Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

**Proveniência dos depósitos de areia do rio Jacuí (RS),
utilizando a análise de minerais pesados**

Tamara França Machado, Marcus Vinicius Dorneles Remus

Pesquisas em Geociências, 38 (3): 269-282, set./dez., 2011.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/35166>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos
UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - set./dez., 2011.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Proveniência dos depósitos de areia do rio Jacuí (RS), utilizando a análise de minerais pesados

Tamara França MACHADO¹ & Marcus Vinicius Dorneles REMUS²

¹ PPGGEO - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS – Brasil. E-mail: tamara.machado@gmail.com

² DEMIPE - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS – Brasil. E-mail: marcus.remus@ufrgs.br

Recebido em 02/2011. Aceito para publicação em 10/2011.

Versão online publicada em 05/10/2012 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo- Este artigo discute a origem dos depósitos arenosos atuais do rio Jacuí, no sul do Brasil. O Jacuí constitui o principal rio do Estado do Rio Grande do Sul e contém os principais depósitos de areia utilizados na indústria de concreto do estado. O rio Jacuí e seus afluentes drenam as mais diversas áreas-fonte, com diferentes idades e associações litológicas, incluindo as rochas do Escudo Sul-rio-grandense (Pré-Cambriano), da Bacia do Paraná, onde está incluída a Formação Serra Geral (Cretáceo), e da Formação Tupanciretã (Terciário). As amostras foram coletadas de sedimentos fluviais em transporte para a análise de minerais pesados, ao longo do curso principal do rio e de seus principais afluentes. Os resultados demonstram uma grande diversidade de minerais pesados, incluindo: granada, turmalina, hornblenda, zircão, apatita, estaurolita, opacos (magnetita, ilmenita, hematita e pirita) e, minoritariamente, rutilo, piroxênio (hiperstênio principalmente), cianita, sillimanita, andaluzita, titanita, actinolita e tremolita. Esta assembleia de minerais pesados indica que a área-fonte principal dos sedimentos é o Escudo Sul-rio-grandense, proveniente dos afluentes da margem direita do Rio Jacuí. As rochas sedimentares da Bacia do Paraná também constituem uma importante área-fonte para os sedimentos. As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e as sedimentares fluviais da Formação Tupanciretã fornecem uma menor contribuição. Uma redução pequena, mas consistente, dos índices ATi e GZi ao longo do curso principal do rio, de montante para jusante, indica que os sedimentos sofreram decréscimo destes minerais ao longo da planície aluvial possivelmente devido ao intemperismo. Os valores do índice ZTR e ARi são relativamente constantes ao longo do rio principal. Além disso, o ARi é relativamente baixo. Os valores consistentes destes índices indicam uma forte contribuição dos afluentes do rio Jacuí. A assinatura de minerais pesados do rio Jacuí poderá ser utilizada para avaliar a contribuição dos sedimentos do rio no preenchimento da porção mais jovem da Bacia de Pelotas.

Palavras-chave: minerais pesados, proveniência sedimentar, rio Jacuí.

Abstract - PROVENANCE OF SAND DEPOSITS OF JACUI RIVER, RS USING HEAVY MINERAL SIGNATURES. This paper discuss the provenance of unconsolidated sand deposits of Jacui River, southern Brazil. It is the major river of Rio Grande do Sul and contains the main unconsolidated sand deposits used in the concrete industry of state. The river basin drains distinct geologic terrains with different ages and lithologic associations including Rio Grande do Sul Shield (Precambrian), Parana basin including Serra Geral Formation (Cretaceous) and Tupanciretã Formation (Tertiary). Heavy mineral analysis on selected samples collected along spots from the main course river and his afluentes have shown a diverse and large heavy mineral assemblage including: garnet, tourmaline, hornblende, zircon, apatite, staurolite, opaques (magnetite, ilmenite, hematite and pyrite) and minor rutile, pyroxene (mainly hypersthene), kyanite, sillimanite, andaluzite, titanite, actinolite and tremolite. This heavy mineral assemblage indicates that the main source-area for unconsolidated sands is the Rio Grande do Sul Shield through the afluentes from south Jacui River margin. Sedimentary rocks from several Parana basin formations are also important source-area for unconsolidated river sand. Volcanic rocks of Serra Geral and sedimentary fluvial rocks of Tupanciretã Formation source-areas show minor contribution. ATi and GZi have shown a consistent value decreasing along the main river course, from montante to jusante. Both index patterns indicate that alluvial sands have suffered weathering along the alluvial plain during the parking period. The ZTR (Zircon + Tourmaline + Rutile index) values are low, relatively constant and consistent along the main course river. Also the ARi (Apatite Rounded index) is relatively low and consistent along virtually all river course. Both ZTR and ARi indicate an important contribution from afluentes in order to maintain these consistent index values along river. Further, the heavy minerals signature of Jacui River, established in this work, would help to better understand the provenance and filling of young section of Pelotas basin.

Keywords: heavy minerals, sedimentary provenance, Jacui river.

1.Introdução

Este trabalho discute a proveniência dos depósitos arenosos inconsolidados que ocorrem ao longo do Rio Jacuí, cujo curso d'água principal corta o Estado do Rio Grande do Sul em sua porção central, na direção leste-oeste. O Jacuí corresponde ao maior rio do interior do referido estado e, apesar de constituir-se na drenagem mais importante para produção e extração de areia para a indústria de concreto da região, nada se sabe

sobre a importância e contribuição de cada área-fonte na geração desses depósitos.

As principais unidades litoestratigráficas que compõem tanto o Escudo Sul-rio-grandense como a Bacia do Paraná, incluindo as rochas da Formação Serra Geral, além dos depósitos terciários da Formação Tupanciretã, são drenadas pelo sistema do rio Jacuí (Fig. 1). Esta diversidade de áreas-fonte representa uma oportunidade para avaliar o peso da contribuição de cada uma destas unidades geológicas na produção dos depósitos

Figura 1. Mapa geológico simplificado do Rio Grande do Sul, com a localização do Rio Jacuí (modificado de CPRM, 2008). A localização da área de estudo está demarcada pelo retângulo pontilhado.

arenosos que ocorrem ao longo de seu leito. Por outro lado, a mistura destes sedimentos ao longo do curso principal do rio torna difícil a tarefa de discriminar a contribuição das diferentes áreas-fonte, constituindo-se num desafio científico de grande magnitude. Desta forma, este trabalho é pioneiro na tentativa de discriminar e avaliar estes parâmetros no sistema de drenagem do rio Jacuí e representa um esforço inicial para o avanço do conhecimento destas variáveis. As perguntas levantadas neste trabalho, em parte respondidas ou que abrem perspectivas para novas investigações, são:

(a) Quais são as áreas-fonte e respectivas litologias ou associações litológicas que mais contribuem para a formação dos depósitos de areia do rio?
(b) Quais as relações entre os diferentes intervalos de classe granulométrica dos depósitos de areia e as áreas-fonte?

(c) Por que o rio Jacuí é o sistema que produz o tipo de areia mais apropriada para utilização na indústria de concreto no Rio Grande do Sul?

Utiliza-se neste trabalho a análise convencional de minerais pesados e de pares mineralógicos (Morton & Hallsworth, 1994), juntamente com estudos de granulometria do rio Jacuí e principais afluentes, para a definição de sua proveniência com identificação das áreas-fonte dos sedimentos e suas rotas de distribuição. A composição da assembléia de minerais pesados com suas diferentes proporções indica a proveniência dos sedimentos, tendo em vista as paragêneses restritas de suas ocorrências nas rochas-fonte (Hubert, 1971; Morton, 1985; Mange & Maurer, 1992). A análise de minerais pesados é uma das técnicas mais precisas aplicadas atualmente na determinação da proveniência da areia de depósitos arenosos inconsolidados e consolidados, produzindo informações diretas sobre a proveniência, através das associações mineralógicas contidas nos mais diversos tipos de rochas (Hubert, 1971; Morton, 1985; Pereira *et al.*, 2005).

A área de estudo está compreendida, aproximadamente, entre os paralelos 29°30' e 30°30' e os meridianos 54° e 51°.

2. Análise de minerais pesados

São considerados minerais pesados aqueles que possuem densidade igual ou superior a 2,85g/cm³, ou seja, maior que o quartzo e o feldspato. Os minerais pesados estão comumente presentes nas rochas como constituintes menores ou como minerais acessórios (Bates & Jackson, 1980; Mange & Maurer, 1992; Addad, 2001).

A importância atribuída a estes minerais se deve à aplicabilidade de seu estudo nas áreas da sedimentologia, estratigrafia e geologia econômica. Na sedimentologia, os minerais pesados são utilizados em estudos de proveniência e dispersão de sedimentos, devido às paragêneses restritas em determinados tipos de rochas.

A quantidade dos minerais pesados em um determinado local depende principalmente de sua abundância na área-fonte, porém a intensidade dos processos atuantes durante o ciclo sedimentar também pode influenciar na composição da assembléia de minerais pesados, como, por exemplo: tipo de intemperismo na área-fonte, abrasão mecânica, fracionamento hidráulico e dissolução intraestrat. Ou seja, os sedimentos podem ser modificados, de forma que sua composição pode ser alterada por perdas ou por enriquecimento seletivo (Pettijohn, 1975; Morton, 1985; Morton & Hallsworth, 1999). Para o estudo da proveniência, é necessário agregar a análise mineralógica ao conhecimento da estabilidade mineral, mecânica e química.

Para minimizar os efeitos dos processos que interferem no sinal de proveniência, Morton & Hallsworth (1994, 1999) descreveram diversos índices mineralógicos para determinar a proveniência e suas modificações durante o ciclo sedimentar. Para este trabalho foram utilizados os índices de pares mineralógicos ATi (100 x apatita / apatita+turmalina) e o GZi (100 x granada / granada+zircão). Ambos os índices são sensíveis ao intemperismo, porém o índice ATi é muito mais sensível do que o GZi.

Além destes índices, foi utilizado o ZTR (100 x zircão+turmalina+rutilo / total de grãos translúcidos), proposto por Hubert em 1962. O índice ZTR indica a maturidade mineralógica do sedimento, tendo em vista que estes três minerais utilizados são considerados ultra-estáveis. A avaliação da maturidade mineralógica deve considerar também o aspecto textural, pois áreas-fonte com abundância num destes minerais (turmalina por ex.) podem resultar num índice elevado e não necessariamente representarem sedimentos maduros. Além disso, a turmalina possui uma densidade menor (3,0-3,25) se comparada ao rutilo (4,2-5,5) e ao zircão (4,6-4,7) e, portanto, sofrerá um fracionamento hidráulico maior, sendo mais facilmente transportada.

Para avaliar a história de transporte dos sedimentos e mudanças de proveniência, foi utilizado o índice ARi (100 x apatita arredondada / apatita total) que avalia o grau de arredondamento da apatita (Allen & Mange-Rajeztky, 1992).

As várias técnicas disponíveis e utilizadas para análise de proveniência, focalizando minerais pesados, foram sintetizadas por Remus *et al.*, (2008). Entre elas estão: a análise convencional de minerais pesados, que consiste na determinação da composição de todas as espécies da assembléia de minerais pesados presentes nos arenitos, através da análise microscópica com a identificação e quantificação modal de 300 grãos translúcidos da assembléia total; e a análise varietal de minerais pesados, que qualifica as diferentes variedades de espécies de minerais pesados individuais, baseado no conhecimento de que a maioria dos minerais acessórios forma-se numa diversidade de tamanhos e hábitos e são representados por diversas variedades químicas, estruturais, de coloração e ótica, controladas primariamente pelas condições físico-químicas durante a sua (re)cristalização (Mange & Wright, 2007). As variáveis mais utilizadas na análise de minerais pesados de alta resolução consistem de: morfologia, cor e estrutura interna dos grãos.

Entretanto, a discriminação de cor, variedades de pleocroísmo e outras propriedades óticas são parâmetros subjetivos e podem variar de acordo com a interpretação utilizada por diferentes analistas. Para eliminar esta subjetividade, diversos métodos analíticos conduzem a determinação da composição química elementar de grãos detríticos individuais permitindo sua classificação geoquímica.

3. Contexto geológico

Para este trabalho foi feita uma revisão bibliográfica sintética da geologia do Rio Grande do Sul, abordando a Bacia do Paraná, incluindo a Formação Serra Geral, e as principais rochas que constituem o Escudo Sul-rio-grandense. Além disso, as rochas da Formação Tupanciretã, que correspondem a sedimentos cenozóicos depositados sobre as rochas da Formação Serra Geral, também são abordadas de forma sucinta.

A Bacia do Paraná corresponde a uma ampla bacia sedimentar situada na porção centro-leste da América do Sul e é constituída por rochas sedimentares e ígneas, agrupadas em seis superseqüências com registro de rochas do Ordoviciano ao Cretáceo (Milani & Zalán, 1999; Milani *et al.*, 2007).

Não existem estudos significativos que forneçam informações precisas sobre a composição de minerais pesados que constitui as diferentes formações sedimentares da Bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul, e este trabalho embora não focalize especificamente a bacia, traz alguns

dados novos visando contribuir para preencher em parte esta lacuna.

No Rio Grande do Sul, as diferentes formações que constituem a Bacia do Paraná, das mais jovens para as mais antigas, podem ser divididas em: Grupo São Bento (Formação Serra Geral, Formação Botucatu e Formação Guará), Grupo Rosário do Sul (Formação Caturrita, Formação Santa Maria e Formação Sanga do Cabral), Grupo Passa Dois (Formação Pirambóia, Formação Rio do Rastro, Subgrupo Estrada Nova e Formação Irati), Grupo Guatá (Formação Palermo e Formação Rio Bonito) e Grupo Itararé (Formação Taciba) (CPRM, 2008).

A Formação Serra Geral corresponde ao evento ígneo efusivo que resultou na formação de espessa sucessão vulcânica, que recobriu as rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Esta formação é composta por rochas vulcânicas básicas e ácidas, sendo predominantemente máficas (Roisenberg, 1989). No Rio Grande do Sul, predominam basaltos de coloração escura devido à granulação fina e presença de minerais ferro-magnesianos, opacos e vidros. Os principais minerais pesados que compõem as rochas da Formação Serra Geral são os piroxênios. Os piroxênios são representados pela augita e pigeonita e podem apresentar pequenas coroas de reações para anfibólios do tipo hornblenda, alterando-se para silicatos do tipo clorita. Os minerais acessórios são apatita, opacos (magnetita e ilmenita) e zircão (IBGE, 1986). O principal mineral opaco encontrado na Formação Serra Geral é a magnetita, que se altera diretamente para óxidos de ferro (hematita e goethita) (Clemente, 1988).

O Escudo Sul-rio-grandense, de idade predominantemente pré-cambriana, possui quatro grandes segmentos (Holz & De Ros, 2000). Na porção leste está localizado o Batólito de Pelotas, composto principalmente por granitoides e, secundariamente, por rochas ígneas básicas e gnaisses/migmatitos do embasamento cristalino. As rochas do Batólito de Pelotas são formadas por uma grande variedade mineralógica, sendo os principais minerais pesados constituintes das mesmas: epidoto, hornblenda, piroxênios, turmalina, granada, zircão, apatita, monazita, titanita, rutilo, olivina, sillimanita e opacos.

A oeste do batólito estão as rochas metasedimentares e metavulcânicas que compõem o Cinturão Porongos. Os principais minerais pesados encontrados nas rochas que constituem o Cinturão Porongos são: cianita, andaluzita, sillimanita, cloritoide, granada, estauroлита, epidoto, olivina, anfibólio (hornblenda e anfibólios sódicos), actinolita-tremolita, zircão, apatita, turmalina, monazita, rutilo, clinopiroxênio, além dos minerais opacos.

Na porção noroeste do terreno ocorre o Bloco São Gabriel, composto por diversos cinturões meta-vulcanossedimentares de origem diversificada, além de rochas plutônicas, vulcânicas e uma bacia molássica (Bacia do Camaquã). No Bloco São Gabriel, os principais minerais pesados identificados nas rochas são: olivina, piroxênios, grana-da, cloritóide, estauroлита, andaluzita, sillimanita, espinélio verde, hornblenda, actinolita-tremolita, apatita, zircão, turmalina, titanita, rutilo, epidoto e minerais opacos.

Ao sul do Bloco São Gabriel encontra-se o Bloco Taquarembó que é composto principalmente pelo Complexo Granulítico Santa Maria Chico, que constitui a unidade mais antiga da região. O Bloco Taquarembó não oferece contribuição de sedimentos ao rio Jacuí e, portanto, não será discutido neste trabalho.

A cobertura sedimentar cenozóica engloba diferentes tipos de depósitos sedimentares: Formação Tupanciretã e Santa Tecla, do Terciário; Formação Graxaim, do Terciário-Quaternário; Formação Chuí e Itapuã, do Pleistoceno; Depósitos Sedimentares, do Holoceno. A Formação Tupanciretã (Menegotto *et al.*, 1968) é restrita ao estado do Rio Grande do Sul e é composta de arenitos, arenitos conglomeráticos, conglomerados e finas camadas de argilito, cuja origem tem sido bastante discutida, embora a mais aceita seja relacionada a um ambiente fluvial (Menegotto, 1971). Trabalhos a respeito da Formação Tupanciretã são escassos e pouco se sabe a respeito da mineralogia destas rochas, sendo que o único trabalho com informações a respeito dos minerais pesados desta formação é o de Menegotto (1971), que identificou os seguintes minerais pesados na Formação Tupanciretã: opacos, turmalina, zircão, estauroлита, grana-da, monazita, cianita, esfero e epidoto.

4. Materiais e métodos

Foram coletadas 19 amostras de sedimentos ativos (em transporte), congregando áreas da Bacia Hidrográfica do Vacacaí-Vacacaí Mirim e do Baixo Jacuí, além de uma amostra coletada na Bacia

Hidrográfica do Alto Jacuí. Destas 19 amostras, 7 foram coletadas no rio Jacuí e 12 em rios afluentes (Fig. 2).

As amostras coletadas foram secas, quarteadas e peneiradas para a retirada da fração inferior a 62 µm (silte e argila). Posteriormente, as amostras totais foram peneiradas para a separação das frações de areia muito grossa (Tyler 16#), areia grossa (Tyler 32#), areia média (Tyler 60#), areia fina (Tyler 115#) e areia muito fina (Tyler 250#). Cada fração foi pesada em balanças de precisão para a confecção do gráfico de dispersão granulométrica.

Para a análise de minerais pesados foi usada a fração de 63-250 µm, ou seja, areia fina e muito fina. Este intervalo granulométrico é utilizado pela escola italiana (Zuffa & Serra, 2007), pois apresenta a maior concentração de minerais pesados. É recomendado o uso de uma fração granulométrica restrita para minimizar os efeitos do fracionamento hidráulico durante o transporte e/ou deposição. A fração total foi peneirada e a fração concentrada de areia fina + areia muito fina foi utilizada para a separação dos minerais pesados com a utilização de um líquido denso (bromo-fórmio, $\rho=2,85\text{g/cm}^3$), conforme metodologia descrita por Mange & Maurer (1992).

A observação petrográfica foi realizada em lâminas de vidro com montagem de grãos de minerais pesados em meio líquido (alpha-monobromo naftaleno), cujo índice de refração corresponde a 1,658. A quantificação dos grãos serve para estimar as proporções dos diferentes minerais, bem como as formas e inclusões dos principais minerais. Em cada lâmina foram quantificados 300 grãos de minerais pesados translúcidos não-micáceos em microscópio binocular. Este processo é conhecido como “ribbon counting” e foi descrito por Galehouse (1971) e Mange & Maurer (1992). A identificação dos minerais pesados detríticos exige treino especializado em mineralogia ótica.

Foi utilizado um ímã de mão para a separação da magnetita e os demais minerais opacos foram identificados em lupa binocular.

Figura 2. Mapa geológico simplificado da área estudada, contendo a localização das amostras coletadas (modificado de CPRM, 2008).

5. Granulometria e minerais pesados

Todas as amostras coletadas foram peneiradas e pesadas em balanças com precisão de 0,0001g para análise granulométrica. O resultado das proporções percentuais das frações de areia está ilustrado na figura 3.

As amostras coletadas foram divididas em três grupos distintos, divididos regionalmente, com o objetivo de auxiliar a interpretação dos dados:

1) Norte - onde estão incluídas as amostras 5, 6 e 9, coletadas em afluentes que drenam principalmente rochas da Bacia do Paraná, e a amostra 4, coletada na porção montante do rio Jacuí;

2) Sul - amostras coletadas em afluentes que drenam diretamente o Escudo Sul-riograndense (7, 1, 3, 2, 12, 11, 13, 14 e 15);

3) Jacuí - amostras coletadas no rio Jacuí, no trecho do rio onde ocorre mineração de areia.

Os resultados granulométricos mostram que as amostras 4, 5, 6 e 9 (Norte) possuem uma granulometria mais fina (menos de 40% de areia

grossa e/ou muito grossa). Os pontos com maior concentração de areia grossa e/ou muito grossa são os 7, 1, 3, 2, 12, 11, 13, 14 e 15 (Sul), localizados na margem direita do rio Jacuí, próximo às nascentes que drenam o Escudo.

Depois da separação dos minerais pesados contidos nas frações fina e muito fina, os minerais foram pesados para obtenção da proporção de leves e pesados de cada amostra. A concentração média dos minerais pesados nas amostras estudadas é de aproximadamente 1%.

Os principais minerais pesados identificados consistem em: granada, turmalina, hornblenda, zircão, apatita, epidoto e estauroлита. Além destes minerais, foram identificados: rutilo, piroxênio, cianita, sillimanita, andaluzita, titanita, actinolita e tremolita (Fig. 4). O principal piroxênio identificado foi o hiperstênio, porém alguns grãos de enstatita e diopsídio foram identificados no ponto 4. Os minerais opacos identificados na lupa (não quantificados) são: illmenita, hematita, magnetita e, ocasionalmente, pirita.

Figura 3. Gráfico da dispersão granulométrica das amostras estudadas (eixo x), abrangendo as frações: AMG=areia muito grossa; AG=areia grossa; AM=areia média; AF=areia fina; AMF=areia muito fina. O eixo y reflete a porcentagem de cada fração em relação à soma da fração total (AMG + AG + AM + AF + AMF).

Figura 4. Proporção da assembléa mineralógica presente nas amostras estudadas (eixo x). Ky-Sil-And = cianita + sillimanita + andaluzita).

Granada: este mineral está presente em quase todas as amostras estudadas, com exceção da amostra 14. Os grãos apresentam-se geralmente sub-angulares a sub-arredondados, com inclusões granulares não orientadas. Sua coloração é, em geral, incolor a rosa claro, porém foram identificados alguns grãos de tonalidades mais avermelhadas. Nos pontos 10, 16, 17, 18 e 19, foram identificadas granadas com bordas facetadas (Fig. 5a).

Turmalina: este mineral encontra-se predominantemente marrom, com intenso pleocroísmo e formas arredondadas e sub-arredondadas (Fig. 5b). A turmalina está ausente na amostra 3 e é encontrada em abundância nas amostras 5, 9, 11 e 13. Em alguns pontos foram identificadas turmalinas azuis em pequena quantidade (0,3-4%). As turmalinas angulares predominam nos pontos 4, 11, 14, 15 e 16.

Hornblenda: mineral frequente em todas as amostras estudadas. Foram identificadas duas variedades distintas: (a) hornblenda verde, identificada em todos os pontos; (b) hornblenda marrom. Os grãos encontram-se angulares a sub-

angulares em sua maioria e possuem bordas serrilhadas em alguns pontos (Fig. 5c).

Zircão: foram identificados grãos de zircão angulares, sub-angulares, sub-arredondados e arredondados. Os minerais encontram-se, em geral, em formas de prismas curtos, sendo poucos grãos alongados. Nas amostras 10, 11, 13, 15 e 19 foram encontrados grãos euédricos (Fig. 5d). Este mineral foi identificado em todas as amostras, com exceção da amostra 2.

Epidoto: o grupo do epidoto é representado pela zoisita, clinozoisita e a variedade epidoto (pistacita). Os grãos apresentam-se predominantemente angulares. Nenhum mineral do grupo do epidoto foi identificado na amostra 11.

Estauroлита: este mineral encontra-se predominantemente angular, sendo o principal mineral translúcido identificado na amostra 12 e ausente somente na amostra 3.

Apatita: A apatita foi identificada em todas as amostras estudadas e a variação de seu grau de arredondamento está representada nas figuras 6 e no quadro 1.

Figura 5. (A) granada facetada e arredondada; (B) turmalina arredondada; (C) hornblenda com bordas serrilhadas; (D) zircão euédrico com núcleo herdado e forma bipiramidada.

A análise, identificação e quantificação dos grãos detríticos permitiu a confecção dos gráficos GZi, ATi e ZTR para as amostras coletadas na região minerável do rio Jacuí. Estes índices apresentam os

padrões mostrados na figura 6. A tabela 1 mostra as médias dos valores para os índices GZi, ATi, ZTR e ARi, de todas as amostras estudadas.

Figura 6. Gráficos referentes aos índices mineralógicos das amostras coletadas no rio Jacuí, na região onde ocorre mineração de areia. Todas as amostras estão ordenadas de montante (esq.) para jusante (dir.).

	Amostras	GZi	ATi	ARi	ZTR
SUL	3	87,18	100,00	0,00	1,11
	1	84,62	82,05	9,38	1,89
	2	100,00	84,24	5,04	3,78
	7	14,71	95,00	0,00	4,22
	12	80,00	34,62	0,00	2,22
	11	15,79	6,52	8,33	22,11
	13	60,00	54,81	0,00	9,33
	14	0,00	1,27	0,00	27,00
	15	5,00	76,39	0,91	8,33
	MÉDIA	49,70	59,43	2,63	8,89
NORTE	desvio padrão	40,34	37,33	3,89	9,39
	4	55,56	54,89	32,88	8,89
	5	48,00	11,73	14,29	23,67
	6	52,21	42,31	6,06	14,00
	9	53,66	5,44	12,50	19,22
JACUÍ	MÉDIA	52,35	28,59	16,43	16,44
	desvio padrão	3,21	23,80	11,52	6,40
	8	81,67	82,31	8,41	4,00
	10	48,03	63,33	12,28	11,78
	18	41,00	72,62	8,20	9,67
	16	66,67	78,41	5,80	5,56
	17	54,24	58,12	11,76	8,56
	19	30,65	34,38	13,64	9,67
JACUÍ	MÉDIA	46,04	55,59	8,58	7,03
	desvio padrão	18,31	17,47	3,00	2,89

Quadro 1. Valores dos índices GZi, ATi, ARi e ZTR de todas as amostras estudadas.

6. Discussão e conclusões

Os sedimentos do Rio Jacuí possuem uma grande diversidade mineralógica devido à diversidade de áreas-fonte drenadas pelos seus afluentes.

Os minerais pesados identificados nas amostras incluem: granada, turmalina, hornblenda, zircão, apatita, estauroilita, opacos (magnetita, ilmenita, hematita e pirita) e rutilo; minoritariamente piroxênio (principalmente hiperstênio), cianita, sillimanita, andaluzita, titanita, actinolita e tremolita.

Grande parte das interpretações de proveniência das areias do rio Jacuí baseou-se nos dados de valores médios dos índices mineralógicos descritos anteriormente (ARi, GZi, ATi e ZTR).

O ARi mostra valores relativamente baixos e constantes ao longo do curso principal do Rio Jacuí. Isto ocorre devido à influência dos inúmeros afluentes do rio, que realimentam os sedimentos do canal principal. A média de valores das amostras da região sul é menor (2,6) que a média das amostras da região norte (16,4) que correspondem a sedimentos principalmente policíclicos, ou seja, derivados de rochas sedimentares. O valor médio das amostras do rio Jacuí é intermediário (8,6).

O índice GZi mostra, em direção à foz, o decréscimo de granada em relação ao zircão ao longo do canal principal do Jacuí. Isto se deve aos processos de intemperismo, no qual a granada é relativamente instável e o zircão, ultra-estável. O índice ATi indica um empobrecimento de apatita comparado à turmalina, demonstrando que estes minerais foram submetidos a intemperismo durante o período de exposição dos sedimentos nos aluviões, em ambiente de pH ácido, no qual a apatita é muito instável.

De modo geral, os processos intempéricos não causaram redução significativa na diversidade mineralógica, apenas um pequeno decréscimo na razão de alguns minerais, como a granada e a apatita, por exemplo.

Os índices mineralógicos ATi e ZTR de todas as areias estudadas foram os mais úteis para identificar a origem das mesmas, no trecho minerado do leito do rio Jacuí. Por exemplo, a média do índice ATi é de 55,6 nas areias do rio Jacuí e 59,4 nos afluentes provenientes do Escudo Sul-rio-grandense (Sul). A média do índice ZTR das areias do fluxo principal do rio Jacuí é de 7,0, enquanto a média nos afluentes do escudo é de 8,9. Isto sugere que a principal fonte de areias do rio Jacuí são as rochas do escudo. Em contraste, as rochas da Bacia do Paraná (sedimentares e

vulcânicas) e as areias fluviais da Formação Tupanciretã forneceram contribuições menores. Os baixos valores do índice de arredondamento da apatita encontrados nos sedimentos do rio corroboram esta conclusão.

As amostras coletadas nos afluentes da margem direita do Jacuí (Sul), que drenam rochas do Escudo Sul-rio-grandense, mostram uma grande contribuição de sedimentos oriundos deste, caracterizado pela maior angulosidade dos grãos e pelas médias dos índices mineralógicos, principalmente ARi e ZTR baixos. As principais características que marcam estes sedimentos são: a grande proporção de apatita, em comparação às amostras coletadas na região norte (5, 6 e 9), com formas predominantemente angulares, gerando ARi baixo (chegando a zero em muitos pontos); e um baixo índice ZTR (amostras 1, 2, 3, 7, 12, 13 e 15), com exceção dos pontos 11 e 14. O ZTR alto nos pontos 11 e 14, se deve à grande concentração de turmalina, que pode provir de granitos, pegmatitos e turmalinitos. Estas rochas são encontradas frequentemente no Batólito de Pelotas (amostra 14), mas também ocorrem no Cinturão Porongos (amostra 11).

Os pontos 1 e 3 foram coletados de afluentes que drenam rochas do Bloco São Gabriel, contribuindo principalmente com epidoto e hornblenda. Os pontos 2 e 7, também possuem influência de sedimentos trazidos do escudo, porém possuem uma percentagem maior de apatita, provavelmente devido à influência, embora pequena, das rochas da Bacia do Paraná, mais especificamente do Grupo Guatá (Formação Palermo e Rio Bonito). A amostra 12 possui uma grande percentagem de estauroilita (86%), proveniente do Cinturão Porongos. A amostra 15 foi coletada no Batólito de Pelotas e reflete uma assinatura consistente com as associações de minerais pesados encontrados nas rochas aflorantes nesta região.

Os afluentes da margem norte (4, 5, 6 e 9) refletem a proveniência da Bacia do Paraná, porém as amostras que possuem assinatura mais precisa da bacia são a 5 e a 9.

A amostra 4 foi coletada no ponto mais à montante do Jacuí e apresenta algumas ambiguidades: o grau de arredondamento da apatita é alto, enquanto os demais minerais encontram-se predominantemente angulares. Nesta amostra também foi identificada uma grande percentagem de hiperstênio (17%) com bordas de dissolução. Este mineral é muito instável e dificilmente sobrevive ao soterramento em bacias sedimentares. A angulosidade elevada dos minerais

sugere uma rocha-fonte próxima, pouco retrabalhada e uma hipótese é que estes sedimentos podem ser derivados das rochas da Formação Tupanciretã (Cenozóico), de origem fluvial, que recobre as rochas da Formação Serra Geral e são drenadas por afluentes do rio Jacuí. Estudos mais detalhados sobre esta formação seriam necessários para corroborar a hipótese. O grau elevado de arredondamento das apatitas pode sugerir que este mineral provém de rochas da Formação Botucatu (eólico), possuindo uma contribuição preferencial desta área-fonte.

Embora o ponto 6 tenha sido incluído no grupo Norte e possua uma grande contribuição de sedimentos oriundos da Bacia do Paraná, ele possui um ZTR mais baixo (14) em comparação às amostras 5 e 9 (média 23,7 e 19,2 respectivamente) e uma proporção maior de granada em comparação às demais amostras do grupo (4, 5 e 9), sugerindo uma pequena contribuição de sedimentos oriundos do escudo (Bloco São Gabriel).

A amostra 5 foi coletada em um afluente que drena apenas rochas da Bacia do Paraná, sem influência do Escudo Sul-Riograndense, permitindo indicar uma assinatura mineralógica e textural típica para este ponto da bacia: turmalina (53%), rutilo (14%), apatita (7%), epidoto (7%), estauroлита (5%), hornblenda (5%), zircão (4%) e granada (4%). Os minerais mais instáveis, tais como estauroлита, epidoto e hornblenda, possuem texturas indicativas de dissolução (bordas serrihadas). Os grãos desta amostra encontram-se predominantemente angulares ou sub-angulares, indicando proveniência de arenitos fluviais e não eólicos (Grupo Rosário do Sul, por exemplo).

A amostra 9, coletada na margem esquerda do rio Jacuí (Norte), onde afloram rochas da Formação Sanga do Cabral, possui a seguinte assinatura mineralógica: turmalina (46%), epidoto (24%), granada (7%), rutilo (5%), apatita (3%), estauroлита (3%), sillimanita (2%), anfibólio (2%), titanita (1%) e cianita (1%).

As granadas dos pontos coletados no rio Jacuí, mais à jusante do canal (amostras 10, 16, 17, 18 e 19), possuem feições internas facetadas e bordas arredondadas, indicativas de terem sofrido dissolução na diagênese (Morton *et al.*, 2004) ou intemperismo químico na planície aluvial e posteriormente abrasão durante o retrabalhamento sedimentar. Esta textura não foi identificada nas amostras da porção norte da bacia (5, 6 e 9), tampouco nas amostras localizadas mais à montante do rio (4 e 8). Isto indica que estas granadas sofreram alterações devido ao intemperismo.

Os resultados deste trabalho indicam que

as areias que alimentam o curso principal do rio Jacuí são provenientes, principalmente, dos afluentes com cabeceiras localizadas no Escudo (sul da bacia) em comparação com os afluentes provenientes do norte que captam sedimentos da escarpa.

Os resultados da análise granulométrica demonstram uma granulometria mais grossa (predominantemente maior que 0,5mm) em amostras coletadas nos afluentes que drenam rochas do escudo. As amostras que possuem forte contribuição de sedimentos da Bacia do Paraná e da Formação Serra Geral possuem uma granulometria mais fina.

As areias do Rio Jacuí possuem contribuição de áreas fontes-distintas, envolvendo terrenos de idades e natureza completamente diferentes, de modo a produzir areais com uma ampla distribuição granulométrica nos diferentes intervalos. Desta forma, a areia produzida pela mistura dos diversos afluentes resulta num excelente produto para uso na indústria do concreto, devido à presença das diversas classes granulométricas que constituem os sedimentos estudados. Tais classes granulométricas presentes podem ser explicadas pela natureza distinta das áreas-fonte (mais grossa para o escudo e mais fina para a Bacia do Paraná).

Conclui-se que as principais áreas-fonte que contribuem para a formação de sedimentos na região hidrográfica do rio Jacuí são as rochas do Escudo Sul-rio-grandense, seguidas pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Outra fonte possível, mas com pequena área de afloramento, são os arenitos da Formação Tupanciretã. Não foram identificadas contribuições significativas das rochas da Formação Serra Geral na composição dos minerais pesados estudados. Os principais minerais pesados que compõem as rochas desta formação são os piroxênios (augita e pigeonita), que se alteram facilmente para argilominerais, além de óxidos do tipo magnetita e minoritariamente hematita.

Os índices mineralógicos determinados neste trabalho (GZi, ATi, ZTR e ARi) representam a assinatura de minerais pesados do Rio Jacuí e podem ser utilizados futuramente para avaliar a contribuição destes sedimentos no preenchimento da porção mais jovem da Bacia de Pelotas.

Agradecimentos: Agradecemos ao CNPq - Processo 475634/2009-8 (Universal) pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa e pelas Bolsas PQ e CAPES - Mestrado. Agradecemos às empresas mineradoras SMARJA e SOMAR pelo auxílio no fornecimento de parte das amostras deste trabalho. Um agradecimento especial ao CECO (Centro de Estudos Costeiros e Oceânicos) - UFRGS, pela infra-estrutura disponibilizada para a preparação e armazenamento das amostras estudadas.

Referências

- Addad J.E., 2001. *Minerais Pesados: uma ferramenta para prospecção, proveniência, paleogeografia e análise ambiental*. São Paulo, Imprensa Universitária. Centro Gráfico da UFMG, 80p.
- Allen P.A. & Mange-Rajetzky M.A. 1992. Sedimentary Evolution of the Devonian Carboniferous Clair Field, Offshore Northwestern UK: Impact of Changing Provenance. *Marine and Petroleum Geology*, 9:29-52.
- Bates, R.L. & Jackson, J.A., 1980. *Glossary of Geology*. Falls Church, VA. American Geological Institute. 751p.
- Clemente, C.A., 1988. *Alterações e solos desenvolvidos sobre rochas vulcânicas ácidas da formação Serra Geral nos Planaltos de Guarapuava e Palmas, Região Centro-Sul do Estado do Paraná*. Piracicaba. 211p Tese de doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2008. *Geologia e Recursos Minerais do estado do Rio Grande do Sul*. Programa Geologia do Brasil. 1 CD-ROM.
- Galehouse, J. S. 1971. Sedimentation Analysis, In: Carver R.E. (Ed.). *Procedures in sedimentary petrology*. New York, John Wiley & Sons. p. 69-94.
- Holz, M. & De Ros, L.F., 2000. *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CIGO/UFRGS Porto Alegre, 444p.
- Hubert J.F., 1962. A Zircon-Tourmaline-Rutile Maturity Index and the Interdependence of the Composition of Heavy Mineral Assemblages with the Gross Composition and Texture of Sandstones. *Journal Sedimentary Petrology*, 32:40-450.
- Hubert J.F., 1971. Analysis of Heavy-Mineral Assemblage. In: Carver R.E. (ed.) *Procedures in Sedimentary Petrology*. Athens, Geórgia, Wiley Interscience, p. 453-478.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1986. *Levantamento de Recursos Naturais*, 33. Rio de Janeiro, IBGE, 796p.
- Mange M.A. & Maurer H.F.W., 1992. *Heavy Mineral in Colour*. London Chapman & Hall. 147p.
- Mange M.A. & Wright, D.T., 2007. High-Resolution Heavy Mineral Analysis (HRMA): a brief summary. In: Mange, M.A. & Wright, D.T. (Eds.). *Developments in Sedimentology*, 58:433-436.
- Menegotto, E., 1971. *Sedimentologia da Formação Tupanciretã*. Dissertação de Mestrado em Geociências. 58p. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Menegotto, E., Sartori, P.L. & Maciel Filho, C.L., 1968. Nova sequência sedimentar sobre a Serra Geral no Rio Grande do Sul. *Publicação Especial da Secção de Geologia do Instituto de Solos e Culturas da UFSM*, Santa Maria, 1:1-19.
- Milani, E.J., & Zalán, P.V., 1999. Outline of the Geology and Petroleum Systems of the Paleozoic Interior Basins of South America. *Episodes*, 22: 99-205.
- Milani, E.J.; França, A.B. & Medeiros, R.A., 2007. Roteiros Geológicos, Rochas geradoras e rochas-reservatório da Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15 (1): 135-162.
- Morton, A.C., 1985. Heavy Minerals in Provenance Studies. In: G.G. Zuffa (Ed.). *Provenance of Arenites*. Reidel, Dordrecht, p.249-227.
- Morton, A.C. & Hallsworth, C., 1994. Identifying Provenance-Specific Features of Detrital Heavy Mineral Assemblages in Sandstones. *Sedimentary Geology*, 90:241-256.
- Morton, A.C. & Hallsworth, C., 1999. Processes Controlling the Composition of Heavy Mineral Assemblages in Sandstones. *Sedimentary Geology*, 124:3-29.
- Morton, A.C., Borg, G., Hansley, P.L., Haughton, P.D.W., Krinsley, D.H. & Trusty, P. 1989. The origin of faceted garnets in sandstones: dissolution or overgrowth. *Sedimentology*, 36: 927-942.
- Pereira, R.M., Ávila C.A. & Lima, P.R.A.S., 2005. *Minerais em grãos: técnicas de coleta, preparação e identificação*. Oficina de Textos. 128p.
- Pettijohn, F., 1975. *Sedimentary Rocks*. Harper Row Publishers. New York, USA. 628p.
- Roisenberg, A., 1989. *Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da Província Meridional da Bacia do Paraná*. Tese de doutorado, 285p. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Remus M.V.D.; Souza R.S.; Cupertino J.A. S; De Ros L.F., Dani & N. Vignol, M.L. 2008. Proveniência sedimentar: métodos e técnicas analíticas aplicadas. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(2 -suplemento):166-185.
- Zuffa, G. & Serra, F., 2007. *Developments in Sedimentology*, 58(9): 263-276.

No Prelo