

XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
VII FENÁGUA - Feira Nacional da Água
XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DO AQUÍFERO GUARANI, NO
SETOR MÉDIO DA BACIA HIDROGRÁFICA MOGI-PARDO UTILIZANDO-SE
ANÁLISE FATORIAL**

Andre Luis Invernizzi¹; Sonia Maria Barros de Oliveira²

Resumo - Nesse estudo efetuou-se detalhamento do comportamento hidrogeoquímico do sistema aquífero Guarani, na porção média da bacia hidrográfica Mogi-Pardo, nordeste do Estado de São Paulo. Esse aquífero é composto pelas formações Piramboia e Botucatu, coberto por uma sucessão de rochas vulcânicas da formação Serra Geral. A região estudada abrange porções do aquífero livre a leste, e do aquífero confinado a oeste, o que possibilitou estabelecer a evolução hidrogeoquímica das águas no sentido do fluxo, a partir da área de recarga. Análise Fatorial foi realizada com os dados químicos e físico-químicos de 38 amostras de água do aquífero, permitindo identificar três grupos de água com características distintas. O Grupo 1 ocorre na região livre do aquífero e é composto por águas bicarbonatadas cálcio-magnesianas, bem diluídas (condutividade < 100 µS/cm) e pH ácido. O Grupo 2 ocorre na porção confinada, e é formado por águas bicarbonatadas cálcicas com condutividade entre 130 e 250 µS/cm e pH variando de neutro a levemente alcalino. O Grupo 3 engloba as águas bicarbonatadas sódicas com pH alcalino e condutividade entre 170 e 318 µS/cm, ocorre na região noroeste da área, na porção confinada, e no extremo leste da área, região de afloramento da Formação Pirambóia.

Abstract – The present work is concerned with the hydrogeochemical behavior of the Guarani Aquifer System in the medium portion of the Mogi-Pardo rivers basin, northwestern region of the São Paulo state, Brazil. This aquifer system is composed of the Botucatu and Piramboia formations, capped a thick succession of volcanic rocks of the Serra Geral Formation. The focused area includes unconfined portions of the aquifer system to the east, and confined portions to the west, marking it possible to analyze the hydrogeochemical evolution of the waters from there charge area, parallel to flow direction. The results of physicochemical and chemical analysis from 38 water samples were submitted to factorial analysis, leading to the characterization of three samples groups. Group 1 is related to the unconfined portion of the aquifer and is characterized by diluted water with conductivity of less than 100 µS/cm and acid pH. Group 2 corresponds to the confined portion of the aquifer, composed of calcium bicarbonated water with conductivity between 130 and 250 µS/cm and pH varying from slightly neutral to alkaline. Group 3 is constituted by sodium bicarbonated water from both unconfined and confined portions of the aquifer, with conductivity between 170 and 318 µS/cm and alkaline pH.

Palavras-Chave – aquífero Guarani; análise fatorial, hidrogeoquímica

¹ Companhia de Pesquisa de Recursos Mineral/Serviço Geológico do Brasil – CPRM/SGB – Av. Pasteur, 404 – Urca – Rio de Janeiro – Fone (21) 22440140 – e-mail andre.invernizzi@cprm.gov.br
² Universidade de São Paulo, Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental. - Rua do Lago, 562 - Cidade Universitária - 05508-900 - Sao Paulo, SP – Brasil - Fone: (11) 30913917 Fax: (11) 30914207

1 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo está localizada na porção paulista do flanco sudeste da Bacia do Paraná e restringe-se a uma pequena parte do aquífero Guarani. Está situada entre os paralelos 20°45' e 22°15' de latitude sul e os meridianos 47°30' e 48°30' de longitude oeste, englobando os limites da bacia hidrográfica Mogi-Pardo na sua porção médio-baixa (Figura 1). As águas estudadas pertencem ao sistema aquífero Guarani, o qual consiste de arenitos eólico-flúvio-lacustres, em sua maior parte confinados por basaltos.



Figura 1 – Localização da área de estudo

2. COLETA DAS AMOSTRAS DE ÁGUA

A coleta das águas foi realizada pela CPRM, entre os meses de outubro e dezembro de 1999, em poços tubulares profundos de 37 municípios da bacia hidrográfica Mogi-Pardo. As águas foram coletadas diretamente da boca do poço, após um período de 30 minutos de bombeamento contínuo.

3. ANÁLISE FATORIAL

A Análise Fatorial modo R foi realizada para o conjunto de 38 amostras e 23 variáveis. Para realização da Análise Fatorial, é necessário decidir sobre o número de fatores a serem considerados. Optou-se pelo modelo de três fatores baseado nos critérios propostos por Kaiser, 1960 (in STATISTICA FOR WINDOWS) e por Cattell, 1966 (in STATISTICA FOR WINDOWS).

No modelo de três fatores, foram calculadas as cargas para cada variável em cada um dos fatores (Tabela 1).

O fator 1 explica 28,2% da variância total e é caracterizado por cargas positivas elevadas para pH, condutividade, Na⁺, Li⁺, SO₄²⁻, CO₃²⁻, F⁻ e Cl⁻. O fator 2 explica 21,5% da variância total e é caracterizado por cargas positivas elevadas para Ca²⁺, Mg²⁺, Sr²⁺, HCO₃⁻ e dureza. O fator 3 explica 10,3% da variância total e é caracterizado por cargas negativas elevadas para Fe²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺.

Tabela 1 – Cargas das variáveis no modelo de três fatores, com rotação varimax.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3
B ³⁺	0,319	0,262	-0,197
Ba ²⁺	-0,498	-0,260	-0,110
Zn ²⁺	-0,100	0,170	-0,837
Fe ²⁺	-0,077	0,059	-0,759
Li ⁺	0,740	-0,027	0,153
Sr ²⁺	0,072	0,853	-0,018
Mn ²⁺	-0,079	-0,178	-0,777
SiO ₂	0,014	-0,071	0,170
Ca ²⁺	-0,056	0,940	-0,010
Mg ²⁺	-0,339	0,757	-0,108
Na ⁺	0,960	-0,080	0,075
K ⁺	-0,518	0,148	0,247
F ⁻	0,658	-0,102	0,015
Cl ⁻	0,660	-0,250	-0,035
NO ₃ ⁻	-0,014	-0,408	-0,311
PO ₄ ³⁻	-0,199	-0,067	0,099
SO ₄ ²⁻	0,958	-0,151	0,028
HCO ₃ ⁻	0,592	0,715	0,105
CO ₃ ²⁻	0,885	-0,133	-0,016
pH	0,784	0,464	0,155
Temp.	0,118	0,575	0,386
Dureza	-0,091	0,953	-0,057
Condução	0,814	0,530	0,037
Autovalor	6,494	4,948	2,360
Proporção da Variância explicada	0,282	0,215	0,103

Tabela 2 – Valores dos scores calculados para as 38 amostras

N. Poço	Fator 1	Fator 2	Fator 3	N. Poço	Fator 1	Fator 2	Fator 3
1	0,582	1,470	-0,072	24	-0,428	-0,695	0,186
2	-0,010	1,301	0,261	25	1,016	-0,305	-0,051
4	0,872	0,074	0,146	26	-0,646	-1,078	0,131
5	3,688	-0,928	0,300	27	-0,625	-0,586	0,308
7	-0,493	-0,842	0,146	28	-0,470	-0,351	0,823
8	-0,515	-0,652	0,153	29	-0,584	-0,564	0,532
9	-0,688	0,116	0,255	31	1,618	-0,388	0,216
10	-0,604	-0,263	0,338	32	-0,042	1,057	0,496
11	-0,322	0,923	-0,722	33	-0,328	0,688	0,412
12	-0,805	-0,599	0,710	35	-0,719	-0,634	0,526
13	-0,321	1,299	-0,965	36	-0,571	-0,804	0,255
14	1,090	0,324	1,098	37	0,109	0,774	0,520
16	-0,403	-0,647	-4,599	38	-0,056	1,174	0,386
17	-0,259	-1,378	-2,201	40	-0,114	0,669	0,382
19	0,007	2,793	-1,526	42	-0,117	1,023	0,482
20	3,253	-0,830	-0,431	44	-0,530	-0,412	0,481
21	-0,431	-0,913	0,445	45	-0,837	-0,232	0,882
22	-0,338	-1,211	-0,621	46	-0,645	-0,641	0,724
23	0,102	2,170	-0,133	47	-0,436	-0,905	-0,275

negativos ou próximos de zero. São águas muito diluídas, com baixos teores dos principais elementos analisados. Grupo 2 – Amostras com valores de F1 próximos de zero e valores de F2 geralmente superiores a 1. São águas ricas em cálcio e bicarbonato, e empobrecidas em sódio e nos demais elementos de F1. Grupo 3 – Amostras com altos valores de F1 e valores de F2 sempre inferiores a 1. São águas mais ricas em sódio, de pH elevado, e empobrecidas em cálcio e nos demais elementos de F2.

4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Análise Fatorial realizada permitiu dividir as águas do sistema aquífero Guarani, dentro da área de estudo, em três grupos com características físico-químicas e químicas distintas (INVERNIZZI, 2001).

O Grupo 1 engloba as águas mais diluídas (condutividades < 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e com pH entre 5,6 e 6,9, que ocorrem na região de afloramento da Formação Botucatu, área de recarga do aquífero. Essa região comporta-se como um sistema quimicamente aberto, onde a composição das águas subterrâneas é diretamente influenciada pelas precipitações.

O Grupo 2 é formado por águas bicarbonatadas cálcicas, com condutividades entre 130 e 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH entre 6,6 e 8,6, que ocorrem na porção confinada do aquífero, em uma faixa de aproximadamente 60 km, a partir do contato da Formação Serra Geral com a Formação Botucatu. Nessa região o capeamento do basalto é pouco espesso e muito fraturado, propiciando uma

Prosseguindo a Análise Fatorial, foram calculados os *scores* para as amostras através do produto da matriz de dados originais pela matriz dos pesos fatoriais (Tabela 2). Os *scores* dão uma medida da importância de cada fator na caracterização de cada amostra.

Os *scores* das amostras foram representados em diagramas F1 versus F2 (Figura 2). Nesse diagrama é possível identificar três grupos de amostras, a saber: Grupo1 – Amostras com valores de F1 e F2 muito baixos, geralmente

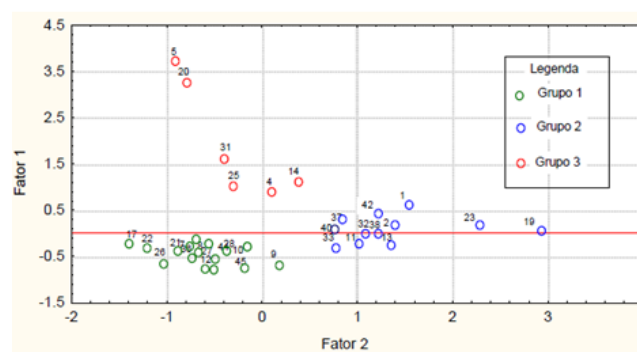


Figura 2 – Diagrama scores F1 x scores F2

alimentação indireta do aquífero Botucatu. As águas carregadas em CO₂, ao percolarem o basalto, provocam dissolução incongruente dos plagioclásios e piroxênios, enriquecendo as águas em cálcio (principalmente), magnésio, sódio, potássio, ferro, silício e bicarbonato.

O Grupo 3 envolve as águas bicarbonatadas sódicas, com condutividades entre 173,9 e 318,0 uS/cm e pH entre 8,2 e 9,4, que ocorrem tanto na porção confinada do aquífero, no noroeste da área, como na região de afloramento da Formação Pirambóia no leste da área. A composição química dessas águas é bem diferente daquela dos outros dois grupos, apresentando teores mais elevados de sódio, cloreto, sulfato e bicarbonato, e baixos teores de cálcio.

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

No setor leste da área estudada, que é a zona de alimentação do aquífero, a maior parte dos poços apresenta as águas pouco mineralizadas do Grupo 1, captadas dos sedimentos da Formação Botucatu, aflorantes ou recobertos por uma camada pouco espessa de basalto. Apenas três poços nessa área têm suas águas provenientes dos sedimentos aflorantes da Formação Pirambóia, sendo caracterizadas por teores baixos de cálcio e mais elevados de sódio, o que as colocam no Grupo 3. As águas do Grupo 1, ao percolarem as rochas do aquífero no sentido do fluxo, dissolvem os minerais, enriquecendo-se em vários íons, principalmente HCO₃⁻, Ca²⁺ e Na⁺, assumindo as características das águas do Grupo 2. A partir de certo momento no seu percurso para oeste, os teores de Ca²⁺ começam a abaixar, porém mantendo-se ainda superiores ao de Na⁺, que é o traço típico das águas do Grupo 2. No extremo noroeste da área, onde a água é coletada tanto da Formação Botucatu como da Formação Pirambóia, a tendência de queda nos teores de Ca²⁺ e aumento nos teores de Na⁺ é acentuada, resultando nas águas sódicas do Grupo 3. Essa evolução sugere que teores mais elevados de sódio sejam ao mesmo tempo resultantes do enriquecimento normal em sais no sentido do fluxo e da influência de uma possível assinatura geoquímica das águas da Formação Pirambóia. Outra hipótese seria que a água proveniente da área de afloramento da Formação Pirambóia, considerada como área de recarga, fosse água de descarga de outro aquífero, por isso apresenta as características de água mais evoluída geoquimicamente semelhante à encontrada na porção oeste do sistema aquífero Guarani.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INVERNIZZI, A.L. 2001 – Caracterização hidrogeoquímica do aquífero Botucatu, no setor médio da bacia hidrográfica Mogi-Pardo – Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

STATISTICA FOR WINDOWS. 1993. Release 4.3 - Slat Soft.