sul-Brasileira, Uruguaia e Norte-Argentina. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8., *Boletim de Resumos*, Mariluz. p. 124-125.
- Deer, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. 1966. **An introduction to the rock-forming minerals**. Longman Group Ltd., Londres, 528p.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1981. Minerais Constituintes das Rochas – Uma Introdução. 576 pp.
- Delaney P. 1965. Fisiografia e a geologia de superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul. In: Publicação Especial da Escola de Geologia/UFRGS, n. **6**:1-105.

- Dickinson, W.R. 1970. Interpreting detrital modes of greywacke and arkose. **Journal of Sedimentary Petrology**, **40**:695-707.
- Dickinson, W.R.; Beard, L.S.; Brakenridge, G.R.; Erjavec, J.L.; Ferguson, R.C.; Inman, K. F.; Knepp, R.A.; Lindberg, F.A. & Ryberg. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. **Geological Society of America Bulletin**, **94**:222-235.
- Dillenburg, S.R., Roy, P.S., Cowell, P.J., Tomazelli, L.J., 2000. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the Shoreface Translation-Barrier Model (STM). **Journal of Coastal Research**, **16**:71-81.
- Dillenburg S.R., Tomazelli L.J. & Barboza E.G. 2004. Barrier evolution and placer formation at Bujuru southern Brazil. *Marine Geology*, **203**:43-56.
- Dillenburg, S.R.; Esteves, L. S.; Tomazelli, L. J. 2004. A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Brasil, **76**(3):611-623.
- Du Bray, E.A. 1988. Garnet compositions and their use as indicators of peraluminous granitoid petrogenesis - southeastern Arabian Shield. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **100**:205-212.
- Duddy, I.R. & Kelly, P.R. 1999. Uranium in mineral sands: measurement and uses. **Australian Institute of Geoscientists Bulletin**, Australia, **26**:1-5. Disponível em: <http://www.geotrack.com.au/minsand.htm>. Acesso em: 27 jul. 2003.
- Fernandes L.A.D., Tommasi A. & Porcher, C.C. 1990. Esboço estrutural de parte do Batólito de Pelotas – região de Quitéria-Capivarita. *Acta Geológica Leopoldensia*, **13**:117-138.
- Fleischer, M. & Altschuler, Z.S. 1969. The relationship of the rare-earth composition of minerals to geological environment. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **33**:725-732.
- Florisbal L.M., Nardi L.V.S., Bitencourt M.F. & Betiollo LM. 2005. As rochas máficas da suíte pós-colisional Paulo Lopes: magmatismo básico e granítico cogenéticos de afinidade toleítica no sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, **32**(2):69-80.
- Fontana, E.L. 1990. Investigações geofísicas preliminares sobre o Cone de Rio Grande, Bacia de Pelotas - Brasil. *Acta Geológica Leopoldensia*, **13**(30):161-170.
- Freestone, I.C. & Middleton, A.P. 1987. Mineralogical applications of the analytical SEM in archaeology. **Mineralogical Magazine**. **51**:21-31.
- Fujimaki, H., 1986. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite and liquid. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **94**:42-45.
- Gehrels, G.E., Yin, A., Wang, X.F. 2003. Detrital zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau. **Geological Society of America Bulletin** **115**(7): 881-896.
- Harris, N.W.B., Pearce, J.A., & Tindle, A.G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Collision Tectonics, M.P. Coward & A.C. Ries (eds.). **Geological Society of London, Special Paper**, **19**:115-158.
- Hartmann, L.A. 1998. Deepest Exposed Crust of Brazil - Geochemistry of Paleoproterozoic depleted Santa Maria Chico Granulites. **Gondwana Research**, **1**(3/4):331 – 341.

- Hartmann, L.A. 2002. The Mesoproterozoic Supercontinent Atlantica. **Gondwana Research**, **5**(1):157-163.
- Hartmann, L.A., Basei, M.A. S. & Simas, M.W. 1998. Geochemistry of the Lower Proterozoic granulite-facies Grant syenite gneiss, Barra Velha, Santa Catarina State, southern Brazil. **Pesquisas**, **25**(2):3-9.
- Hartmann, L.A. & Chemale Jr., F. 2003. Mid amphibolite facies metamorphism of harzburgites in the Neoproterozoic Cerro Mantiqueiras Ophiolite, southernmost Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **75**(1):109-128.
- Hartmann, L.A.; Santos, J.O.S.; Leite, J.A.D.; Porcher, C.C. & McNaughton, N.J. 2003. Metamorphic evolution and U-Pb zircon SHRIMP geochronology of the Belizário ultramafic amphibolite, Encantadas Complex, southernmost Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **75**(3):393 – 403.
- Hartmann, L.A.; Santos, J.O.S.; McNaughton, N.J.; Vasconcellos, M.A.Z. & Silva, L.C. 2000. Ion microprobe (SHRIMP) dates complex granulite from Santa Catarina, southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **72**(4):560-572.
- Haughton, P.D.W.; Todd, S.P. & Morton, A.C. 1991. Sedimentary provenance studies. In: Morton, A.C.; Todd, S.P. & Haughton, P.D.W. (eds.). **Developments in Sedimentary Provenance Studies**. p. 01-11. (Geological Society Special Publication, 57).
- Heaman, L.M.; Bowins, R. & Crocket, J. 1990. The chemical composition of igneous zircon suites: Implications for geochemical tracer studies. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **54**:1597-1607.
- Henry, D.J. & Guidotti, C.V. 1985 Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. **American Mineralogist**, **70**:1-15.
- Hinton, R.W. & Upton, B.G.J. 1991. The chemistry of zircon: variations within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **55**(11):3287-3302.
- Hoskin, P.W.O. & Black, L.P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. **Journal of Metamorphic Geology**, **18**:423-439.
- Hoskin, P.W.O. & Ireland, T.R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. **Geology**, **28**(7):627-630.
- Hoskin, P.W.O. & Schaltegger, U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. **Reviews in Mineralogy & Geochemistry**, **53**:27-62.
- Hurst, A.R. & Morton, A.C. 1988. An application of heavy-mineral analysis to lithostratigraphy and reservoir modeling in the Oseberg Field, northern North Sea. **Marine and Petroleum Geology**, **5**:157-169.
- Kepezhinskis, K.B. & Koryluk, V.N. 1973. Range of variations in the composition of staurolite from typical metapelites with pressure and temperature of metamorphism. **Doklady**: **212**, 121-125.
- Kosler, J.; Fonneland, H.; Sylvester, P.; Turbrett, 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.

- Krawinkel, H.; Wozazek, S.; Krawinkel, J. & Hellmann, W. 1999. Heavy-mineral analysis and clinopyroxene geochemistry applied to provenance analysis of lithic sandstones from the Azuero-Soná Complex (NW Panama). **Sedimentary Geology**, **124**:149-168.
- Krynine, P.D. 1946. The tourmaline group in sediments. **Journal of Geology**, **54**:65-87.
- Leake B.E. 1978. Nomenclature of amphiboles. **American Mineralogist**, **63**:1023-1052.
- Le Bas M.J. 1962. The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, **260**:267-288.
- Leterrier, J.; Maury, R.C.; Thonon, P.; Girard, D. & Marchal, M. 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. **Earth and Planetary Science Letters**, **59**:139-154.
- Lima, E.F. & Nardi, L.V.S. 1991. Os lamprófiros espessartíticos da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS. **Geochimica Brasiliensis**, **5**:117-131.
- Lima, E.F. & Nardi, L.V.S. 1998. Química mineral das rochas vulcânicas e lamprófiros espessartíticos da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul-RS. **Revista Brasileira de Geociências**, **28**(2):113-124.
- Linnen, R.L. & Keppler, H. 1997. Columbite solubility in granitic melts: consequences for the enrichment and fractionation of Nb and Ta in the Earth's crust. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **128**:213-227.
- Linnen R.L. & Keppler, H. 2002. Melt composition control of Zr/Hf fractionation in magmatic processes. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **66**(18):3293-3301.
- Loss, E.L. & Dehnhardt, E.A. 1983. Concentração de areias negras ao longo da costa do Rio Grande do Sul – Áreas Fontes: Geologia e Contribuição Mineralógica. **Acta Geológica Leopoldensia**, **7**(14):93-130.
- Mahood, G. & Hildreth, W. 1983. Large partition coefficients for trace elements in high-silica rhyolites. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **47**:11-30.
- Mange-Rajetzky, M.A. & Oberhänsli, R. 1992. Detrital lawsonite and blue sodic amphibole in the Molasse of Savoy, France and their significance in assessing Alpine evolution. **Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen**, **62**:415-436.
- Martins da Silva, M.A. 1979. Provenance of heavy minerals in beach sands, southeastern Brazil: from Rio Grande to Chuí (Rio Grande do Sul State). **Sedimentary Geology**, **24**(1-2):133-148.
- Martins L.R.S. 1967. Aspectos texturais e deposicionais dos sedimentos praias e eólicos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. *In*: Publicação Especial da Escola de Geologia/UFRGS, 131-155.
- McDaniel, D.K. & McLennan, S.M. 1997. A comparison of provenance information obtained from detrital zircon and feldspar grains in a sandstone from the Devonian Catskill clastic wedge. *In*: Annual V.M. Goldschmidt Conference, 7, 1997. Tucson, Arizona. [Abstracts...] 1p. Disponível em: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/gold/pdf/2363.pdf> Acesso em: 12 de novembro de 2004.

- Morimoto, N.; Fabries, J.; Ferguson, A.K.; Ginzburg, I.V.; Ross, M.; Seifert, F.A.; Zussman, J.; Aoki, K. & Gottardi, G. 1988. Nomenclature of pyroxenes. **American Mineralogist**, **73**:1123-1133.
- Morton, A.C. 1984. Stability of detrital heavy minerals in Tertiary sandstones from the North Sea Basin. **Clay Minerals**, **19**:287-308.
- Morton, A.C. 1985. A new approach to provenance studies: electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones of the northern North Sea. **Sedimentology**, **32**(4):553-566.
- Morton, A.C. 1986. Dissolution of apatite in North Sea Jurassic sandstones: implications for the generation of secondary porosity. **Clay Minerals**, **21**:711-733.
- Morton, A.C. 1987. Influences of provenance and diagenesis on detrital garnet suites in the Paleocene Forties Sandstone, Central North Sea. **Journal of Sedimentary Petrology**, **57**(6):1027-1032.
- Morton, A.C. 1991. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. In: Morton, A.C.; Todd, S.P. & Haughton, P.D.W. (eds.). **Developments in Sedimentary Provenance Studies**. p. 31-45. (Geological Society Special Publication, 57).
- Morton, A.C.; Stiberg, J. P.; Hurst, A. & Qvale, H. 1989. Lithostratigraphic correlation using heavy minerals: the Brent Group, Oseberg Field, North Sea. In: Collinson, J. (ed.). **Correlation in Hydrocarbon Exploration**. Graham & Trotman, London. p. 217-230.
- Morton, A.C.; Claoué-Long, J.C. & Berge, C. 1996. Shrimp constraints on sediment provenance and transport history in the Mesozoic Staffjord Formation, North Sea. **Journal of the Geological Society**, **153**:915-929.
- Morton, A.C.; Claoué-Long, J.C. & Hallsworth, C.R. 2001. Zircon age and heavy mineral constraints on provenance of North Sea Carboniferous sandstones. **Marine and Petroleum Geology**, **18**:319-337.
- Morton, A.C. & Hallsworth, C. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. **Sedimentary Geology**, **124**:3-29.
- Morton, A.C.; Whitham, A.G. & Fanning, M.C. 2005. Provenance of Late Cretaceous-Paleocene submarine fan sandstones in the Norwegian Sea: integration of heavy mineral, mineral chemical and zircon age data. **Sedimentary Geology**, **182**:3-28.
- Motta, V.F. 1969. Relatório-diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela barra de Rio Grande. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. (Inédito).
- Munaro, P. 1994. **Geologia e Mineralogia do Depósito de Minerais Pesados de Bojuru - RS**. Porto Alegre. 96p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (Inédito)
- Murali, A.V., Parthasarathy, R., Mahadevan, T. M. & Sankar das M. 1983. Trace element characteristics, REE patterns and partition coefficients of zircons from different geological environments – a case study on Indian zircons. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **47**:2047-2052.
- Nardi, L.V.S. 1991. Caracterização petrográfica e geoquímica dos granitos metaluminosos da associação alcalina: revisão. **Pesquisas**, **18**(1):44-57.

- Nardi, L.V.S.; Liz, J.D.; Lima, E.F.; Formoso, M.L.L. & Jarvis, K. 2005. Geochemistry of Rare Earth Elements in zircons from the Lavras do Sul Shoshonitic Association, Southernmost Brazil. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 2005, Porto de Galinhas, BA. **Extended Abstracts...** Recife, v. 1.
- Nisbet, E.G. & Pearce, J.A. 1977. Clinopyroxene compositions in mafic lavas from different tectonic settings. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **63**:149-160.
- Pettijohn, F.J. 1975. **Sedimentary Rocks**. New York, Harper & Row, 628 p.
- Pettijohn, F.J.; Potter, P.E. & Siecer, R. 1973. **Sand and sandstone**. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag. 618 p.
- Philipp R.P., Machado R., Nardi L.V.S. & Lafon J.M. 2002. O Magmatismo Granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no Sul do Brasil: Novos Dados e Revisão da Geocronologia Regional. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(2):277-290.
- Piccoli, P., Candela, P. & Rivers, M. 2000. Interpreting magmatic processes from accessory phases: titanite- a small-scale recorder of large-scale processes. Royal Society of Edinburgh, **Transactions: Earth Sciences**, **91**:257-267.
- Philipp, R.P.; Machado, R.; Nardi, L.V.S. & Lafon, J.M. 2002. O Magmatismo Granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no Sul do Brasil: Novos Dados e Revisão da Geocronologia Regional. **Revista Brasileira de Geociências**, **32**(2):277-290.
- Pinto, L.; Hérail, G.; Moine, B.; Fontan, F.; Charrier, R., & Dupré, B. 2004. Using geochemistry to establish the igneous provenances of the Neogene continental sedimentary rocks in the Central Depression and Altiplano, Central Andes. **Sedimentary Geology**, **166**:157-183.
- Pittman, E.D. 1963. Use of zoned plagioclase as an indicator of provenance. **Journal of Sedimentary Petrology**, **33**:380-386.
- Plá Cid, J.; Nardi, L.V.S.; Conceição, H.; Bonin, B. & Jardim de Sá, E. 2000. The alkaline silicasaturated ultrapotassic magmatism of the Riacho do Pontal Fold Belt, NE Brazil: an example of syenite-granite Neoproterozoic association. **Journal of South America Earth Science**, **13**(7):661-683.
- Plá Cid, J.; Nardi, L.V.S.; Gisbert, P.E.; Merlet, C. & Boyer, B. La, Ce, Nd, and Sr behaviour in minette magmas during fractionation of apatite-clinopyroxene-mica paragenesis under upper-mantle pressures. **European journal of mineralogy** (Print), v. 2006, 2006.
- Pomerancblum M & Costa M.P.A. 1972. Integração de Informações sobre Minerais Pesados da Plataforma Continental Brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., *Anais*, Belém, **2**:179-186.
- Pupin, J.P. 1980. Zircon and granite petrology. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, **73**:207-220.
- Pupin, J.P. 2000. Granite genesis related to geodynamics from Hf-Y in zircon. **Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, **91**:245-256.
- Rubatto, D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. **Chemical Geology**, **184**:123-138.

- Rubatto, D. & Hermann, J. 2003. Zircon formation during fluid circulation in eclogites (Monviso, Western Alps): Implications for Zr and Hf budget in subduction zones. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **67**(12):2173-2187.
- Silva A.O.M., Porcher C.C., Fernandes L.A.D. & Droop G. 2002. Termobarometria da Suíte Metamórfica Várzea do Capivarita (RS): Embasamento do Cinturão Dom Feliciano. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(4):419-432.
- Sircombe, K.N. 1999. Tracing provenance through the isotope ages of litoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia. **Sedimentary Geology**, **124**:47-67.
- Stabel, L.Z., Nardi, L.V.S., Cid, J.P. 2001. Química mineral e evolução petrológica do Sienito Piquirí: magmatismo shoshonítico, Neoproterozóico, pós-colisional no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, **31**(2):211-222.
- Sturm, R. 2004. Analysis of magmatic crystal growth by backscattered electron imaging. **Microscopy and Analysis**, **18**(4):25-27.
- Styles, M.T.; Stone, P. & Floyd, J.D. 1989. Arc detritus in the Southern Uplands: mineralogical characterization of a 'missing' terrane. **Journal of the Geological Society**, **146**:397-400.
- Shukla, B. 1988. Provenance of Oligocene Lough Neagh Group, Northern Ireland. United Kingdom (abstract). In: James, D.P. & Leckie, D.A (eds.) **Sequences, stratigraphy, sedimentology: surface and subsurface**. Memoir of the Canadian Society of Petroleum Geologists, v. 15, p. 583-584.
- Thomas, J.B., Bodnar, R. J., Shimizu, N. & Sinha, A. K. 2002. Determination of zircon/melt trace element partition coefficients from SIMS analysis of melt inclusions in zircon. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **66**(16):2887-2901.
- Thomas, W.A.; Becker, T.P.; Samson, S.D. & Hamilton, M.A. 2004. Detrital Zircon Evidence of a Recycled Orogenic Foreland Provenance for Alleghanian Clastic-Wedge Sandstones. **Journal of Geology**, **112**:23-37.
- Toldo Jr., E.E.; Ayup-Zouain, R.N.; Corrêa, I.C.S. & Dillenburg, S.R. 1991. Barra Falsa: Hipótese de um Paleocanal Holocênico de Comunicação entre a Laguna dos Patos e o Oceano Atlântico. **Pesquisas**, **18**(2):99-103.
- Toldo Jr., E.E.; Dillenburg, S.R.; Almeida, L.E.S.B. Tabajara, L.L.; Martins, R.R. & Cunha, L.O.B.C. 1993. Parâmetros Morfodinâmicos da Praia de Imbé, RS. **Pesquisas**, **20**(1):27-32.
- Toledo, M.C.M. & Pereira, V.P. 2001. Variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. **Revista do Instituto Geológico de São Paulo, São Paulo**, **22**(1/2):27-64.
- Tomazelli L.J. 1978. Minerais pesados da Plataforma Continental do Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia*, **2**(5):103-135.
- Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A. 1992. Considerações Sobre o Ambiente Praial e a Deriva Litorânea de Sedimentos ao Longo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas**, **19**:3-12.
- Tomazelli, L.J.; Villwock, J.A.; Dillenburg, S.R.; Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 1998. Significance of Present-Day Coastal Erosion and Marine Transgression, Rio Grande do Sul, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, **70**(2):221-229.

- Tyler, S.A.; Marsden, R.W.; Grout, F.F. & Thiel, G.A. 1940. Studies of the Lake Superior pre-Cambrian by accessory-mineral methods. **Bulletin Geological Society of American**, **51**:1429-1538.
- Veevers, J.J., Saeed, A., Belousova, E.A. & Griffin, W.L. 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton. **Earth Science Review**, **68**:245-279.
- Viator, D.B. 2003. **Detrital tourmaline as an indicator of provenance: a chemical and sedimentological study of modern sands from the Black Hills, South Dakota**. Louisiana, 85p. Dissertação de Mestrado, Louisiana State University. Disponível em: <http://etd02.lnx390.lsu.edu/docs/available/etd-0611103-101847>. Acesso em: 12 de setembro de 2004.
- Viero A.P. & Roisenberg A. 1992. Petrologia e geoquímica do Complexo Básico de Lomba Grande, RS. *Pesquisas*, **19**(1):41-54.
- Villwock J.A., Loss E.L., Dehnhardt E.A., Tomazelli L.J. & Hofmeister, T. 1979. Concentraciones de Arenas Negras a lo largo de la costa do Rio Grande do Sul. Memórias Del Seminário sobre Ecologia Bentônica y Sedimentación de la plataforma continental Del Atlántico Sur.
- Villwock, J.A.; Tomazelli, L.J.; Loss, E.L.; Dehnhardt, E.A.; Horn, N.O.; Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. (ed.). **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**. A.A. Balkema, Rotterdam. v. 4, p. 79-97.
- Villwock, J.A.; Loss, E.L.; Dehnhardt, E.A.; Tomazelli, L.J. & Hoffmeister, T. 1979. Concentraciones de arenas negras a lo largo de la costa de Rio Grande do Sul. Memorias del seminario sobre ecologia bentónica y sedimentación de la plataforma continental del atlántico sur. Montevideo. *In*: Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe, p. 405-414.
- Vitanage, P.W. 1957. Studies of zircon types in the Ceylon pre-Cambrian complex. **Journal of Geology**, **65**:117-128.
- Vollbrecht, A.; Oberthü, T.; Ruedrich, J. & Weber, C. 2002. Microfabric analyses to the Witwatersrand gold-and uranium-bearing conglomerates: constrains on the provenance and post-depositional modification of rock and ore components. **Mineralium Deposita**, **37**: 433-451.
- Weschenfelder, J.; Medeanic, S.; Corrêa, I.C.S. & Aliotta, S. 2006. Holocene paleoinlet of the Bojuru region, Lagoa dos Patos. **Journal of Coastal Research**, West Palm Beach-Florida, **22**(3):171-181.
- Wilson, M. 1989. **Igneous Petrogenesis**. Londres, Unwin Hyman, 466p.
- Wright, W.I. 1938. The composition and occurrence of garnets. **American Mineralogist**, **23**:436-449.
- Yokoyama, K., Amano, K., Taira, A. & Saito, Y. 1990. Mineralogy of silts from the Bengal Fan. In: OCEAN DRILLING PROGRAM, 116B, Science Results. **Proceedings...**p.59-73.
- Zack, T.; von Eynatten, H. & Kronz, A. 2004. Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. **Sedimentary Geology**, in press. Disponível em:

http://nt-server.min.uni-heidelberg.de/tzack/Zack_etal_04b.pdf. Acesso em 12 de novembro de 2004.

Zen, E-An & Hammarstrom, J. 1984. Magmatic epidote and its petrologic significance. **Geology**, **12**:515-518.