



## HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL NO ESTADO DO PARANÁ

### *HYDROGEOLOGY OF SERRA GERAL AQUIFER SYSTEM AT PARANÁ STATE*

Gustavo Barbosa Athayde<sup>1</sup>; Camila de Vasconcelos Müller Athayde<sup>2</sup>

Artigo recebido em: 15/03/2015 e aceito para publicação em: 12/02/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v29i3.28406>

**Resumo:** Este trabalho tem como objetivo caracterizar aspectos hidrogeológicos regionais do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no estado do Paraná. São descritas as características hidrodinâmicas e hidroquímicas, mediante a compartimentação hidroestrutural do aquífero. Foram analisados condicionantes exploratórios como: distância do poço ao arcabouço estrutural, análise direcional e tectônica, densidade de lineamentos e geomorfologia regional. As principais características hidroquímicas dos compartimentos estruturais são apresentadas, indicando contribuições da interação água-rocha e possíveis aportes de efluentes antrópicos no aquífero. O modelo indica que, poços situados na área de influência de lineamentos geológicos, com direção norte-sul e leste oeste, apresentam índices de produção (vazão e capacidade específica) acima da mediana. Predominam águas bicarbonatadas cálcicas, com destaque para as águas dos compartimentos Maringá e Campo Mourão. Nos compartimentos Foz do Iguaçu e Foz do Areia são descritas ocorrências de águas com maiores valores de sódio, pH, sulfato, quando comparados aos outros compartimentos. O conhecimento das características regionais do SASG, contribui na determinação de áreas potenciais à captação, reduz o risco exploratório e subsidia a gestão deste estratégico manancial subterrâneo.

**Palavras-chave:** SASG. Hidrogeologia. Hidroquímica. Estado do Paraná.

**ABSTRACT:** This paper presents regional hydrogeological characteristics of the Serra Geral Aquifer System (SGAS) in the Paraná State. The hydrodynamic and hydrochemical characteristics were describe, by hydro-structural partitioning of the aquifer. Exploratory conditions were analyze as distance from the well to the structural framework, directional and tectonic analysis, lineament density and regional geomorphology. The main hydrochemical characteristics of structural compartments were present, indicating contributions of water-rock interaction and possible contributions of anthropogenic effluents into the aquifer. The model indicates that wells located in the area of influence of geological lineaments, with north-south and east-west directions have better production rates (flow and specific flow rate above the median). Dominated by calcic bicarbonate waters, especially in the waters of Maringa and Campo Mourão compartments. At Foz do Iguaçu and Foz do Areia compartments are described higt values of sodium, pH, sulfate, compared to other compartments. Knowledge of regional SGAS characteristics contributes to identify potential areas, reduce exploration risk and subsidizes the management of strategic groundwater resource.

**Keywords:** SGAS. Hydrogeology. Hydrochemistry. Paraná State.

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os principais aquíferos existentes no Estado do Paraná, o Sistema Aquífero Serra Geral é um dos mais importantes, se não o mais importante do estado. Suas águas propiciam o abastecimento de milhares de habitantes, situados em sua área de ocorrência, em muitos casos como fonte exclusi-

va de abastecimento.

Em 2014, o SASG no Estado do Paraná foi responsável pelo abastecimento de 179 municípios, mediante 519 poços tubulares profundos. O volume produzido (85.199.437 m<sup>3</sup>) representou 57,07% da água subterrânea captada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR, 2014).

São inúmeros os trabalhos existentes

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH; Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS ([gustavo.athayde@ufrgs.br](mailto:gustavo.athayde@ufrgs.br))

<sup>2</sup> Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas – LPH - Universidade Federal do Paraná ([camilavmuller@ufpr.br](mailto:camilavmuller@ufpr.br))

sobre o SASG paranaense, entretanto não há um consenso sobre o modelo exploratório do aquífero. Predominam pesquisas em áreas específicas do SASG, inexistindo uma abordagem regional integrando análise de dados hidrogeológicos e estruturais.

O objetivo final deste trabalho compreende caracterizar e cartografar o SASG no Estado do Paraná, mediante seus aspectos hidrodinâmicos e hidroquímicos regionais. Esta caracterização subsidiará com informações científicas projetos voltados à utilização dos mananciais subterrâneos, em específico o SASG paranaense.

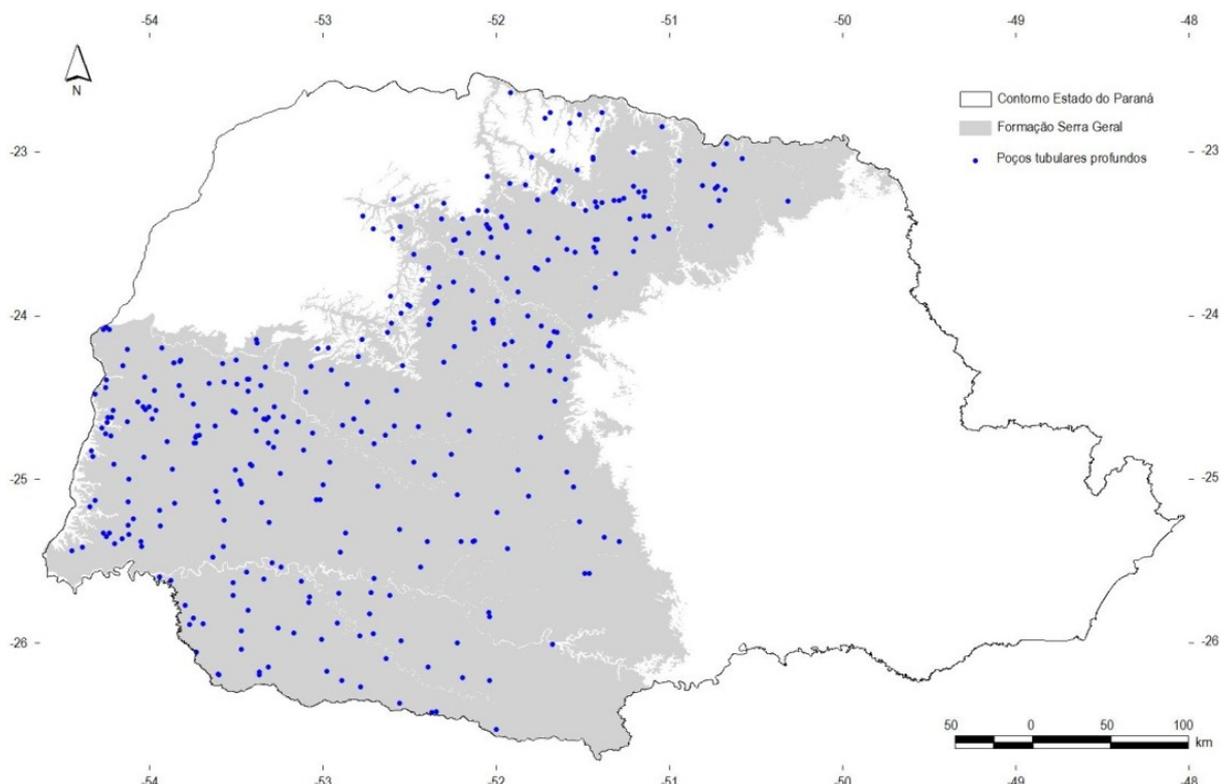
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Todos os dados adquiridos e gerados durante o desenvolvimento desta pesquisa foram armazenados em um banco de dados, permitindo a organização, compilação e integração das informações em diferentes escalas e áreas temáticas.

Todos os dados georreferenciados, base do sistema de informações deste estudo, estão projetados em coordenadas geográficas, datum SAD 1969.

Os limites do SASG foram extraídos do Mapa Geológico do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2006a). Nesta pesquisa a cor correspondente à área de afloramento da Fm. Serra Geral foi modificada de verde para tons de cinza em função de melhor contraste entre as cores utilizadas.

Nesta pesquisa foram utilizados 337 poços tubulares profundos (Figura 1) pertencentes à SANEPAR, Prefeitura de Marechal Cândido Rondon, Prefeitura de Pato Bragado e Prefeitura de Entre Rios do Oeste. Em todos os poços tubulares foram realizadas amostragens de água para determinação dos principais cátions e ânions, assim como determinados em campo os parâmetros: pH, temperatura e condutividade elétrica. A campanha de amostragem dos poços ocorreu entre os anos de 2007 e 2009.

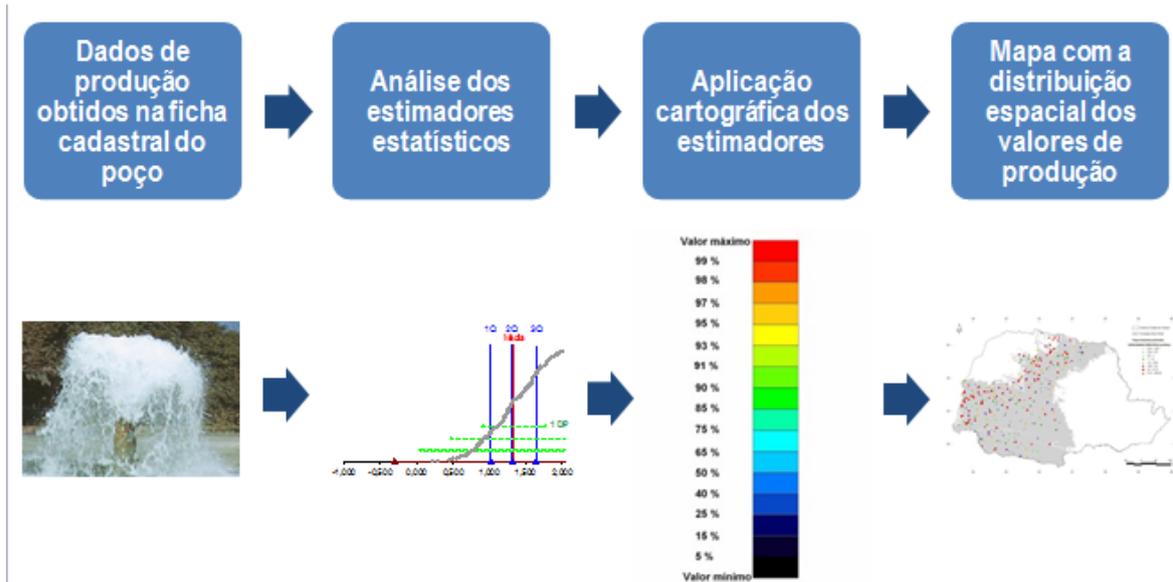


**Figura 1** - Poços tubulares profundos utilizados nesta pesquisa  
**Figure 1** - Groundwater wells used in this research

A caracterização da produtividade dos poços do SASG no Estado do Paraná foi realizada a partir da análise estatística e distribuição espacial da vazão e capacidade específica dos 337 poços tubulares profundos cadastrados.

A análise estatística realizada nesta

pesquisa teve duas principais aplicações: a definição de valores anômalos e a confecção das legendas dos mapas apresentados, ou seja, uma aplicação cartográfica. Uma representação esquemática com a análise realizada é apresentada na Figura 2.

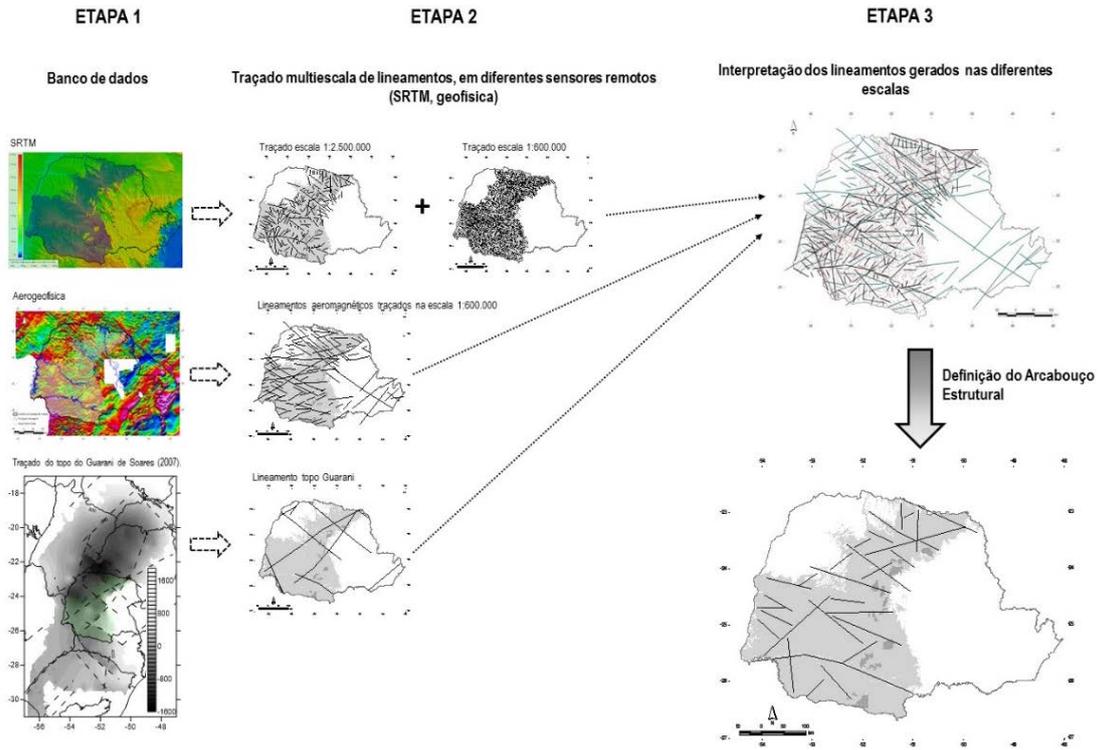


**Figura 2** - Etapas de trabalho para aplicação cartográfica dos estimadores estatísticos  
**Figure 2** - Steps for cartographic application of statistical estimators

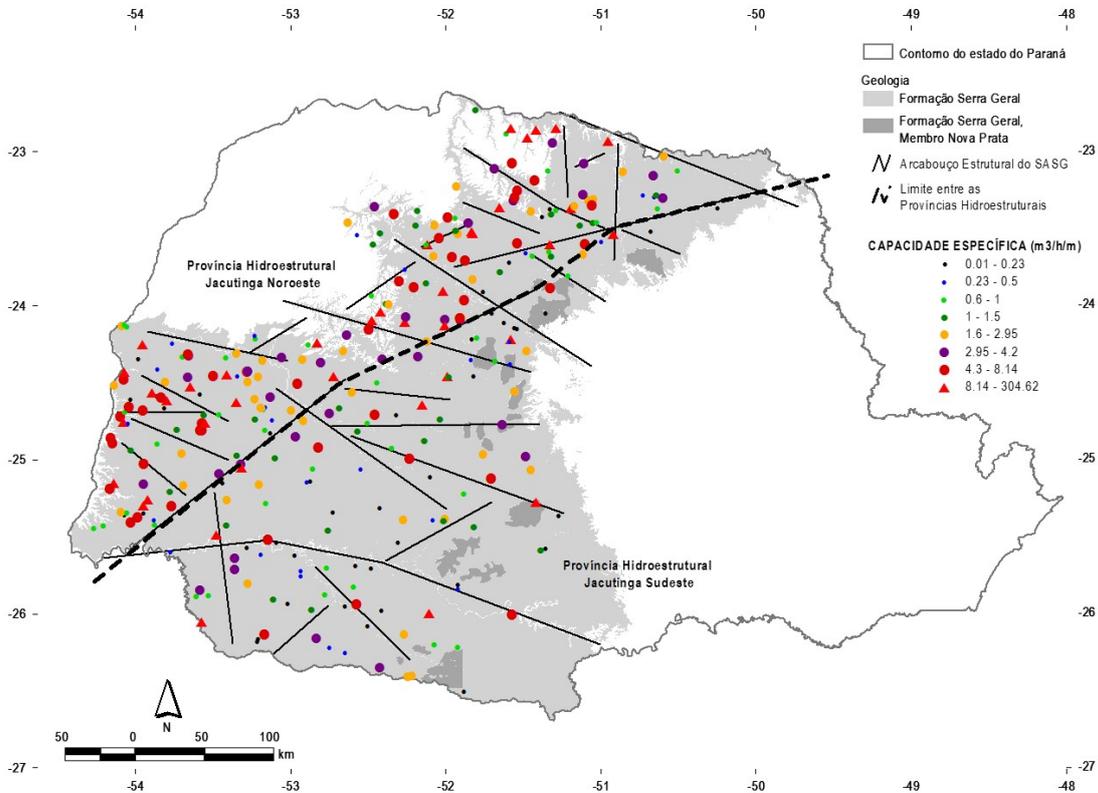
As legendas foram elaboradas a partir dos estimadores estatísticos. Nos mapas, o diâmetro do ponto (poço tubular) é proporcional ao valor analisado. A gradação de cores e tamanhos objetiva ressaltar as anomalias e agrupamentos de valores elevados.

As províncias e compartimentos hidroestruturais apresentados em Athayde et al. (2012) foram elaborados a partir da integra-

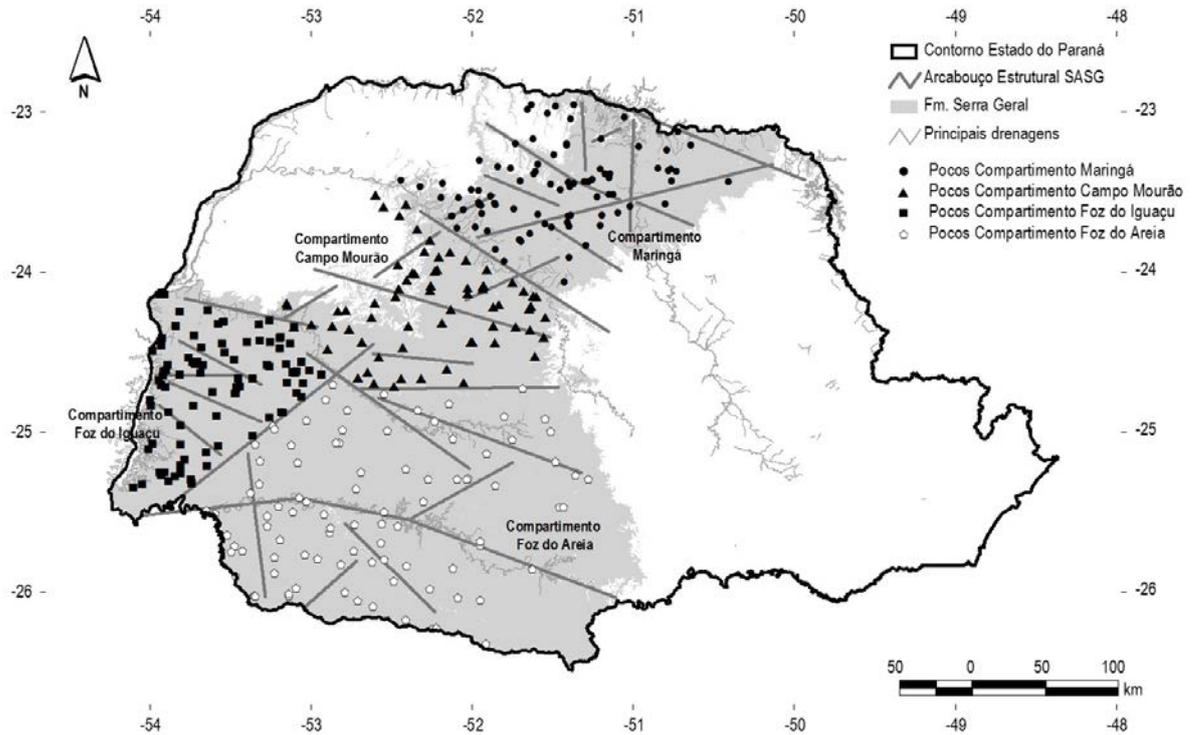
ção dos dados de produção dos poços tubulares com o arcabouço estrutural. Uma descrição detalhada dos procedimentos para a elaboração do arcabouço estrutural (Figura 3) pode ser obtida em Athayde et al. (2012). As figuras 4 e 5 apresentam as Províncias e Compartimentos Hidroestruturais definidos por Athayde et al. (2012), respectivamente.



**Figura 3** - Etapas para elaboração do arcabouço estrutural do SASG  
**Figure 3** - Steps for preparing the structural framework of SGAS



**Figura 4** - Provincias hidroestruturais (Athayde et al. 2012)  
**Figure 4** - Hydrostructural provinces (Athayde et al. 2012)



**Figura 5** - Compartimentos Hidroestruturais, com indicação dos poços por compartimento (Athayde et al. 2012)

**Figure 5** - Hydrostructural compartments, indicating the wells per compartment (Athayde et al. 2012)

A partir do arcabouço estrutural, e conseqüentemente dos compartimentos hidroestruturais definidos, foram realizadas, neste trabalho, análises da implicação do arcabouço no zoneamento hidrogeológico e hidroquímico do SASG.

O conhecimento dos condicionantes geológicos que potencializem a acumulação e circulação das águas nos aquíferos fraturados reduz significativamente o risco exploratório quando da locação de poços tubulares profundos. A confrontação dos resultados de vazão e capacidade específica dos poços tubulares com os condicionantes exploratórios se aplica à escala regional aqui utilizada (1:600.000). Os condicionantes exploratórios analisados foram:

- **Proximidade do poço tubular ao arcabouço estrutural:** A comparação entre produtividade dos poços e proximidade de lineamentos estruturais foi realizada em duas escalas de traçado, 1:2.500.000 e 1:600.000. Na escala 1:2.500.000 foram consideradas duas distâncias, um e cinco quilômetros. Na escala 1:600.000 foram considera-

das três distâncias, cem metros, quinhentos metros e um quilômetro.

- **Análise direcional e tectônica:** O objetivo desta análise, na escala 1:600.000, é verificar quais as direções de lineamentos estruturais apresentam produtividade mais elevada.
- **Densidade de lineamentos:** Nesta pesquisa, foi utilizado o programa *Arcgis* 10.1 para a elaboração do mapa de densidade de lineamentos. Conceitualmente o programa analisa um círculo ao redor de cada grid, a partir de uma distância determinada: raio de busca. Os lineamentos utilizados para os cálculos de densidade foram traçados na escala 1:600.000. A distância considerada no raio de busca foi 1500 metros.
- **Geomorfologia regional:** A comparação dos condicionantes geomorfológicos com valores medianos de capacidade específica e vazão dos poços permitiu identificar geomorfologias mais favoráveis à locação de poços. Foi utilizado o mapa geomorfológico

de MINEROPAR (2006b) e os seguintes condicionantes geomorfológicos: dissecação do relevo, forma dos topos, forma das vertentes e vales.

A investigação detalhada dos condicionantes geológicos que regem a circulação de água em aquíferos fraturados permite a elaboração de modelos conceituais os quais são imprescindíveis para um desenho adequado de testes hidráulicos e amostragens, cujos resultados, por sua vez, refinam os modelos conceituais. Este procedimento leva à previsão dos caminhos preferenciais de fluxo e assim à economia tanto de tempo como de recursos financeiros, (Fernandes, 2008).

A análise hidroquímica do SASG foi realizada mediante a classificação dos principais tipos de água; a dedução da rocha fonte utilizou os índices hidrogeoquímicos propostos por Hounslow (1995).

### **3 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS REGIONAIS**

A Formação Serra Geral está inserida no contexto tectônico da Bacia Sedimentar do Paraná, recobrando cerca de 75 % de seu território.

O modelo eruptivo tradicionalmente aceito para a Formação Serra Geral é o “fissural”, composto por magmas basálticos e basalto-andesíticos que fluíram por falhas e fraturas NW-SE. Um novo modelo eruptivo “fissural e central combinados” foi aventado por Licht (2012), a partir do mapeamento desta unidade no Estado do Paraná. Estudos faciológicos e litogeoquímicos, combinados com informações isotópicas, sugerem que a

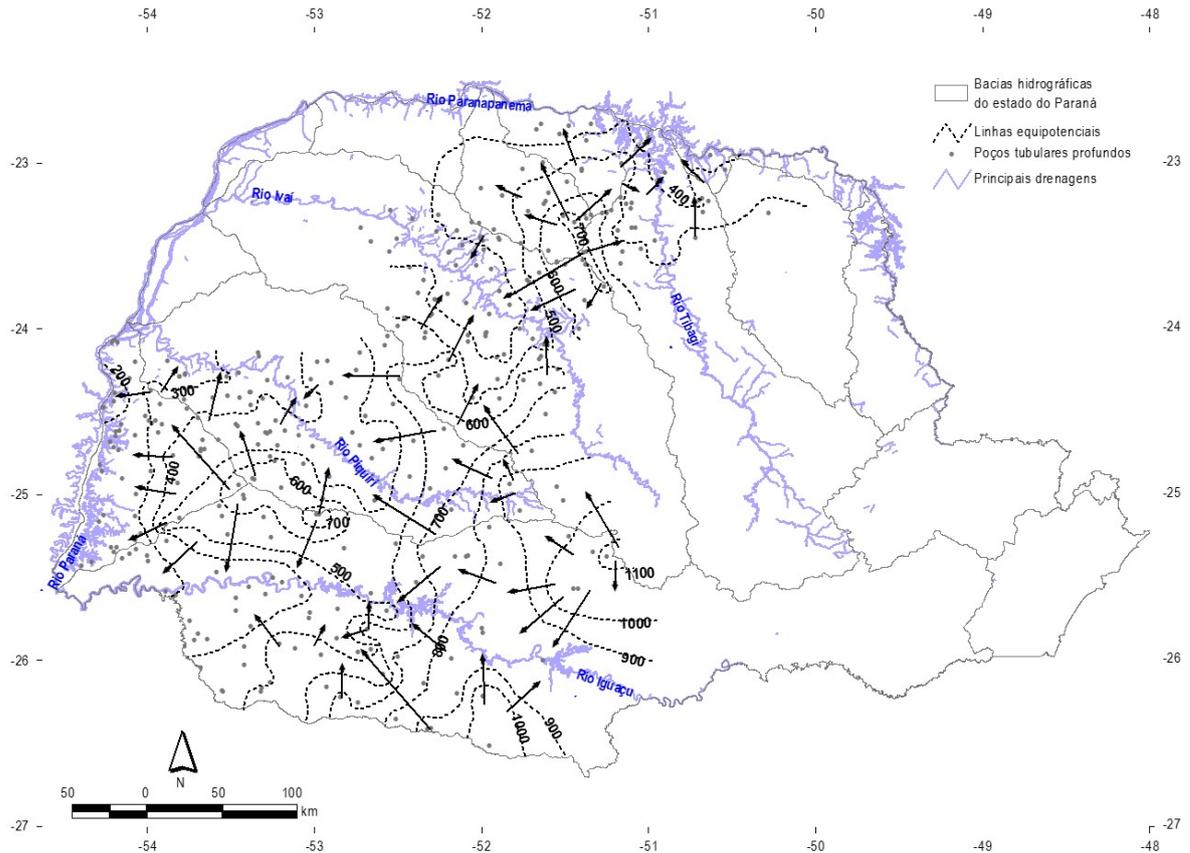
extensa manifestação vulcânica foi baseada em centros eruptivos hidrovulcânicos, associados a estruturas N20°-30°E.

As relações iônicas confirmam existir o predomínio da geoquímica de alteração intempérica de silicatos, sendo que a relação Na/Ca sinaliza para a existência de intemperismo de plagioclásio cálcico, concordante com a mineralogia essencial dos basaltos (plagioclásio cálcico e piroxênio do tipo augita). A caulinita é o argilomineral mais estável neste ambiente geoquímico. (Bertolo et al., 2007).

O principal fluxo subterrâneo em aquíferos vulcânicos ocorre na horizontal, e secundariamente por estruturas verticais. As estruturas verticais possibilitam a recarga e mistura de águas entre diferentes derrames, bem como intercomunicam diferentes aquíferos dependendo das relações potenciométricas.

Considerando toda extensão do SASG no Estado do Paraná, Athayde et al. (2012) descrevem que o fluxo subterrâneo, em escala regional, dá-se de leste para oeste. O fluxo possui sentido para as áreas de descarga situadas nas regiões oeste e norte-noroeste paranaense, junto aos rios Paraná (principal área de descarga regional do SASG) e Paranapanema, respectivamente.

Ainda citando Athayde et al. (2012), podem ser observadas duas ordens de grandeza no controle do fluxo subterrâneo: uma de caráter regional, controlada principalmente pelo gradiente da bacia, e outra em detalhe, caracterizando gradientes de fluxo localizados, condicionados pelas principais drenagens (Figura 6).



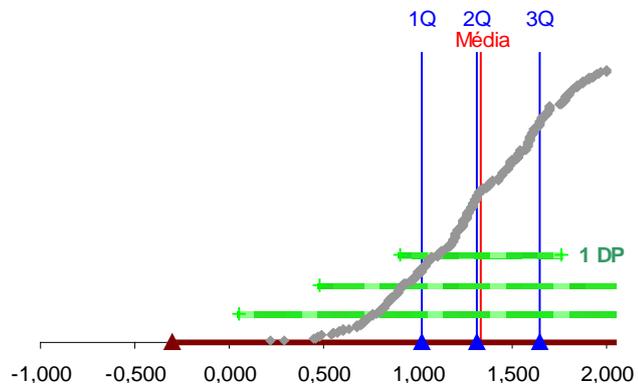
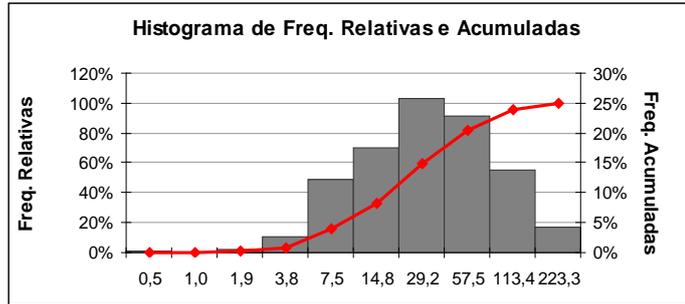
**Figura 6** - Mapa potenciométrico do SASG no Estado do Paraná (Athayde et al. 2012)  
**Figure 6** - Potentiometric map of the SGAS in the State of Paraná (Athayde et al. 2012)

Segundo Athayde et al. (2012) a média geométrica dos valores de vazão dos 337 poços tubulares é igual a  $21,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , com desvio padrão de  $1,2 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  e coeficiente de variação de 5,7% (1). A média geométrica dos valores de capacidade específica dos 337 poços tubulares é igual a 1,5

$(\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$ , com desvio padrão de  $1,7 (\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$  e coeficiente de variação de 111,7% (Tabela 2). As figuras 7 e 8 (Athayde et al. 2012) apresentam a distribuição espacial da vazão e capacidade específica, respectivamente.

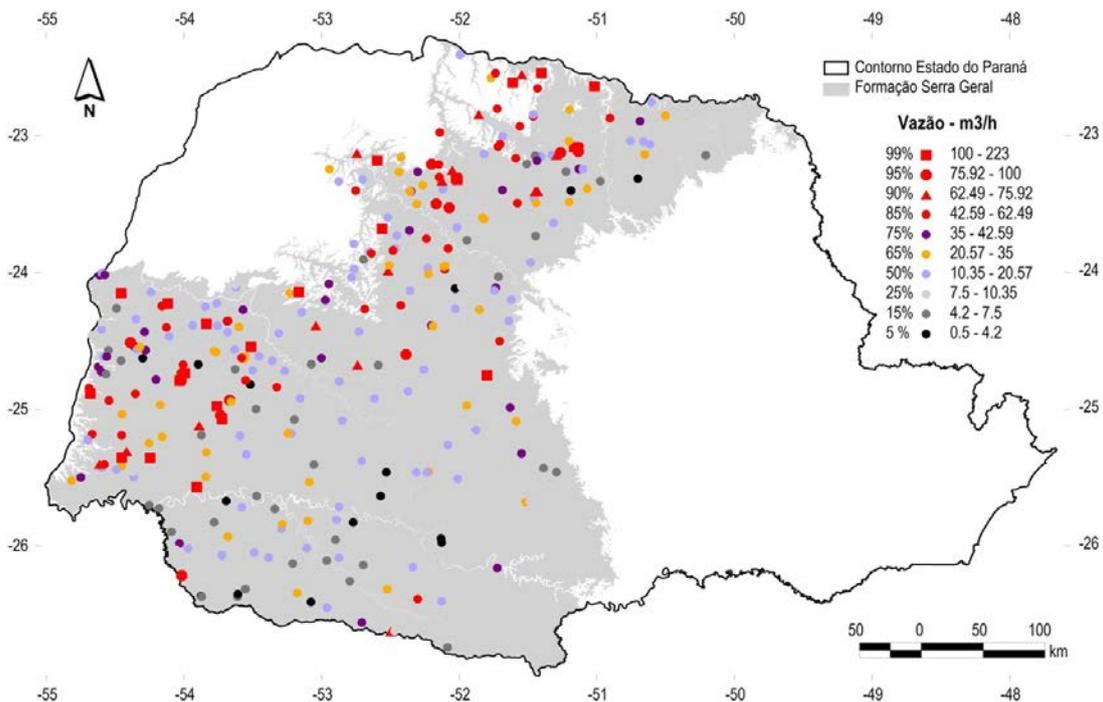
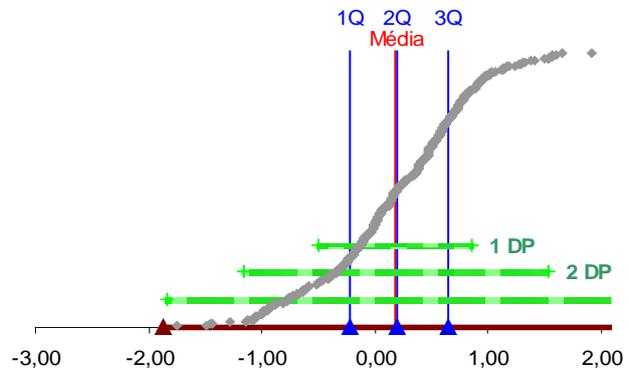
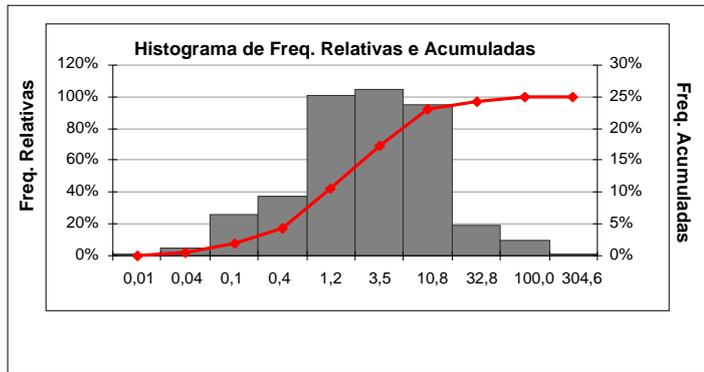
**Tabela 1** - Estatística univariada dos valores de vazão ( $m^3h^{-1}$ )  
**Table 1** - Univariate statistics of flow rates values ( $m^3h^{-1}$ )

<b>Análise da amostra</b>	
Quantidade de dados	<b>337</b>
Valor mínimo	<b>0,5</b>
Valor máximo	<b>223,3</b>
<b>Medidas de tendência central</b>	
Média geométrica	<b>21,5</b>
Mediana	<b>20,6</b>
Moda	<b>18,0</b>
<b>Medidas de dispersão</b>	
Variância	<b>1,5</b>
Desvio padrão geométrico	<b>1,2</b>
CV	<b>5,7%</b>
<b>Medidas de posicionamento</b>	
Primeiro Quartil	<b>10,6</b>
Segundo Quartil	<b>20,6</b>
Terceiro Quartil	<b>43,7</b>
<b>Outras medidas</b>	
Coeficiente de inclinação	<b>-0,18</b>
Coeficiente de curtose	<b>-0,12</b>

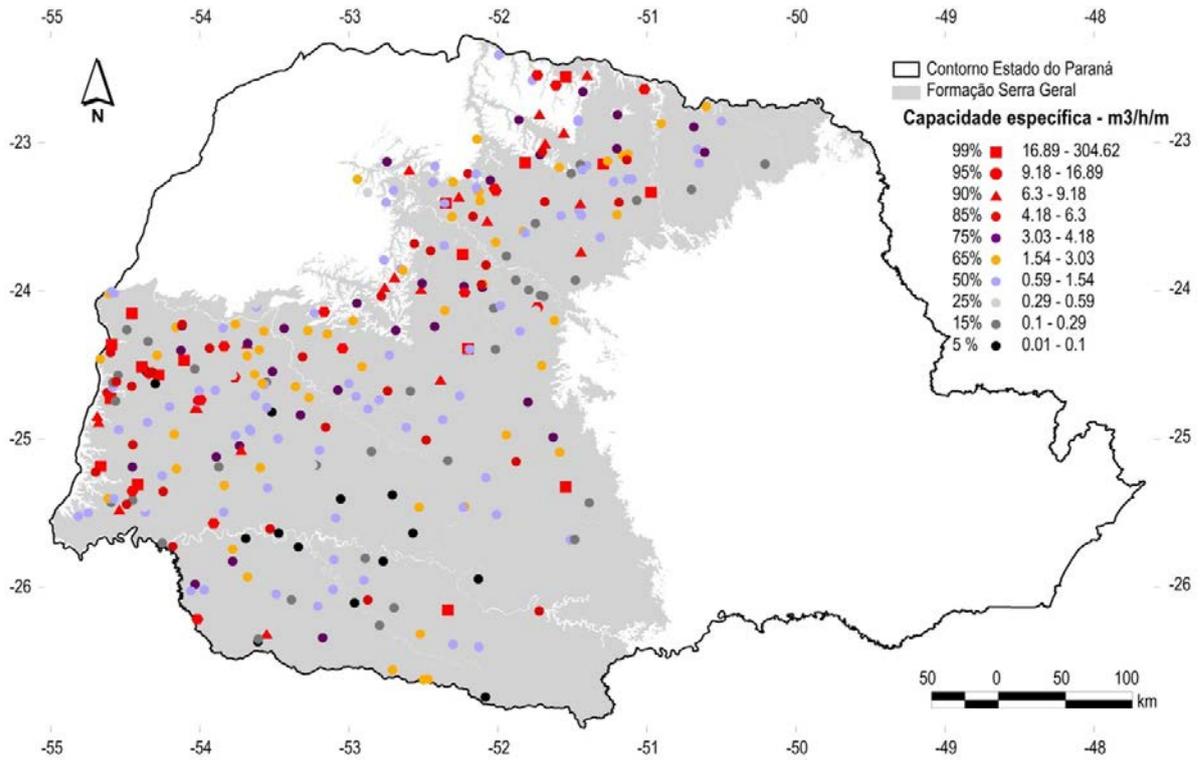


**Tabela 2** - Estatística univariada dos valores de capacidade específica ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$ )  
**Table 2** - Univariate statistics of specific flow rates values ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$ )

Análise da amostra	
Quantidade de dados	337
Valor mínimo	0,01
Valor máximo	304,6
Medidas de tendência central	
Média geométrica	1,5
Mediana	1,6
Moda	-
Medidas de dispersão	
Variância	2,8
Desvio padrão geométrico	1,7
CV	111,0%
Medidas de posicionamento	
Primeiro Quartil	0,6
Segundo Quartil	1,6
Terceiro Quartil	4,3
Outras medidas	
Coefficiente de inclinação	-0,17
Coefficiente de curtose	0,19



**Figura 7** - Distribuição espacial da vazão (Athayde et al. 2012)  
**Figure 7** - Spatial distribution of flow rates (Athayde et al. 2012)



**Figura 8** - Distribuição espacial da capacidade específica (Athayde et al. 2012)  
**Figure 8** - Spatial distribution of specific flow rates (Athayde et al. 2012)

#### 4 RESULTADOS

##### Características hidrogeológicas regionais

As variáveis hidrogeológicas nível es-

tático, nível dinâmico, profundidade das entradas de água, profundidade perfurada e vazão, separadas em porcentagem, são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3** - Variáveis hidrodinâmicas do SASG no Paraná  
**Table 3** - Hydrodynamic variables of the SGAS in Paraná

Percentil	Cota NE(m)	Cota ND (m)	Q (m³ h <sup>-1</sup> )	Profundidade do poço (m)	Q/S (m³h <sup>-1</sup> )m <sup>-1</sup>	Profund. EA (m)	Profund. NE (m)
<b>Máximo</b>	1157,3	1144,0	250,0	432,0	304,62	306,0	141,0
<b>99</b>	1060,2	1023,9	160,3	300,0	37,30	235,1	129,4
<b>98</b>	991,7	973,8	131,9	275,7	33,66	209,1	98,6
<b>97</b>	933,7	913,0	121,5	252,1	25,31	189,0	87,6
<b>95</b>	859,2	818,9	100,0	250,0	16,89	180,9	69,0
<b>95</b>	798,8	783,3	92,7	231,1	11,88	168,4	61,2
<b>91</b>	736,4	699,3	79,9	204,0	9,77	154,0	53,4
<b>90</b>	719,9	693,3	75,9	202,6	9,18	150,0	50,4
<b>85</b>	661,6	647,8	62,4	182,4	6,30	135,3	35,4
<b>75</b>	570,8	549,9	42,5	150,0	4,18	114,0	25,0
<b>65</b>	516,5	493,2	35,0	150,0	3,03	93,1	18,1
<b>50</b>	450,4	421,0	20,5	130,0	1,54	77,0	12,6
<b>40</b>	410,6	388,7	16,8	113,8	1,09	67,4	8,6
<b>25</b>	332,8	322,0	10,3	99,0	0,59	50,7	5,0
<b>15</b>	290,3	273,9	7,50	80,0	0,29	41,6	3,2
<b>5</b>	224,0	200,9	4,52	63,6	0,10	27,5	1,5
<b>Mínimo</b>	14,8	14,6	0,5	30,0	0,0	6,0	0,0
<b>Média</b>	469,7	445,7	21,5	137,0	1,5	31,4	18,0
<b>Número de ocorrências</b>	329	330	333	333	329	312	322

Q= vazão / Q/S= capacidade específica / EA = entrada de água / NE= nível estático.

Para os 337 poços tubulares, os valores de profundidade perfurada possuem mediana de 130 metros e terceiro quartil corresponde à profundidade de 150 metros. A análise dos dados cadastrais dos poços indica que não existe correlação entre a profundidade perfurada e incremento na produção do poço.

Foram descritas entradas de água até 306 metros de profundidade, entretanto, predominam entradas mais superficiais, com mediana de 77 metros, e 114 metros correspondendo ao terceiro quartil. As maiores vazões são encontradas em poços com profundidades entre 100 e 150 metros. Da mesma maneira, a capacidade específica tende a diminuir com a profundidade do poço. Uma hipótese é que com o aumento da profundidade e pressão litostática ocorre o fechamen-

to de aberturas em profundidade.

#### 4.1 Condicionantes exploratórios regionais

##### Proximidade do arcabouço geológico estrutural

Nas duas escalas de análise a proximidade ao arcabouço estrutural favorece poços com melhores índices de produção. Comparando os resultados nas duas escalas, observa-se que a proximidade dos lineamentos (estruturas geológicas rúpteis subverticais) aumenta a ocorrência de poços com índices de produção mais elevados. A Tabela 4 apresenta os valores da mediana da capacidade específica e da vazão separados por escala de análise e distância dos lineamentos.

**Tabela 4** - Valores da mediana da capacidade específica e vazão, separados por escala de análise e distância dos lineamentos

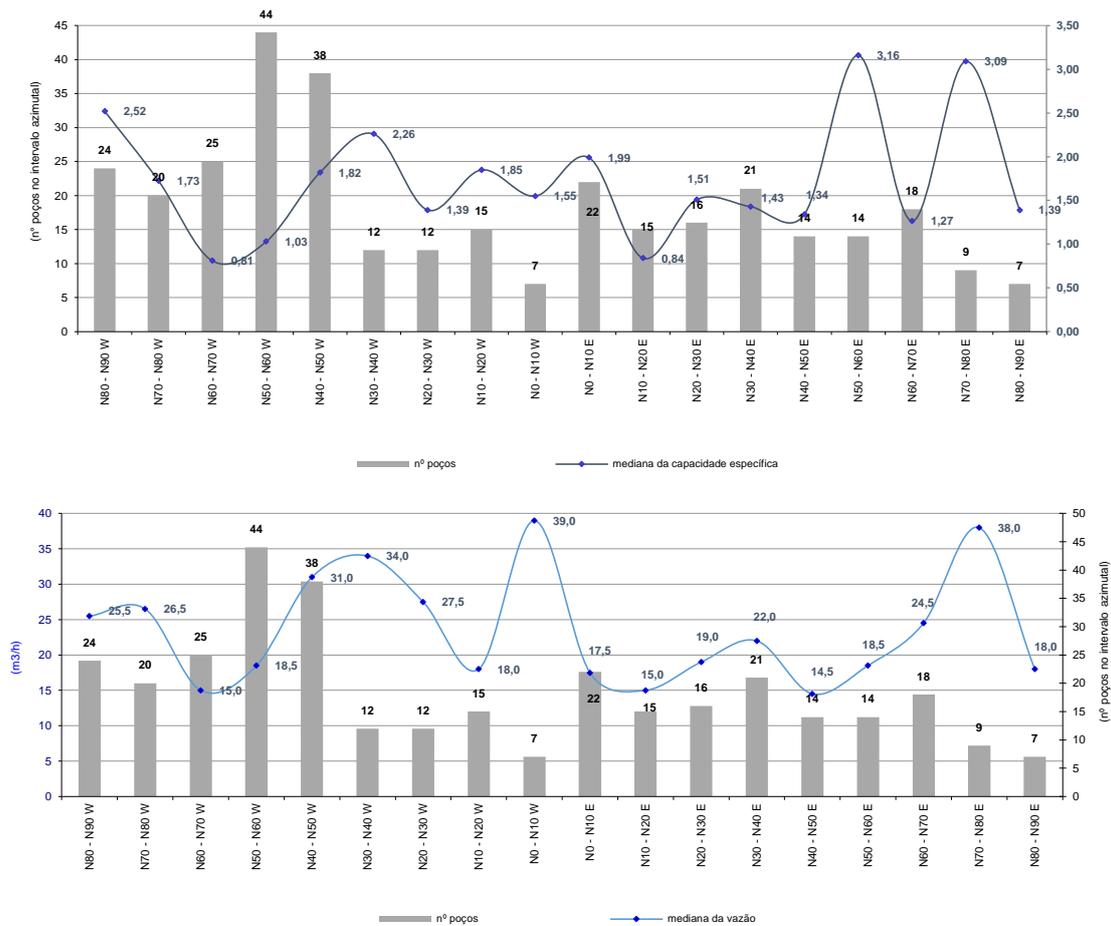
**Table 4** - Median values of specific flow rates and flow rates, separated by distance and scale analysis of lineaments

Proximidade do lineamento	Mediana da capacidade específica	Mediana da vazão	Número de poços.
Escala de análise 1:2.500.000 – Arcabouço Estrutural do SASG no Estado do Paraná			
Poços até 5 km	1,51 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )m <sup>-1</sup>	18,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	87
Poços até 1 km	2,72 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )m <sup>-1</sup>	30,5 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	18
Escala de análise 1:600.000 – Lineamentos traçados no SASG.			
Poços até 1 km	2,39 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )m <sup>-1</sup>	24 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	138
Poços até 500 m	2,43 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )m <sup>-1</sup>	22 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	89
Poços até 100 m	2,43 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )m <sup>-1</sup>	22 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	17

##### Análise direcional e tectônica

Neste item é apresentada a análise entre a direção do lineamento onde o poço

está locado e a produtividade do poço. A Figura 9 apresenta gráficos com os valores de capacidade específica e vazão, separados segundo intervalos de 10°.



**Figura 9** - Gráficos com os valores de capacidade específica e vazão, separados segundo intervalos de 10°

**Figure 9** - Graphics with specific flow rates and flow rates values, according 10° intervals

A análise dos gráficos apresentados na Figura9 permite identificar que poços tubulares profundos locados sobre estruturas (lineamentos na escala 1:600.000) com azimute entre N50 - 60E possuem mediana de capacidade específica de 3,16 (m³h⁻¹)m⁻¹. O segundo intervalo de maior mediana da capacidade específica é N70 - 80E, com 3,09 (m³h⁻¹)m⁻¹. No quadrante noroeste, destacam-se os intervalos N80 - 90W e N30 - 40°W, com mediana dos valores de capacidade específica 2,52 (m³h⁻¹)m⁻¹ e 2,26 (m³h⁻¹)m⁻¹, respectivamente.

Lineamentos com direção N60 – 70W e N10 – 20E representam a direção dos mais baixos valores de capacidade específica: 0,81 (m³h⁻¹)m⁻¹ e 0,84 (m³h⁻¹)m⁻¹, respectivamente, dentre os poços tubulares analisados.

Poços situados em lineamentos com direção entre 0 e N10W possuem a melhor mediana de vazão (39 m³h⁻¹). O intervalo

N60E a N80E destaca-se por vazões medianas entre 24,5 e 38 m³ h⁻¹. No quadrante noroeste, destaca-se positivamente o intervalo N20W a N50W com medianas entre 27,5 e 34 m³ h⁻¹. Poços situados em lineamentos com direção entre N40E e N60E possuem a mais baixa mediana de vazão (valores entre 14,5 e 18,5 m³h⁻¹). No quadrante NW, poços menos produtivos encontram-se sobre lineamentos de direção N50W a N70W (vazões entre 15 e 18,5 m³h⁻¹).

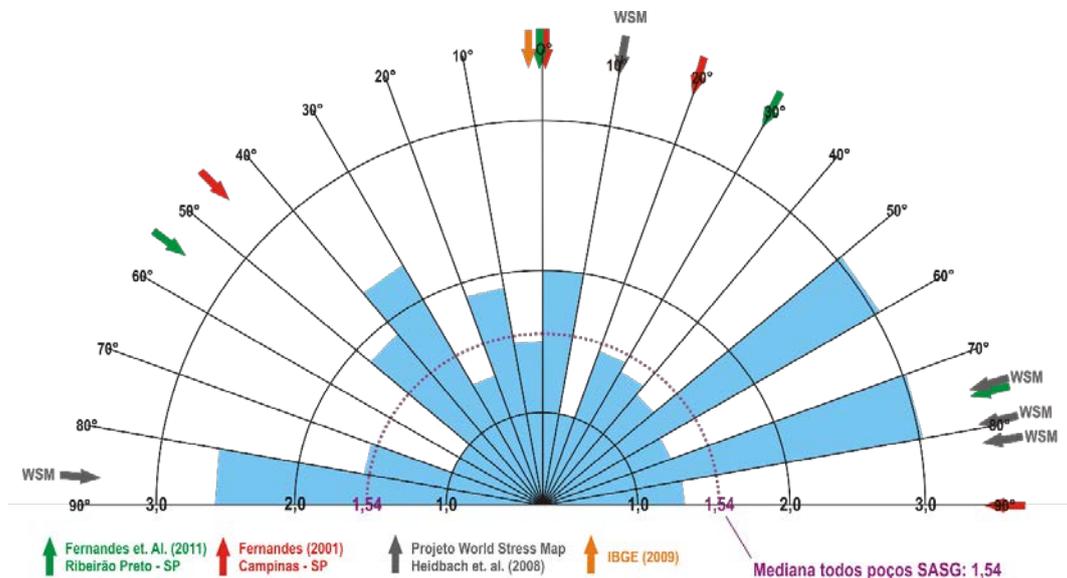
Ressalta-se que em alguns casos, são poucos os poços por intervalo direcional. Observa-se que as direções mais produtivas em cada parâmetro (capacidade específica e vazão) não são semelhantes. Entretanto, as tendências (intervalos mais ou menos produtivos) possuem coincidência satisfatória.

O papel da tectônica no fluxo e armazenamento da água subterrânea é exercer controle direcional nas fraturas abertas e de

cisalhamento. Comparando as direções de maior produtividade com os dados de Heidbach et al. (2008) observa-se que os azimutes de maior tensão localizam-se principalmente segundo as direções leste – oeste e norte – sul. Tais direções corroboram intervalos de maior produtividade no SASG paranaense como N70 - 80E; N70 - 90W; N0 - 10E e N10 - 20W. Outros intervalos de maior produtividade no SASG paranaense (N50 - 60E e N30 - 50W) assemelham-se as direções identificadas por Fernandes (2001 e 2011) no estado de São Paulo como paleo-direções de máximo esforço tectônico. A direção de ten-

são N-S atual, foi caracterizada no trabalho de IBGE (2009) e explica o potencial desta direção no que diz respeito a produção dos poços tubulares do SASG no Estado do Paraná.

A Figura 10 apresenta uma roseta com os valores de capacidade específica dos poços separados em intervalos de 10°. As setas indicam os azimutes de máxima tensão tectônica obtidos por diferentes autores. Em pontilhado é apresentada a curva referente a mediana da capacidade específica de todos os poços aqui estudados.



**Figura 10** - Relação entre a capacidade específica e direções de tensão, por diferentes autores  
**Figure 10** - Relationship between the specific flow rates and stress directions, by different authors

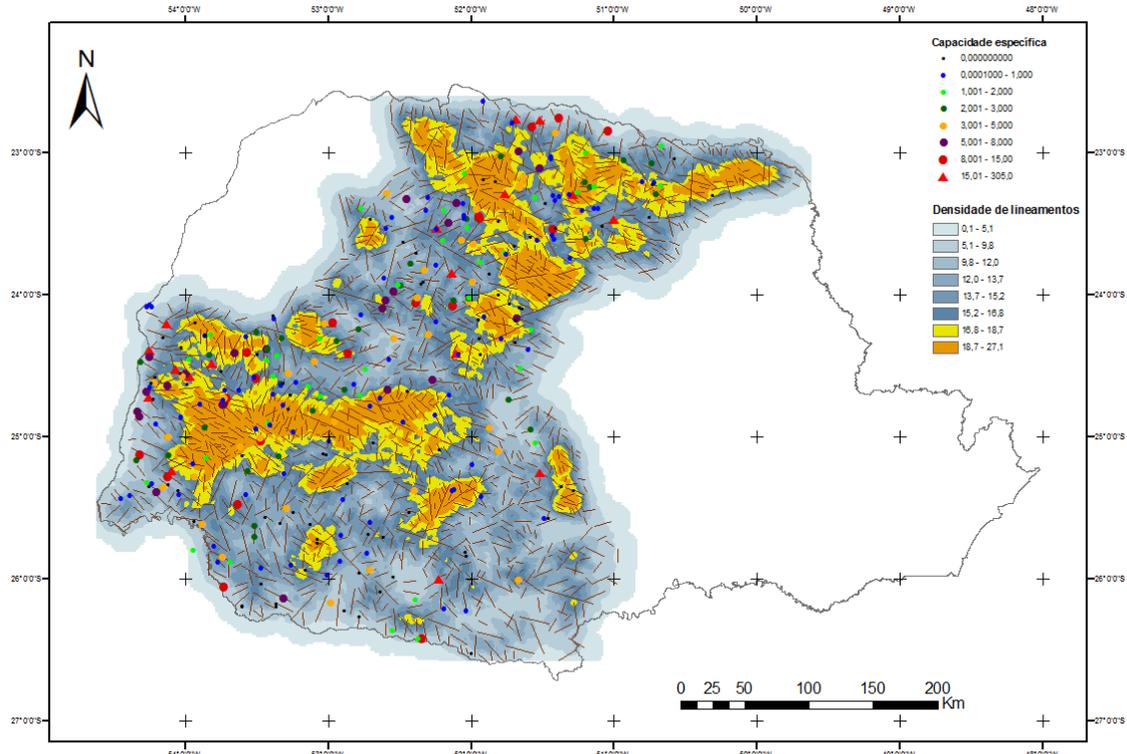
Desta forma, em escala regional e para o estado do Paraná, a tectônica exerce influência significativa na produtividade dos poços.

### Densidade de lineamentos

Utilizando os lineamentos traçados na escala 1:600.000 foram selecionadas áreas com valores de densidade de lineamentos acima do terceiro quartil (18 lineamentos por quilômetro quadrado). Valores de densidade de lineamentos acima do terceiro quartil predominam nos compartimentos Maringá e Foz do Iguaçu (Figura 11, tons amarelos e laranjas), os quais possuem bons índices de pro-  
*Águas Subterrâneas* (2015) 29(3): 315-333.

dução. Entretanto, destaca-se que ao comparar a localização dos poços com valores de capacidade específica acima do terceiro quartil e as áreas de alta densidade de lineamentos, não são observadas relações espaciais. Os poços com elevados índices de produção bordejam áreas com densidades de lineamentos acima do terceiro quartil.

A alta densidade de lineamentos caracteriza um reservatório bastante fraturado, possibilitando recargas mais expressivas e possivelmente compartimentos com maior capacidade de armazenamento, em função do aumento da porosidade secundária, mas não estão associados a altas produções do aquífero.



**Figura 11** - Mapa da densidade de lineamentos e a capacidade específica  
**Figure 11** - Map of lineaments density and specific flow rates

### Geomorfologia regional

A comparação dos condicionantes geomorfológicos com valores medianos de capacidade específica e vazão dos poços (Tabela 5) permitiu identificar os condicionantes que subsidiem na locação de poços tubulares potencialmente produtores.

A dissecação do relevo é inversamente proporcional a produtividade dos poços. Terrenos com alta, média e baixa dissecação apresentam valores de capacidade específica dos poços de 1,09; 1,41 e 2,41 ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$ ), respectivamente. Uma possível explicação é que áreas com baixa dissecação apresentam processos erosivos reduzidos, baixa velocidade de escoamento superficial e maior potencial de infiltração (aspecto favorável à recarga do aquífero fraturado).

Poços tubulares localizados em topos alongados e aplainados, e topos aplainados apresentam os maiores valores de mediana da capacidade específica (2,92 e 2,22 ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$ ), respectivamente). Topos alongados e em

cristas apresentam os menores valores medianos de produtividade [ $1,16 (\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$ ]. Os topos alongados e aplainados favorecem a recarga do aquífero. Isso deve garantir o volume necessário para bons índices de produção dos poços, quando associados a boas características petrofísicas do reservatório aquífero.

Poços situados em “vertentes retilíneas e côncavas na base” apresentam os maiores valores de capacidade específica [mediana de  $2,43 (\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$ ]. Poços situados em vertentes convexas apresentam mediana da capacidade específica de  $1,77 (\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$ . Os menores valores de produtividade estão relacionados aos poços situados em vertentes retilíneas e côncavas [mediana da capacidade específica de  $0,11 (\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$ ]. Vertentes côncavas concentram o escoamento superficial, já vertentes convexas dispersam o escoamento o que geralmente favorece a infiltração e recarga. As vertentes retilíneas representam a interface entre as duas vertentes supracitadas.

**Tabela 5** - Condicionantes geomorfológicos analisados e os valores da Mediana de vazão e capacidade específica**Table 5** - Geomorphological aspects and median values of flow rates and specific flow rates

Condicionantes geomorfológicos	Mediana dos valores		
	Capacidade específica ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$ )	Vazão ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ )	Nº poços
Dissecação alta	1,09	11,5	44
Dissecação média	1,41	20,0	162
Dissecação baixa	2,41	31,0	94
Topos alongados	1,35	19,0	80
Topos alongados e em cristas	1,16	9,0	27
Topos alongados e isolados	1,17	15,0	49
Topos aplainados	2,22	28,0	76
Topos alongados e aplainados	2,92	34,0	69
Vertentes retilíneas e côncavas	0,11	7,0	2
Vertentes retilíneas e convexas	0,90	18,0	9
Vertentes retilíneas	1,16	9,0	27
Vertentes convexas e convexo-côncavas	1,17	15,0	49
Vertentes convexas	1,77	22,0	172
Vertentes retilíneas e côncavas na base	2,43	37,0	42
Vales em degraus	0,11	7,0	2
Vales em V aberto	0,88	17,0	35
Vales em U	0,90	18,0	9
Vales em U aberto	1,17	15,0	49
Vales em V encaixado	1,50	9,0	23
Vales em V	1,82	23,5	140
Vales em calha	2,43	37,0	42
Planalto do Foz do Areia	0,11	7,0	2
Planalto do Alto Capanema	0,38	6,5	4
Planalto de Francisco Beltrão	0,48	11,0	13
Planalto Pitanga/Ivaiporã	0,53	16,0	15
Planalto de Palmas/Guarapuava	0,90	18,0	9
Planalto do Alto/Médio Piquiri	1,17	15,0	49
Planalto de Apucarana	1,37	18,0	15
Planalto do Baixo Iguaçu	1,50	9,0	23
Planalto de Cascavel	1,57	22,0	44
Planalto de Foz do Iguaçu	1,97	19,0	23
Planalto do São Francisco	2,31	32,5	10
Planalto de Campo Mourão	2,43	37,0	42
Planalto de Londrina	2,46	21,0	25
Planalto de Umuarama	3,46	19,0	7
Planalto de Maringá	3,88	51,0	18
Planalto do Médio Paranapanema	5,76	5,8	2

Poços localizados em “Vales em Calha” apresentam os maiores valores da Mediana de capacidade específica [2,43 ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$ )]. Secundariamente estão os poços situados em “Vales em V” [mediana da capacidade específica de 1,82 ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$ )]. Observa-se

que os vales em V apresentam melhor produtividade que os vales em U. Este fato deve refletir o condicionante estrutural na orientação das drenagens.

## 4.2 Características hidroquímicas regionais do SASG

A influência da profundidade da entrada de água nos poços é refletida no aumento dos teores de sódio, sólidos totais dissolvidos e valores de pH na medida que aumentam os valores de profundidade de entrada de água (maior tempo de interação água-rocha).

No Compartimento Hidroestrutural Maringá existem 86 poços. Predomina o tipo químico bicarbonatada cálcica com 64 ocorrências. Os outros tipos químicos classificados foram: bicarbonatada cálcio magnésiana (13 poços); bicarbonatada cálcio sódica (três casos); bicarbonatada sódica e bicarbonatada sódico cálcica com dois poços para cada tipo, uma ocorrência de água tipo bicarbonatada sulfatada sódica e um poço apresentou águas tipo bicarbonatada magnésio sódica.

No Compartimento Hidroestrutural Campo Mourão foram classificados cinco tipos químicos dentre os 68 poços tubulares existentes. Predomina o tipo químico bicarbonatada cálcica (53 poços). Secundariamente foram classificadas águas bicarbonatadas sódicas (seis poços); bicarbonatada cálcio sódica (cinco poços); bicarbonatada cálcio magnésiana (três poços) e um poço classificado como água carbonatada sódica.

O Compartimento Hidroestrutural Foz do Iguaçu possui 91 poços tubulares e nove tipos químicos classificados. Já não há

predomínio nítido das águas bicarbonatadas cálcicas, ainda que este tipo químico seja o preponderante no compartimento (35 poços). Nota-se um aumento expressivo dos poços classificados com águas bicarbonatadas sódicas (24 ocorrências). Nove poços possuem águas bicarbonatadas cálcio sódicas; oito poços apresentam águas carbonatadas sódicas; sete poços possuem tipo químico bicarbonatada sódio cálcica; águas bicarbonatadas cálcio magnésianas foram classificadas em cinco poços e existe uma ocorrência de águas bicarbonatadas sulfatadas sódicas, uma de água sulfatada sódica e um poço possui água tipo bicarbonatada carbonatada sódica.

Dez tipos químicos de água foram classificados após análise dos 92 poços situados no Compartimento Hidroestrutural Foz do Areia. Predomina o tipo bicarbonatada cálcica com 46 ocorrências. Águas do tipo bicarbonatada sódica foram classificadas em 18 poços; águas carbonatadas sódicas são descritas em 14 poços; quatro poços possuem água bicarbonatada cálcio magnésiana e outros quatro apresentam águas bicarbonatadas sódico cálcicas. Dois poços possuem águas tipo bicarbonatadas cálcio sódicas. Águas do tipo bicarbonatada carbonatada sódica, sulfatada sódica, bicarbonatada nitrada sódica e nitrada cálcio sódica possuem uma ocorrência cada neste compartimento.

A tabela 6 apresenta a mediana das concentrações dos diferentes íons, separados por compartimentos Hidroestruturais.

**Tabela 6** - Mediana das concentrações ( $\text{mgL}^{-1}$ ) dos diferentes íons, separados por compartimentos Hidroestruturais

**Table 6** - Median concentrations ( $\text{mgL}^{-1}$ ) of different ions, separated by Hydrostructural compartments

Compartimentos Hidroestruturais	Ca <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sup>-3</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub> <sup>-2</sup>	T	pH	STD
C. Hidro. Maringá Mediana de 86 amostras	19,0	5,1	6,7	0,8	89,0	0,0	1,0	3,0	6,0	51,1	23,1	8,0	156,5
C. Hidro. C. Mourão Mediana de 68 amostras	17,0	3,1	7,3	0,6	82,5	26,0	1,4	3,0	4,0	45,8	22,2	8,3	137,0
C. Hidro. Foz do Iguaçu Mediana de 91 amostras	12,0	2,2	14,2	0,6	83,0	21,8	1,0	1,0	1,5	41,9	23,0	8,8	140,0
C. Hidro. Foz do Areia Mediana de 92 amostras	13,5	2,3	9,5	0,5	78,0	35,6	1,0	3,0	2,0	41,3	21,1	8,4	138,0

### 4.3 Características hidroquímicas dos compartimentos hidroestruturais

De maneira geral as águas do SASG apresentam as seguintes relações entre os cátions e ânions:  $\text{Ca}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^+$  e  $\text{HCO}^{-3} \gg \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2}$ .

No Compartimento Hidroestrutural Maringá teores elevados de cálcio e magnésio associados às menores concentrações de sódio, carbonato, sulfato e pH indicam baixas profundidades de circulação e tempo de residência das águas no aquífero. A mediana da profundidade da entrada de água neste compartimento é 72 metros, com valor máximo de 182 metros. Neste compartimento ocorre o maior valor entre as medianas de STD dentre os compartimentos, associado à menor mediana dentre os valores de pH. Este fato pode ser explicado em função do aporte de efluentes antrópicos no aquífero, os quais aumentam a quantidade de elementos dissolvidos, mantendo o caráter mais ácido (ou menos alcalino) das águas. Neste sentido, destaca-se a ocorrência de nitrato (maior mediana dentre os compartimentos), bem como, potássio, cloreto e fosfato, que associados corroboram a hipótese de aporte de efluentes antrópicos no aquífero (fertilizantes e/ou efluentes de esgoto). Essa associação química corrobora a afirmativa do curto tempo de residência das águas neste compartimento estrutural.

A associação de elementos químicos do Compartimento Hidroestrutural Campo Mourão é bastante similar ao Compartimento Maringá, entretanto com valores menores. Destaca-se a ocorrência de carbonatos e fluoreto nas águas deste compartimento (medianas 26 e 1,4 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente). A mediana da profundidade de entrada de água neste compartimento é 64 metros, com máxima de 180 metros.

No Compartimento Hidroestrutural Foz do Iguaçu os teores de sódio, sulfato, flúor e pH são os mais elevados dentre os compartimentos. Concentrações de cálcio, magnésio, potássio, cloreto, nitrato e fosfato neste compartimento possuem os teores mais baixos quando comparados às medianas d

todo o SASG. Predominam as relações:  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^+$ , e  $\text{HCO}^{-3} \gg \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2}$  neste compartimento. Esta maior concentração de sódio pode estar associada à localização deste compartimento próximo a descarga regional (fluxos de maior tempo de trânsito e profundidade). A mediana da profundidade de entrada de água é 84 metros, com valor máximo de 306 metros de profundidade. Outra fonte de sódio pode estar associada a contribuições do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no quimismo do SASG mediante ascensão das águas. Uma abordagem detalhada destas zonas de mistura de águas pode ser obtida em Athayde et al. (2014).

No Compartimento Hidroestrutural Foz do Areia a associação entre elementos químicos destaca os menores valores de STD dentre os compartimentos hidroestruturais. Destaca-se o íon carbonato com maior mediana neste compartimento. Alguns poços apresentam semelhança química com águas do SAG, em sua área de confinamento. Comparando as cotas potenciométricas de cada aquífero, observa-se que existe relação favorável para ascensão das águas do SAG. O Compartimento Hidroestrutural Foz do Areia apresenta a maior mediana de entrada de água dentre os compartimentos, com 90 metros. A entrada de água mais profunda apresenta 250 metros.

## 5 CONCLUSÕES

O SASG na área abrangida pelo estado do Paraná se caracteriza como um aquífero fraturado, livre, anisotrópico, com poços apresentando produções significativas, que atendem à demanda integral de inúmeros municípios paranaenses.

As estruturas que compõem o arcabouço estrutural do SASG possuem elevadas profundidades ( $\geq 1\text{km}$ ) e conectam diferentes estruturas sub-horizontais atectônicas, características de derrames basálticos, como contatos entre derrames, zonas de cavidades, zonas brechadas.

Poços tubulares perfurados em regiões com fraturamento regional (1:600.000)

nas direções norte-sul e leste – oeste, tendem a ser mais produtivos segundo os dados considerados neste modelo. Tais direções são associadas a eventos tectônicos recentes que atuaram e atuam na placa sul-americana, próximo ao estado do Paraná. Este fato reflete a importância do estudo tectônico e estrutural na locação de poços em aquíferos fraturados.

A direção E-W é associada à movimentação em escala global da placa tectônica sul-americana, desde a separação Brasil – África. A produtividade junto as estruturas NS pode ser associada a direção atual de movimentação da placa sulamericana, sentido norte.

Regionalmente áreas com características geomorfológicas como topos alongados e aplainados; vertentes retilíneas e côncavas na base; vales em calha; vales em V e vales em V encaixados estão associadas a poços com bons índices de produção.

Nos compartimentos Hidroestruturais Maringá e Campo Mourão os poços possuem elevados índices de produção. Predominam águas bicarbonatadas cálcicas no aquífero, quimismo representando fluxos de água mais rasos (também são menores os valores de profundidade máxima da entrada de água nestes aquíferos). Esta menor profundidade de circulação das águas aumenta a vulnerabilidade do aquífero. Isso pode ser a explicação dos elevados teores de nitrato encontrados no Compartimento Hidroestrutural Maringá.

O Compartimento Hidroestrutural Foz do Iguaçu também apresenta poços com excelentes índices de produção. Situado no oeste do estado, este compartimento possui como área de descarga regional o rio Paraná. Trata-se de região onde também ocorre a descarga de fluxos mais profundos do SASG. Esta combinação de fluxos de diferentes profundidades é identificada no número de águas classificadas como bicarbonatadas

sódicas. Inclusive este compartimento apresenta mediana dos valores de sódio maior que a concentração do cálcio nas águas.

Na região deste compartimento grande parte dos poços apresenta condições físicas (cotas potenciométricas) favoráveis para ascensão das águas do SAG até o SASG. Quando isso ocorre, existe uma “contaminação” do SASG uma vez que as águas do SAG nesta região apresentam elevadas concentrações de elementos dissolvidos nas águas, com destaque para o sódio, cloreto e sulfato.

O Compartimento Hidroestrutural Foz do Areia possui a pior mediana considerando os índices de produção dos poços tubulares que captam o SASG. Representa assim a região (compartimento) de maior risco exploratório. Corrobora esta afirmação a existência dos maiores valores de escoamento superficial sobre a Formação Serra Geral (SUDE-RHSA, 1998), indicando baixos valores de infiltração. Outro aspecto importante é que, segundo Licht (2012), neste compartimento ocorrem espessos horizontes de vidros vulcânicos, que representam uma rocha impermeável, reduzindo drasticamente as propriedades petrofísicas do reservatório. Assim como no Compartimento Hidroestrutural Foz do Iguaçu, neste compartimento, predominam águas bicarbonatadas cálcicas, com ocorrências significativas de águas bicarbonatadas sódicas e carbonatadas sódicas.

Cabe ressaltar que este estudo não substitui os levantamentos de detalhe, necessários ao correto entendimento da heterogeneidade hidrogeológica, quando da locação de um poço tubular profundo.

O conhecimento das características hidrogeológicas regionais tornam a exploração do SASG no Estado do Paraná mais previsível, de modo que as empresas de abastecimento público ou empresas privadas interessadas nas águas deste aquífero, possam investir com mais segurança seus recursos.

## REFERÊNCIAS

- ATHAYDE G. B., ATHAYDE C. V. M., ROSA FILHO E. F. Compartimentação hidroestrutural e aptidões químicas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, p. 167-185, 2012.
- ATHAYDE G. B. ATHAYDE C. V. M., LICHT O. A. B., ROSA FILHO E. F. Contribuição ao estudo da conectividade entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG) no Estado do Paraná, Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, v.71, p. 36-45, 2014.
- BERTOLO, R. A., HIRATA, R C A., FERNANDES, A.J. Hidrogeoquímica das águas minerais envasadas do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, p. 515-529, 2007.
- FERNANDES, A. J. The influence of Cenozoic Tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. **Hydrogeology Journal, Heidelberg**, v. 9, p. 151-167, 2001.
- FERNANDES, A. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. **Revista do Instituto Geológico**, v. 29, p. 49-72, 2008.
- FERNANDES, A. J. MALDANER, C., ROULEAU, A. Análise de fraturas nos basaltos de Formação Serra Geral (Ribeirão Preto, SP): aplicação para a elaboração de modelo hidrogeológico conceitual. *Geologia USP. Série Científica*, v. 11, p. 3-20, 2011.
- HEIDBACH O., TINGAY M., BARTH A., REINECKER J., KURFEß D., and MÜLLER B. (eds.), **The World Stress Map - Release 2008**, Commission for the Geological Map of the World, Paris, 1:46 M, 2008.
- HOUNSLOW A.W. **Water Quality Data**. Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, 1995. 397 p.
- IBGE. **Análises e resultados do centro de processamento SIRGAS – IBGE**, 2009. 40p.
- LICHT, O. A. B. **Estudo de produtos hidrovulcânicos no sudoeste do Paraná**, Brasil. Curitiba, V1. 314 f. 2012.
- MINEROPAR.. Minerais do Paraná S.A. **Mapa geológico do Estado do Paraná**. Escala 1:650.000 Curitiba: Mineropar, 2006a.
- MINEROPAR. Minerais do Paraná S.A. **Mapa Geomorfológico do Estado do Paraná**. Escala 1:650.000 Curitiba: Mineropar, 2006b.
- SANEPAR.. **Relatório técnico interno**. Unidade de Serviços de Hidrogeologia USHG-SANEPAR, Curitiba. 2014.
- SUDHERSA. **Atlas de Recursos Hídricos do Estado do Paraná**. 1998.