

## Análise Estatística da Concentração de Potássio Obtida por Aerolevantamentos Geofísicos em Diferentes Formações Geológicas na Região de Santa Maria (RS)

JOÃO EDUARDO DA SILVA PEREIRA<sup>1</sup>, JOSÉ LUIZ SILVÉRIO DA SILVA<sup>2</sup>, ADELIR JOSÉ STRIEDER<sup>3</sup>, CARLOS ALBERTO DA FONSECA PIRES<sup>4</sup>

1. Departamento de Estatística, Universidade Federal de Santa Maria Campus Universitário, Camobi, Santa Maria, RS, CEP 97105-900. jesp61@gmail.com
2. Laboratório de Hidrogeologia Universidade Federal de Santa Maria Campus Universitário, Camobi, Santa Maria, RS, CEP 97105-900
3. Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS CEP 91501-970
4. Laboratório de Hidrogeologia Universidade Federal de Santa Maria Campus Universitário, Camobi, Santa Maria, RS, CEP 97105-900

(Recebido em 02/07. Aceito para publicação em 05/08)

**Abstract** - The present work was developed in outcrops of Santa Maria region, southern Brazil, Rio Grande do Sul State. Statistic evaluations were applied in different rock types. The possibility to distinguish different geologic units, sedimentary and volcanic (acid and basic types) by means of the statistic analyses from the use of airborne gamma-ray spectrometry integrating potash radiation emissions data with geological and geochemistry data is discussed. This Project was carried out at 1973 by Geological Survey of Brazil/*Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais*. The *Camaquã* Project evaluated the behavior of potash concentrations generating XYZ Geosof 1997 format, one grid, thematic map and digital thematic map files from this total area. Using these data base, the integration of statistics analyses in sedimentary formations which belong to the *Depressão Central do Rio Grande do Sul* and/or to volcanic rocks from *Planalto da Serra Geral* at the border of Paraná Basin was tested. Univariate statistics model was used: the media, the standard media error, and the trust limits were estimated. The Tukey's Test was used in order to compare mean values. The results allowed to create criteria to distinguish geological formations based on their potash content. The back-calibration technique was employed to transform K radiation to percentage. Inside this context it was possible to define characteristic values from radioactive potash emissions and their trust ranges in relation to geologic formations. The potash variable when evaluated in relation to geographic Universal Transverse Mercator coordinates system showed a spatial relation following one polynomial model of second order, with one determination coefficient. The *statistica 7.1* software *Generalist Linear Models* produced by Statistics Department of Federal University of Santa Maria/Brazil was used.

**Keywords** - Data integration, geophysics, Gama radiation.

### INTRODUÇÃO

Os dados dos levantamentos geofísicos mais antigos do Brasil (desde 1952) foram transformados do padrão analógico para o digital por meio do Projeto AERO da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2006). O processamento e utilização desses dados no formato digital têm alcançado novas linhas de investigação, tanto pelos profissionais de geofísica, da própria CPRM, quanto por instituições de pesquisa brasileiras. Ao mesmo tempo, novas técnicas de processamento e de análise estão sendo empregadas.

Os levantamentos aerogeofísicos brasileiros, em sua grande maioria, utilizaram e utilizam os métodos gamaespectrométricos e magnetométricos. A gamaespectrometria consiste na detecção dos raios

gama emitido por isótopos radioativo presentes na superfície terrestre, visando à estimativa da sua quantidade (Wilford *et al.*, 1997; Bastos, 2002). Os radioelementos naturais que emitem radiação gama e que são detectados nos levantamentos geofísicos são o potássio (K), o tório (Th) e o urânio (U). Além das emissões devidas a esses radioelementos, as emissões totais de radiação gama da superfície terrestre também são medidas contagem total (CT).

Os dados obtidos por levantamentos gamaespectrométricos têm sido utilizados intensamente em pesquisa mineral (Quadros, 2000), em estudos ligados à geomedicina (Buffon, 2002). Já Blum *et al.* (2001) e Sapacua (2002) usaram em trabalhos de mapeamento geológico. Essas investigações utilizam basicamente a integração de dados de diferentes fontes. Carmelo e Menezes (1996) comentam que na dé-

cada de 70 a integração era basicamente visual e a quantidade de informações utilizadas eram reduzidas, pois todo o processo de integração e análise dos resultados era desenvolvido pelo pesquisador. Assim, o resultado final obtido era, principalmente, devido à experiência e à capacidade de observação do pesquisador e a metodologia utilizada possuía características pessoais.

A partir da disseminação dos computadores pessoais, os sistemas e os algoritmos computacionais começaram a ser desenvolvidos para tratar e analisar grande volume de informações e processar toda a diversidade de dados obtidos por diferentes fontes. Os procedimentos e técnicas matemáticas, mais utilizadas na área das Geociências, principalmente no ocidente, têm base nos trabalhos de Boham-Carter (1996) os quais se fundamentam em determinados aspectos da lógica matemática. Quadros (2000) utilizaram modelamentos numéricos, probabilísticos e não probabilísticos, para estimar depósitos minerais. Mais recentemente, as técnicas e as operações da lógica matemática aplicadas nas Geociências e nas Ciências Ambientais ganharam um espectro mais amplo em Sirotinskaya & Strieder (2006). Por outro lado, as técnicas matemáticas ligadas à análise estatística bem como suas aplicações em Geociências são relatadas nos trabalhos de Albarède (1995), Goovaerts (1997) e Deutsch (2002). Salienta-se que este campo da estatística aplicada, ainda pode ser explorado em maior profundidade.

De acordo com CPRM (2007) com o advento do imageamento da Terra por sensores transportados por satélites abriu a possibilidade da análise de grandes áreas em escalas regionais, permitiram a caracterização do comportamento espectral de materiais terrestres, de forma que significam um importante avanço na discriminação de rochas e minerais. Os dados quantitativos produzidos por estes sensores, na forma de números digitais proporcionais à reflectância dos materiais, medida em cada banda, podem ser processados através de rotinas computacionais específicas, em que à aplicação de técnicas de realce e classificação permitem a distinção entre alvos.

O presente estudo tem por objetivo analisar estatisticamente a concentração de potássio obtida a partir do aerolevante geofísico realizado durante o Projeto Camaquã – Área I (código de série 1010) para avaliar a possibilidade de discriminar as diferentes formações geológicas presentes em parte da Folha Santa Maria, conforme mapeamento executado por CPRM (1998) na escala de 1: 250.000. O

potássio foi detectado pela medida do raio gama de energia 1,46 (MeV) emitido pelo decaimento do  $^{40}\text{K}$ . Como este rádio-isótopo constitui uma fração do K natural, é possível obter-se uma medida indireta do conteúdo de potássio na superfície do terreno. Nesta pesquisa, a variável potássio foi escolhida em função de sua expectativa em apresentar uma variação na concentração mais ampla do que as demais variáveis gamaespectrométricas. O que implica numa maior capacidade de discriminação de sua ocorrência nas litologias avaliadas.

Em Pereira (2007) foi apresentada uma aplicação de técnicas matemáticas não determinísticas na integração de dados geológicos, geofísicos e geoquímicos. Pereira *et al.* (2007) utilizaram um tratamento semelhante ao ilustrado neste artigo, buscando a integração de dados de decaimento radiométrico da variável urânio, em materiais geológicos na região de Santa Maria no Estado do Rio Grande do Sul.

## CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de cunho quantitativo. Segundo (Triviños, 1987), as pesquisas de natureza quantitativa demonstram a intenção de garantir a precisão dos resultados, evitando distorções de análise e de interpretação, e possibilitam, em consequência, uma margem de segurança quanto às interferências Richardson (1996).

Os dados utilizados nesse estudo provêm da base de dados aerogeofísicos do Brasil (AERO), criada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais em 1995. O principal objetivo dessa base de dados é prover o usuário de informações técnicas sobre todas as fases dos principais levantamentos aerogeofísicos executados no Brasil desde 1952.

São partes do Projeto Camaquã – Área I (1010) executado pela CPRM em 1972. A Divisão de Geofísica (DIGEOF/DEGEO) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais digitou os dados magnéticos e gamaespectrométricos do projeto a partir das listagens de computador, bem como as coordenadas geográficas (UTM) das fiduciais dos perfis, de forma a compor o "arquivo de dados XYZ".

Os dados radiométricos do Projeto Camaquã – Área I (1010) foi convertida de "contagens por segundo" (cps) para concentração de elementos, a partir da técnica denominada de *back-calibration*. Essa técnica foi transferida para a CPRM através do projeto *Brazil Airborne Radiometric Mapping*

Project (BARMP, 1997). Dessa forma, os dados utilizados nesse estudo estão expressos em porcentagem (%) para K.

A tabela 1 ilustra os principais parâmetros geofísicos do Projeto Camaquã – Área I (1010).

A figura 1 mostra a localização da Folha de Santa Maria (SH-22-V-C), situada entre as coordenadas 29°00' e 30°00' de latitude sul e 54°00' e 52°00' de longitude oeste do Meridiano de Greenwich/GR. A figura 2 mostra o mapa geológico da região do estudo se destacando as formações geológicas aflorantes apresentando-se as linhas de amostragem aerogeofísica realizadas CPRM (2006). A tabela 1 os principais parâmetros do Projeto Camaquã Área I sistematizados pela (CPRM, 2006).

As unidades geológicas que ocorrem aflorantes na região em estudo são os **Depósitos aluvionares atuais** – cascalhos, areias grossas e finas e sedimentos siltico-argilosos, inconsolidados que preenchem calhas de rios e suas planícies de inundação da Era cenozóica e período quaternário. As rochas vulcânicas pertencem a dois tipos litológicos da **Formação Serra Geral** – predomínio de rochas vulcânicas ácidas do tipo Palmas/Caxias ( $\alpha_1$ ) e os

basaltos tipo Gramado ( $\beta_1$ ), intercalados na base com arenitos eólicos intertraps. Estes derrames pertencem a Era mesozóica ao cretáceo. Os arenitos eólicos da **Formação Botucatu** – são finos a médios, róseo-avermelhados, bem selecionados, bimodais, com estratificações cruzadas tangencial e plano-paralela de médio à grande porte da era mesozóica ao jurássico. Os arenitos argilosos pertencentes ao **Grupo Rosário do Sul** – são constituídos por arenitos arcossianos, siltitos e lamitos, com níveis de conglomerados intraformacionais, preservados como blocos abatidos em estruturas do tipo graben, arenitos avermelhados finos a médios com estratificações paralela e cruzada acanalada. Estas litologias são equivalentes temporais da Formação Pirambóia nos Estados de São Paulo e Paraná. Na base deste pacote, encontra-se a **Formação Rio do Rasto** – constituída por arenitos finos, bem selecionados, lenticulares, argilitos e siltitos esverdeados, bordos ou avermelhados, com laminações paralela e cruzada acanalada CPRM (1998).

As litologia aflorantes na área de estudo estão ilustradas na figura 2, na escala 1:250.000 CPRM (1998).

Tabela 1 - Principais parâmetros do Projeto Camaquã Área I (CPRM, 2006).

Parâmetros	Unidades
Intervalo de Amostragem	1 segundo
Altura de vôo	150 metros
Direção e espaçamento das linhas de vôo (LV)	NW-SE, 1 km
Direção e espaçamento das linhas de controle (LC)	NE-SW, 18 km
Tempo de Integração Gama	2 segundos
Cristais de Iodeto de Sódio (NaI), (TI)	2491,59 polegadas cúbicas

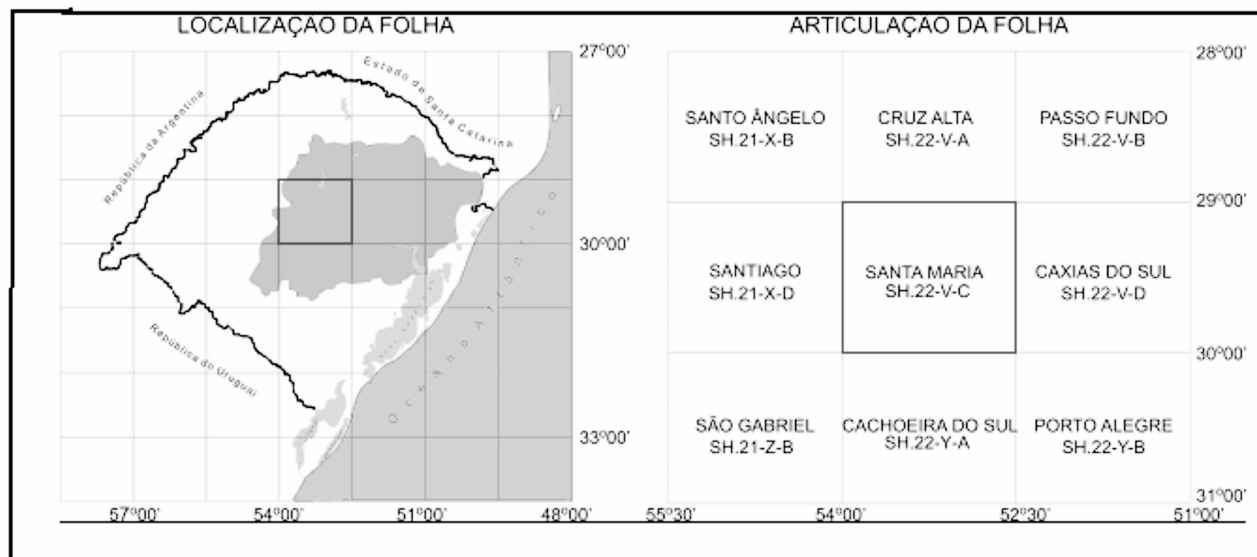


Figura 1 - Localização da região de estudo na articulação de folhas em escala 1:250.000 (CPRM, 1998).

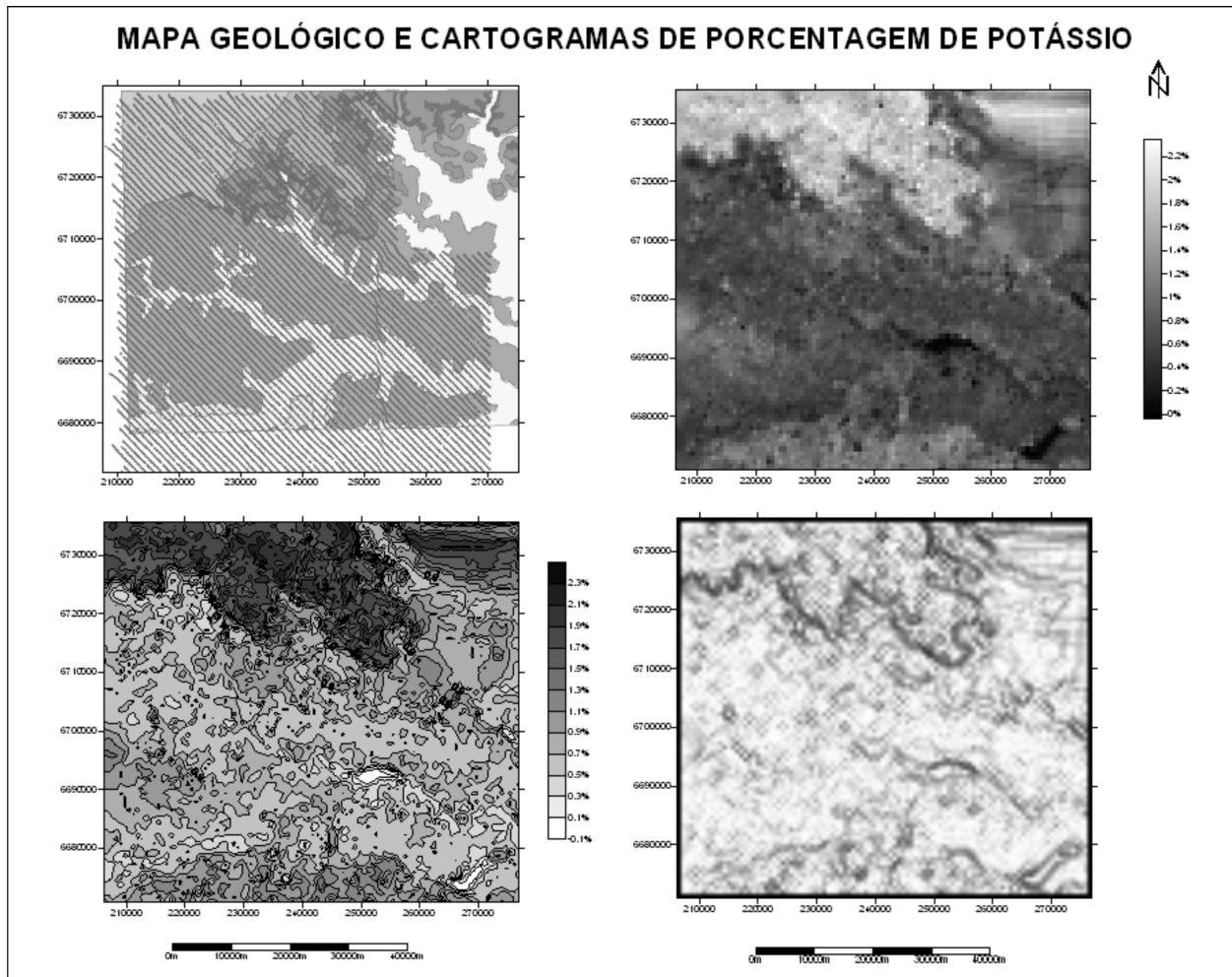


Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo, com a sobreposição dos pontos amostragem do levantamento aerogeofísico (Projeto Camaquã – Área I – 1010, CPRM, 1998).

## RESULTADOS

Os dados de (%) de potássio foram submetidos a um processo estatístico descritivo através de sua distribuição de frequência. O comportamento da variável foi ajustado a um modelo polinomial para estimação de sua variação, em função das coordenadas geográficas UTM (Fig. 2 e Fig. 3). Com valores amostrados em cada uma das feições geológicas foram estimados os valores das médias, erros padrões das médias e intervalos de confiança para cada uma das formações geológicas. Os valores obtidos podem ser visualizados na tabela 3. Para testar a hipótese de que a concentração de potássio difere para as diferentes formações geológicas foram executadas comparações de médias através de análise de variância seguida do teste de comparação de Tukey (Fig. 5). Os procedimentos estatísticos citados foram efetuados através do suporte computacional *Statística 7.1 (2005)* do Departamento de Estatística da Universidade Federal de Santa Maria/

UFSM, informações mais detalhadas sobre tais procedimentos podem ser obtidas em Albarède (1995), Goovaerts (1997) e Deutsch (2002).

A distribuição empírica da variável mostrou-se levemente assimétrica à direita e levemente platicúrtica, o que segue o padrão de distribuição da variável potássio conforme mostra a figura 3.

A variável potássio, quando analisada em relação às coordenadas geográficas UTM, apresenta uma dependência espacial que pode ser vista na (Fig. 4) e segue um modelo polinomial de segunda ordem.

$$K = 2902070,9871 - 0,06634.(UTM\_L\_O) - 1,5 \cdot 10^{-8} (UTM\_L\_O)^2 - 0,08649.(UTM\_S\_N) + 6,4 \cdot 10^{-9} (UTM\_S\_N)^2 + 1,0 \cdot 10^{-8} .(UTM\_L\_O.UTM\_S\_N)$$

Apresentou um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,7050$ , obtido com o uso do programa *Statística 7.1 (2005)* módulo modelos Lineares Generalizados.

A média e o desvio padrão estimado para ca-

da formação geológica são mostrados na tabela 2. As comparações entre essas médias encontram-se na tabela 3. Informa-se que estas tabelas e a (Fig.5) não foram representados em seqüência estratigráfica. Essa análise evidencia que existe diferença significativa entre as médias da variável potássio para as diferentes formações geológicas, como função dos seus diferentes constituintes minerais, frações granulométricas, petrofábricas e estruturas. A exceção são as médias existentes para a Formação Rio do Rasto e

o Grupo Rosário do Sul; nesse caso, não existe uma diferença significativa entre os valores para justificar uma separação das duas unidades sedimentares arenosas por meio da concentração da variável potássio.

A tabela 2 ilustra as medidas descritas da variável potássio para as formações geológicas aflorantes na área de estudo, enquanto a tabela 3 apresenta os níveis de significância para as comparações entre as médias da variável potássio das diferentes formações geológicas presentes na área de estudo.

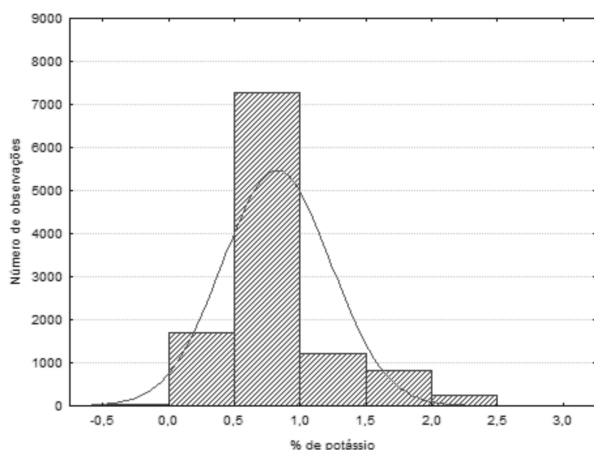


Figura 3 - Histograma de frequência da variável potássio (em % K) para a área de estudo.

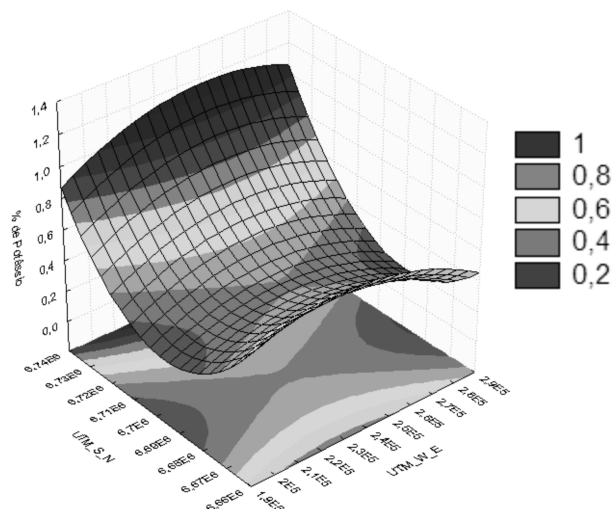


Figura 4 - Comportamento espacial da variável potássio em (% K) na área de estudo.

Tabela 2 - Medidas descritas da variável potássio para as formações geológicas da área de estudo.

Unidade Geológica	Teor médio de potássio	Erro padrão da estimativa	Limite Inferior IC 95%	Limite Superior IC 95%	Tamanho da amostra
Formação Rio do Rasto	0,7113	0,00935	0,6929	0,7297	939
Depósitos aluvionares atuais	0,6723	0,00569	0,6611	0,6835	2528
Grupo Rosário do Sul	0,7075	0,00252	0,7026	0,7125	6289
Formação Serra Geral ( $\alpha 1$ )	1,7788	0,01195	1,7554	1,8023	648
Formação Serra Geral ( $\beta 1$ )	1,5757	0,01459	1,5471	1,6042	740
Formação Botucatu	1,1171	0,03658	1,0448	1,1894	155
Zona urbana	0,9421	0,03473	0,8725	1,0117	56
Geral	1,0721	0,01648	1,0395	1,1048	11355

Tabela 3 - Níveis de significância para as comparações entre as médias da variável potássio das diferentes formações geológicas presentes na área de estudo.

Unidade Geológica	Formação Rio do Rasto	Depósitos aluvionares atuais	Grupo Rosário do Sul	Zona urbana	Formação Serra Geral	Formação Botucatu
Formação Rio do Rasto		0,000069	<b>0,671898</b>	0,000000	0,00	0,00
Depósitos aluvionares atuais	0,000069		0,000000	0,000000	0,00	0,00
Grupo Rosário do Sul	<b>0,671898</b>	0,000000		0,000000	0,00	0,00
Zona urbana	0,000000	0,000000	0,000000		0,00	0,00
Formação Serra Geral ( $\alpha 1$ )	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		0,00
Formação Serra Geral ( $\beta 1$ )	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,00	
Formação Botucatu	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,00	0,00

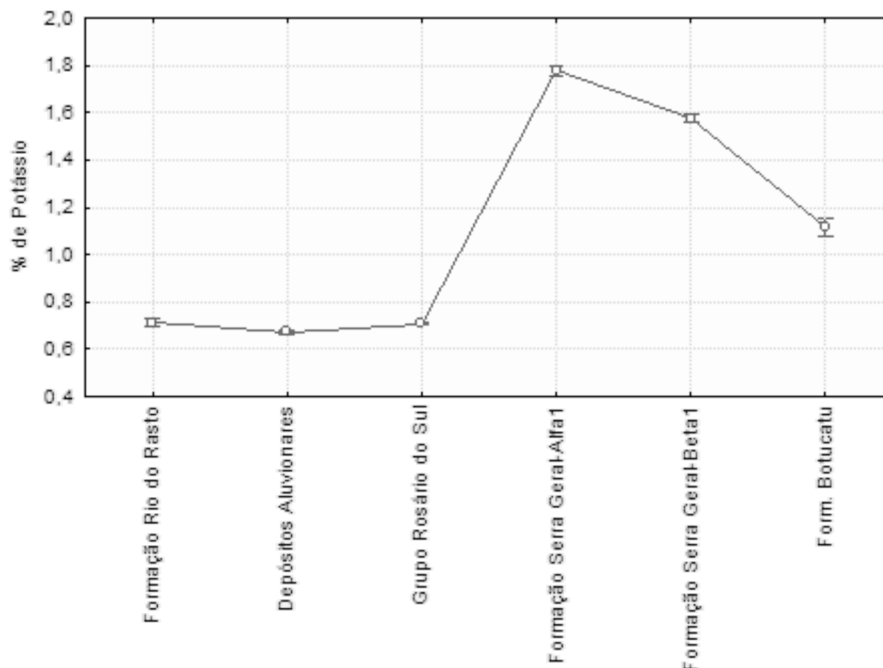


Figura 5 - Gráfico da dispersão das médias da variável potássio para as diferentes formações geológicas da área de estudo.

Na figura 5, pode-se observar que apenas as médias da Formação Rio do Rasto e do Grupo Rosário do Sul, constituídas de rochas sedimentares clásticas onde predominam os termos argilosos, não diferem entre si. As outras populações ou formações geológicas são estatisticamente diferentes ( $P < 0,01$ ).

## DISCUSSÃO

A concentração de potássio em rochas sedimentares clásticas como os folhelhos são aproximadamente duas vezes superiores àquela dos arenitos (26.600 ppm e 10.700 ppm, respectivamente), de acordo com (Mason, 1971). De acordo com Vinogradov e Ronov (1956 *apud* Wedephol 1972), os arenitos apresentam um valor médio de 2,1% de  $K_2O$ . Para a região de Santa Maria Silvério da Silva (1997) observou valores na faixa de 0,19 a 2,03 (%) de  $K_2O$ , para rochas sedimentares granulares, mesozóicas do Grupo Rosário do Sul ilustrada na Tabela 4.

O arcabouço geológico da folha Santa Maria, conforme mapeamento da CPRM (1995 e 1998) é formado basicamente por rochas sedimentares clásticas (Fm. Rio do Rasto, Grupo Rosário do Sul, Fm. Botucatu e os sedimentos aluviais recentes) e ainda por rochas vulcânicas pertencentes a Fm. Serra Geral (constituída por derrames de composição ácida e básica). Cada uma dessas formações sedi-

mentares granulares é constituída, por um arcabouço predominantemente quartzoso, com teores variáveis de feldspatos, micas e minerais acessórios contendo potássio na sua composição mineralógica. Apresentam textura variável, em função do paleoambiente deposicional e mostram diferentes proporções granulométricas de fração areia (2-0,062mm), silte (0,062-0,002mm) e argila (<0,002mm) Silvério da Silva (1997). Além disso, as formações sedimentares também mostram diferentes constituintes minerais associados as *fácies* sedimentares resultado de processos deposicionais e/ou pós-deposicionais associados às fases secundárias de formação de argilominerais. As rochas pertencentes a Fm. Rio do Rasto, ao Grupo Rosário do Sul e aos sedimentos aluviais recentes, possuem o quartzo como mineral mais importante do seu arcabouço; secundariamente, ocorrem feldspatos, micas brancas (illitas) e silicatos complexos, onde o potássio pode estar aprisionado Sartori *et al.* (1995) e ainda apresentam diferentes argilominerais Silvério da Silva *et al.* (1990) e Silvério da Silva (1997), dentre eles as illitas, e os interstratificados I/S (illita/esmectita). Por outro lado, a Fm. Botucatu constitui-se num arenito de textura média a fina, que regionalmente apresenta concentração variável de feldspatos potássicos, apresentando-se bem litificado com variável grau de diagênese Gamerman (1979), localmente apresenta-se silicificado e ainda apresenta *fácies* com seus produtos de alteração com baixo grau de litificação. No

campo é facilmente identificável pela sua estrutura sedimentar constituída de estratificação de alto ângulo, paleoambiente eólico. De acordo com Araújo *et al.* (1999) sua porosidade varia entre 17 a 30 (%). Na tabela 4 é apresentada a faixa de concentração de potássio em porcentagem (%) em peso, em quatro rochas sedimentares, pertencentes ao Grupo Rosário do Sul. Araújo *et al.* (1999), tratando da base do Grupo Rosário do Sul, estimaram uma porosidade entre 14 a 24 (%). Portanto, deve-se ressaltar que o comportamento hidráulico diferente entre rochas sedimentares granulares pode resultar em diferentes processos de alteração e/ou transporte em solução de fases secundárias contendo potássio e outros elementos.

As concentrações de potássio, obtidas mostram perfeitamente a distinção entre os grupos de rochas sedimentares litificadas Formação Rio do Rasto, o Grupo Rosário do Sul, depósitos aluviais recentes, e a Formação Botucatu (Fig. 5) e tabela 4.

As concentrações de potássio na Formação Rio do Rasto e do Grupo Rosário do Sul, e os depósitos aluviais, são significativamente inferiores às dos sedimentos arenosos da Formação Botucatu. Esta figura sugere que, na matriz dos arenitos da Formação Botucatu, esteja associada, percentualmente maior quantidades de minerais potássicos. Tais como os feldspatos potássicos do que nas outras litologias, de tal modo a justificar uma maior emissão de radiações gama no canal do K. Análises geoquímicas do arenito intertrápico da Fm. Botucatu, realizadas na região adjacente aos municípios de Sobradinho – Salto do Jacuí mostram uma ampla

variação no conteúdo de K<sub>2</sub>O, situada entre 0,9 e 7,3 (%) de acordo com a tabela 4. O teor médio da concentração de K<sub>2</sub>O nos arenitos intertrápico situa-se em 3,0 (%), Heemann (1997) e corrobora a avaliação apresentada em relação à resposta mais efetiva dos quartzarenitos da Formação Botucatu em relação aos arenitos argilosos do Grupo Rosário do Sul.

As emissões de radiação gama nos sedimentos da Fm. Rio do Rasto e do Grupo Rosário do Sul, por outro lado, não diferem significativamente entre si (Fig. 5). Dessa forma, tais rochas sedimentares não puderam ser distinguidas pelo seu conteúdo de potássio em aerolevantamentos geofísicos, como na área em estudo. Os sedimentos aluviais recentes, embora apresentem uma concentração muito próxima daquela dos sedimentos da Formação Rio do Rasto e do Grupo Rosário do Sul, mostram valores significativamente menores, em termos estatísticos, do que essas duas formações e, portanto, podem ser distinguidos nos dados de aerolevantamentos.

Os derrames vulcânicos da Formação Serra Geral mostraram-se perfeitamente distinguíveis no aerolevantamento geofísico avaliado na área em estudo. De um modo geral, as rochas vulcânicas apresentam concentrações de potássio (25.900 ppm) bem superiores do que aquelas apresentadas pelas rochas sedimentares Mason (1971). As emissões radioativas de potássio na unidade geológica Fm. Serra Geral tipo ( $\alpha_1$ ), que contém as vulcânicas ácidas do tipo Palmas/Caxias CPRM (1998), são maiores em relação às efusivas básicas do tipo ( $\beta_1$ ) da Fm. Serra Geral, composta predominantemente por basaltos do

Tabela 4 - Composição média das rochas vulcânicas (básicas e ácidas), e arenitos intertrápico da Fm. Botucatu na região de Sobradinho-Salto do Jacuí.

Elemento químico	Basalto intergranular	Basalto glomeropórfiro	Dacito	Arenito Fm. Botucatu	Grupo Rosário do Sul	Concentração
SiO <sub>2</sub>	49-54	50-52	67-71	79,96	67-80	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,0-14,6	11,9-15,0	11,8-12,3	7,75	5,6-13,7	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,5-14,5	10,0-12,5	5,0	3,20	1,2- 7,8	%
MnO	0,14-0,19	0,11-0,17	0,04-0,10	0,06	0,04-8,5	%
MgO	3,0-5,8	3,8-5,7	0,19-0,86	0,43	0,44-1,00	%
CaO	7,0-9,6	8,3-9,4	0,65-2,40	0,80	0,04-0,06	%
Na <sub>2</sub> O	1,7-3,2	1,4-2,3	2,5-2,9	1,24	0,03-0,11	%
K <sub>2</sub> O	0,8-3,0	0,53-1,59	3,5-5,6	0,9-7,3	0,19-2,03	%
TiO <sub>2</sub>	1,0-1,8	0,86-1,20	0,6	0,37	0,10-0,79	%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15-0,20	0,12-0,19	0,20-0,22	0,13	0,03-0,12	%
U	0,8-1,6	0,6	5,0	2,92	1,9-8,7	ppm
Th	4,0-5,0	3,5	17,0	8,98	7,2-31,0	ppm
Teor SiO <sub>2</sub>	Básica	Básica	Ácida	Rochas sedimentares clásticas		

Obs. – Fonte dos resultados: Heemann (1997); Strieder & Heemann (2006), adjacente à Folha Santa Maria. No Grupo Rosário do Sul, informa-se que foi incluída o valor médio de 4 amostras de rochas sedimentares analisadas por ICP/MS Silvério da Silva (1997) e Silvério da Silva e Menegotto (2005).

tipo Gramado, Heemann (1997) e Strieder & Heemann (2006). Esses resultados mostram que os basaltos da Fm. Serra Geral (efusivas básicas do tipo  $\beta_1$ ) em áreas adjacentes à estudada possuem um conteúdo variável de  $K_2O$ , situado entre 0,8 e 3,0 (%), enquanto as rochas dacíticas (efusivas tipo  $\alpha_1$ ) apresentam um conteúdo que varia entre 3,5 e 5,6 (%), (Tab. 4). A mineralogia dos dacitos da Fm. Serra Geral seria formada por aproximadamente 20-25 (%) de feldspato potássico ( $KAlSi_3O_8$ ), enquanto os basaltos toleíticos, semelhantes aos que ocorrem na Folha de Santa Maria CPRM (1998), possuem um máximo de 5% Heemann (1997). Assim, pode-se verificar que a grande diferença mineralógica e geoquímica entre as rochas vulcânicas básicas tipo ( $\beta_1$ ) e as ácidas tipo ( $\alpha_1$ ), está adequadamente refletida nos dados do aerolevantamento geofísico da CPRM (1998).

A figura 5 que ilustra a dispersão das médias da variável potássio em diferentes formações mostra que a concentração de potássio na Fm. Botucatu é menor do que aquela das rochas básicas e ácidas da Fm. Serra Geral. Além disso, a variação na concentração de potássio dos arenitos da Fm. Botucatu não alcança, nem se superpõe com a variação das rochas vulcânicas. Esse resultado é diferente daquele obtido por meio de análises geoquímicas de rocha sã tabela 4. Tal situação pode ser o resultado da atuação dos processos intempéricos desenvolvidos em clima tropical, no qual o feldspato potássico dos arenitos é decomposto e o  $K_2O$  é removido em solução pelas águas, podendo formar os argilominerais na forma de illitas.

Assim, os resultados obtidos permitiram demonstrar que houve variações estatisticamente significativas entre as rochas sedimentares e também foi possível separar os tipos composicionais básicos e ácidos em base as suas respostas ao levantamento aerogeofísico realizado para a variável potássio.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou a possibilidade de se distinguir diferentes unidades geológicas por meio da análise estatística a partir de dados aerogeofísicos gamaespectométricos pré-existentes, a partir das emissões radioativas do potássio. A análise estatística do comportamento da variável potássio associada aos distintos grupamentos de rochas sedimentares e de rochas vulcânicas (básicas e ácidas), permitiu criar critérios para a separação de tais

grupos. Dentro desse contexto, foi possível definir valores característicos de potássio, e os seus intervalos de confiança, em cada uma das formações geológicas estudadas. A variável potássio, quando analisada em relação às coordenadas geográficas (UTM), apresenta uma dependência espacial e segue um modelo polinomial de segunda ordem, apresentando um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,7050$ , obtido pelo uso do programa Statistica 7.1 (2005) módulo modelos lineares generalizados. Dessa forma, através do uso de ferramentas estatísticas robustas, foi possível mostrar-se a integração de dados de radiação de potássio e sua distribuição espacial no terreno em função de características litológicas.

**Agradecimentos** - Aos revisores da Revista Pesquisas em Geociências pelas sugestões ao manuscrito.

## REFERÊNCIAS

- Albarède, F. 1995. **Introduction to Geochemical Modeling**. Cambridge University Press, 543 p.
- Araújo, L. M.; França, A.B.; Potter, P. E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the *Paraná* and *Chaco-Paraná* Basins, South America, and comparison with de Navajo-Nugget aquifer system, USA. **Hydrogeology Journal**, 7(3): 317-336.
- BARMP. 1997. **Brazil Airborne Radiometric Mapping Project**. Paterson, Grant & Watson Limited (PGW). *Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais* (CPRM) and Geological Survey of Canada (GSC), Rio de Janeiro, 18p.
- Bastos, R. O. 2002. **Radiação Gama natural de distintos litotipos e a estimativa de dose a eles associada, em municípios do leste do estado de São Paulo**. 58p. Campinas, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- Blum, M L. B.; Silva, A. M.; Jost, H.; Meneses, R.; Fuck, R. A.; Brod, J. A.; Teixeira, A. A.; Da Silva, A. A. C.; Spigolon, A. L. D.; Maas, M. V. R.; De Souza, M. M.; Macedo Jr., P. M.; Lima, B. E. M.; De Souza, M. O. C. 2001. Aplicação de dados aerogeofísicos no mapeamento geológico do limite entre os terrenos Arqueanos e Proterozóicos da região de Crixás-Cedrolina, Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, 31(3): 279-286.
- Boham-Carter, G. F. 1996. **Geographical information systems for geocientists: Modelling with GIS**. Pergamon, 398p.
- Buffon, S., A.. 2002. **Integração de dados geofísicos e geológicos na avaliação ambiental e epidemiológica de radiações naturais (Radônio) no Escudo Sul-Riograndense (RS-Brasil)**. Porto Alegre 150p. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Carmelo, A. C. e Meneses, P. R. **Metodologia para integração de Imagens Gamaespectométricas e TM/LANDSAT-5 através do IHS**. In: SIMPÓSIO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, Salvador, Brasil, **Anais ...**, 1996, INPE, p.615-620.
- CPRM. 1995. **Mapa hidrogeológico da Folha de Santa Maria. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. Projeto de Previsão dos recursos hídricos subterrâneos, escala 1:100.000.
- CPRM. 1998. **Mapeamento geológico integrado da Bacia Hidrográfica do Guaíba**. Escala 1:250.000. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/sensoriamentoremoto>. Acesso em 20/01/2007.
- Cruz Jr., A. C. & Remacre, A. Z. 2001. Impacto do efeito suporte e do



- efeito informação sobre a recuperação de reservas. **Revista Escola de Minas**, 54(2):137-142, abr./jun. 2001.
- Deutsch, C.V. 2002. **Geostatistical Reservoir Modeling**. Oxford University Press, 376p.
- Eliason, P.T.; Donovan, T. J.; Chaves Jr., P., S., 1983. Integration of geologic, geochemical and geophysical data of the cement oil field, Oklahoma, using spatial array processing. **Geophysics**, 48(10): 1305-1317.
- Gamermann, N., 1979. **Contribution a l'etude de la diagênese des grès: couleur rouge argiles authigènes et induration, Formations d'Estrada Nova, De Rosário do Sul et de Botucatu (Brésil) et Buntsandstein des Vosges (France)**, Mémoire 59, Centre National de la Recherche Scientifique Université Louis Pasteur de Strasbourg Institut de Géologie, p. 121 et planches XXI.
- Goovaerts, P. 1997. **Geostatistic for Natural Resources Evaluation**. New York Oxford University Press, 483p.
- Heemann, R., 1997. **Geologia, controles e guias prospectivos para depósitos de ágata na região de Salto do Jacuí (RS)**. Porto Alegre, 107p. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Heemann, R. 2005. **Modelagem estrutural e tridimensional para a prospecção e avaliação dos depósitos de ágata do distrito mineiro de Salto do Jacuí (RS)**. Porto Alegre, 150 f. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Mason, B., 1971. **Princípios de geoquímica**, São Paulo, Polígono, Editora da USP. XI, 403p.
- Minty, B. R. S. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. AGSO. **Journal of Australian Geology and Geophysics**, 17: 39-50.
- Pereira, J. E. S. 2007. **Aplicação de técnicas matemáticas não determinísticas na integração de dados geológicos, geofísicos e de geoquímica de solo para geração de mapas de uso e ocupação na região do município de Santa Maria, RS, Brasil**. 66p. Porto Alegre, Exame de Qualificação de Doutorado, Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Pereira, J. E. S.; Silvério da Silva, J. L.; Strieder, A. J.; Pires, C. A. F. 2007. **Integração de dados de decaimento radiométrico de Urânio: Estudo de caso na região de Santa Maria, RS**. (Submetido a Revista Brasileira de Geociências).
- Quadros, T., F., P., 2000. **Integração de dados em mapeamento de favorabilidade mineral para ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai)**. 260p. Porto Alegre, Tese de doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Richardson, S. 1996. Statistical methods for geographical correlation studies. In: P. Elliot, J. Cuzick, D. English, R. Stern (eds.). **Geographical and Environmental Epidemiology: Methods for Small-Area Studies**. Oxford University Press, Oxford, p. 181-204.
- Sapucaia, N. S. 2004. **Diferenciação litológica de teores de urânio e tório e taxa de produção de calor radiogênico do embasamento cristalino das bacias de Camamu e Almada**. 97 p. ,Salvador, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- Sartori, P., L., P.; Silvério da Silva, J., L. e Kawashita, K. 1995. Idades radiométricas K-Ar e indicações sobre a área fonte das micas dos arenitos fluviais da Formação Sanga do Cabral, UFRGS. In: SIMPÓSIO DE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 2, Porto Alegre, **Boletim Resumos**, p. 111-113.
- Silvério da Silva, J., L. 1997. **Estudo dos processos de silicificação e calcificação em rochas sedimentares mesozóicas do Rio Grande do Sul, Brasil**. Porto Alegre, 157p. Tese de Doutorado em Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Silvério da Silva, J., L.; Menegotto, E. e Medeiros, E. R. 1990. Avaliação preliminar dos argilominerais nas folhas de Santa Maria e Camobi, RS. **Revista Ciência e Natura**, 12:127-132.
- Silvério da Silva, J., L., e Menegotto, E., 2002. Aspectos mineralógicos de silicificação em rochas sedimentares mesozóicas no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geociências** 32 (3): 317-326.
- Silvério da Silva, J., L., e Menegotto, E., 2005. Aspectos geoquímicos de silicificações em rochas sedimentares no Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, 32(2): 29-40.
- Sirotninskaya, S. & Strieder, A., J., 2006. **Lógica matemática na integração de dados e na modelagem: I – Elementos e métodos básicos de lógica matemática**, Editora da UFRGS, Porto Alegre (no prelo).
- Souza, J. L.; Ferreira, F. J. F. 1998. Geofísica Aplicada ao Mapeamento de Solos da Região de Araras (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 15, **Anais ...**, Belo Horizonte, p.428-428.
- Strieder, A., J., & Heemann, R. 2006. Structural constraints on Paraná basalt volcanism and their implications on agate geode mineralization (Salto do Jacuí, RS, Brazil). **Pesquisas Em Geociências** , 33 (1): 37-50.
- Triviños, A. N. S. 1987. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo. Atlas.
- Wedephol, K. W.; Correns, C. W.; Shaw, D. M.; Turekian, K. K.; Zemann, J. 1972. **Handbook of geochemistry**. Springer-Verlag, Berlin, Vol., 1, 402 p.
- Wilford, J.R.; Bierwirth, P., N. e Craig, M, A., 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. AGSO. **Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17(2): p.201-216.