

CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA BACIA DOS RIOS MACACU-CACERIBU-GUAPIAÇU COM BASE NA MODELAGEM GEOQUÍMICA

Rodrigo Menezes Raposo de Almeida¹; Felipe Alves Rosa²; Decio Tubbs Filho³

Resumo – Apresenta-se uma caracterização geoquímica clássica do aquífero com base nos parâmetros físico-químicos de campo como pH, condutividade elétrica, temperatura, potencial redox e oxigênio dissolvido e parâmetros químicos de laboratório como cátions e ânions maiores e elementos traço. Em seguida, utilizando o modelo PHREEQC, faz-se uma especiação e cálculo dos índices de saturação de modo a melhor entender a origem de alguns elementos maiores e elementos traço nas águas subterrâneas locais como o bário e o flúor.

Abstract – This paper presents the classical geochemical characterization of shallow and depth ground waters in the Macacu-Caceribu-Guapiaçu river basin using the field parameters like pH, electrical conductivity, redox potential and dissolved oxygen and laboratory elements like major ions and trace elements. It was also used computer models like PHREEQC to calculate the ground water speciation and mineral equilibrium. The geochemical modeling was used to understand the concentration of barium and fluorite in ground waters.

Palavras-chave – hidroquímica, qualidade da água, modelagem geoquímica, PHREEQC, bário, flúor

¹ Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Geotecnologia, Rua Passo da Pátria, 156, sala 133, São Domingos, Niterói, RJ, 24.210-240, Tel. 21 2629 5354, email: rraposo@pq.cnpq.br

² Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, email: felipealvesrosa@gmail.com

³ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Geociências, Seropédica, RJ, email: tubbs@uol.com.br

1 - INTRODUÇÃO

A região das bacias dos rios Macacu, Caceribu e Guapiaçu é bastante conhecida do ponto de vista hidrogeológico no Estado do Rio de Janeiro, pelo grande número de fontes de água mineral em atividade. Entretanto, com a implantação do novo pólo petroquímico da PETROBRAS denominado de COMPERJ, faz-se necessário conhecer melhor a hidroquímica das águas subterrâneas na região antes da implantação do pólo de modo a orientar a proteção deste recurso. Por outro lado, os métodos tradicionais de caracterização e classificação geoquímica não são suficientes para o entendimento completo da presença de minerais traços nas águas subterrâneas. Deste modo, propõe-se a utilização da modelagem geoquímica para auxiliar o entendimento da ocorrência de alguns minerais traços nas águas subterrâneas da região, em especial o bário e o flúor.

2 - METODOLOGIA

Para análise das características hidroquímicas das águas subterrâneas, foram utilizadas análises químicas de 15 fontes de água mineral do DNPM complementados pelas análises químicas de 11 poços de monitoramento na área do projeto, totalizando 26 pontos de análise. Os dados de localização e hidroquímicos das fontes de água mineral na região de interesse foram coletados no site do DNPM (Departamento Nacional de Pesquisa Mineral), banco de dados SIGHIDRO (Banco de Dados das Fontes Hidrominerais do Brasil). As fontes de água mineral identificadas como PA-01 a PA-15 representam as características químicas dos aquíferos fissurais. Foram instalados ainda 10 poços de monitoramento com 4" de diâmetro em PVC geomecânico nas áreas com insuficiência de dados de modo a melhorar a cobertura espacial da área de interesse nas bacias, estes poços foram denominados de PM-00A a PM-00J e representam as características químicas dos aquíferos aluvionares. Finalmente o poço PA-084 (PM-VVNA) representa as características químicas do aquífero ou formação Barreiras/Macacu. A Figura 1 apresenta a localização dos poços utilizados nesta pesquisa em relação a bacia hidrográfica dos rios Macacu-Caceribu-Guapiaçu.

Nos poços de monitoramento instalados e no poço PA-084, foi realizada uma campanha de amostragem utilizando o método da baixa vazão, com determinação dos parâmetros físico-químicos no campo (pH, CE, T, OD e Eh) e parâmetros químicos em laboratório. As amostras para determinação de metais foram filtradas em campo em membrana de 0,45 µm. As amostras foram mantidas refrigeradas em cooler até a entrega no laboratório LABAGUAS da PUC-Rio.

No laboratório, foram determinados os cátions maiores (Ca, Mg, Na e K), ânions maiores (Cl, HCO₃, SO₄ e NO₃), metais (Al, Fe e Mn) e elementos menores (As, B, Br, Ba, Be, Co, Cd, Cu, Cr, Pb, F, Hg, Li, Mo, SiO₂, Ni, Se, Sc, Sr, Sb, Ti, Zn, V e W).

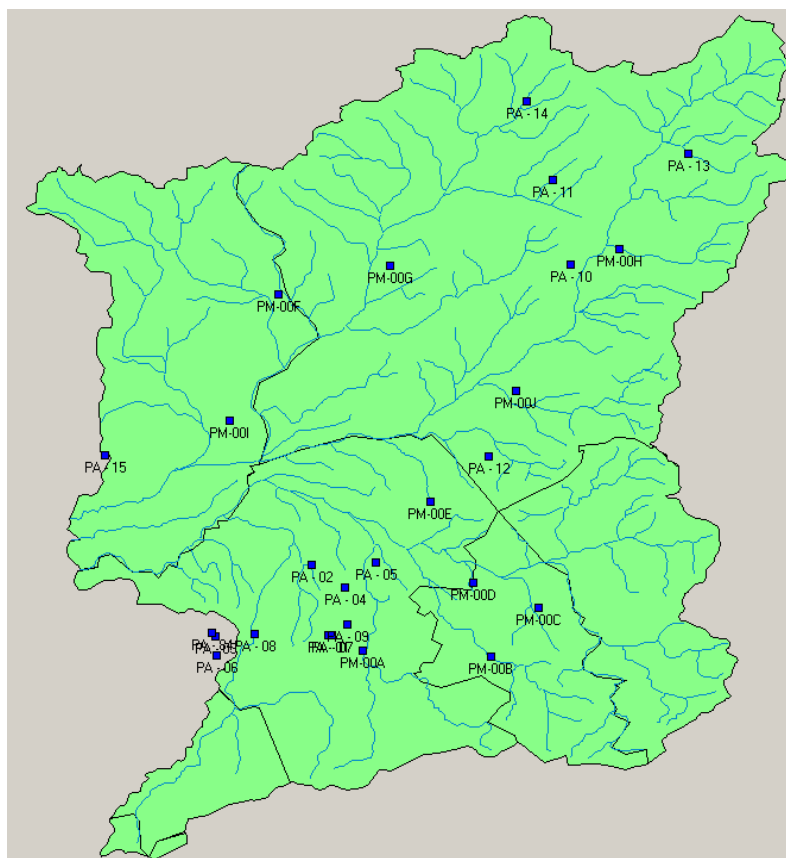


Figura 1 – Localização dos poços utilizados para caracterização da hidroquímica da água subterrânea na bacia dos rios Macacu-Caceribu-Guapiaçu.

3 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 – Potencial hidrogenionico - pH

O pH das águas subterrâneas apresentou variação entre 3,67 no poço PM-00E até 7,90 no ponto DNPM-01. De um modo geral, observa-se que os valores mais baixos, inferiores a 5,0 são representativos dos poços aluvionares e os valores mais elevados, superiores a 5,50 são mais representativos dos aquíferos fissurais. O pH do aquífero Barreiras foi de 6,66. O histograma da Figura 2 apresenta a distribuição dos valores de pH de todos os pontos analisados, os valores identificados por um triângulo são os valores de pH dos poços aluvionares. Observa-se uma distribuição binormal com valores médios entre 4,5 e 5,0 para os poços do aquífero aluvionar e valores médios entre 5,5 e 6,0 para os poços do aquífero cristalino fissural.

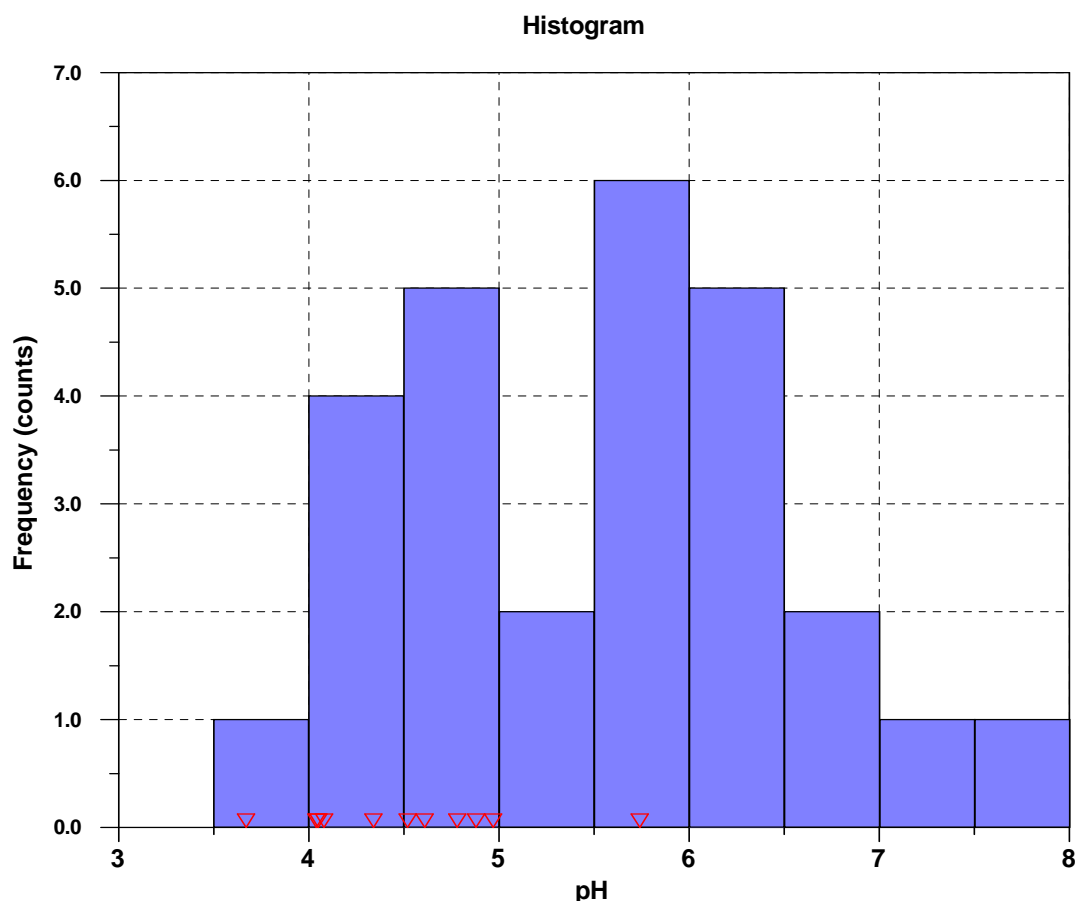


Figura 2 – Histograma do pH das águas subterrâneas.

3.3 – Condutividade elétrica – CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

A condutividade elétrica apresentou valores entre $25 \mu\text{S}/\text{cm}$ no poço PM-00H e $426 \mu\text{S}/\text{cm}$ no poço PM-00B. Considerando todos os dados, Figura 3, observa-se uma distribuição lognormal da condutividade elétrica, sendo que as amostras do aquífero freático aluvionar foram as que apresentaram os menores valores de CE, setas vermelhas indicadas no gráfico – no geral valores inferiores $75 \mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de CE das águas dos aquíferos cristalinos fissurais, tendo em vista resultar numa circulação mais profunda e com maiores tempos de residência, tendem a apresentar maior quantidade de íons dissolvidos, entretanto os baixos valores resultantes sugerem que as águas subterrâneas circularam em rochas cristalinas pouco reativas, resultando em baixos valores de CE. Os valores de CE dos aquíferos aluvionares apresentaram valores entre $25 \mu\text{S}/\text{cm}$ no ponto PM-00H e $426 \mu\text{S}/\text{cm}$ no ponto PM-00B. Com exceção do PM-00B, os valores da CE dos aquíferos aluvionares são bem mais baixos. O valor da CE na amostra coletada no PM-084 localizado no aquífero Barreiras/Macacu foi de $202 \mu\text{S}/\text{cm}$, valor bem superior às medias observadas nos aquíferos aluvionares e cristalinos fissurais.

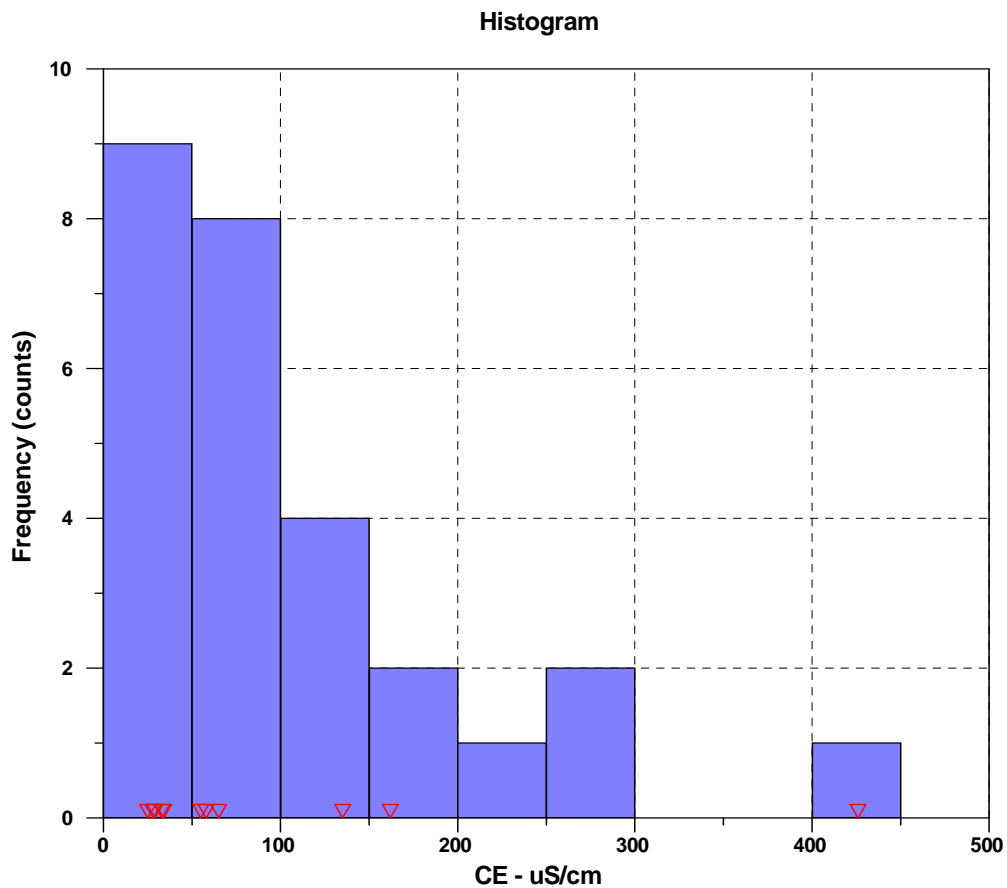


Figura 3 – Distribuição da CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) em todos os pontos de monitoramento.

3.4 – Potencial Redox – Eh (mV)

Foram medidos os valores de Eh de campo, sendo posteriormente corrigidos para os valores do Ehsys, eletrodo de hidrogênio, nos poços de monitoramento instalados PM-00A a PM-00J e no PM-084 (PM-VVNA). O gráfico da Figura 4 apresenta a distribuição estatística dos valores de Eh para os poços amostrados. Observa-se que os valores de Eh são elevados, entre 200 e 350 mV, sugerindo a ocorrência de águas subterrâneas bem oxidadas, com exceção da amostra do PM-00I que apresentou valor de Eh de 53 mV, portanto bem mais reduzido que os demais. De fato, durante a amostragem foi observado odor característico da presença de sulfetos na água, com provável ocorrência de H₂S dissolvido nas águas. De todos os aquíferos aluvionares amostrados, o aquífero do baixo rio Macacu foi o único que apresentou Eh reduzido, provavelmente devido a presença de argilas orgânicas intercaladas ao sedimento depositado mais próximo a baía de Guanabara nos períodos onde o nível d'água médio era bem mais elevado que o atual.

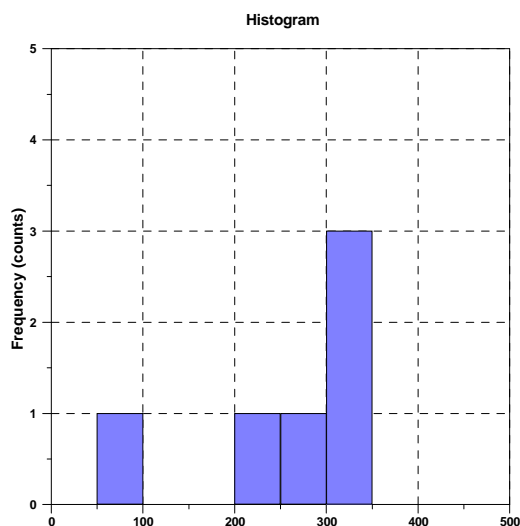


Figura 4 – Distribuição estatística do Eh (mV) todos os pontos amostrados

3.5 – Oxigênio dissolvido– OD (mg/L)

Os valores de oxigênio dissolvido foram medidos no campo com eletrodo específico, nos poços de monitoramento instalados PM-00A a PM-00J e no PM-084 (PM-VVNA). O gráfico da Figura 5 apresenta a distribuição estatística dos valores de OD nas amostras de água subterrânea. O menor valor de OD registrado foi no poço PM-00D com 0,54 mg/L e o poço que apresentou o maior valor foi o PM-00J com 4,68 mg/L. Observando o histograma do gráfico de OD, observa-se que a grande maioria das amostras apresentam valores entre 0,5 e 1,0 mg/L, sendo portanto, valores representativos de águas subterrâneas com pouco contato atmosférico ou reduzidas pela oxidação da matéria orgânica durante o processo de infiltração e fluxo subterrâneo.

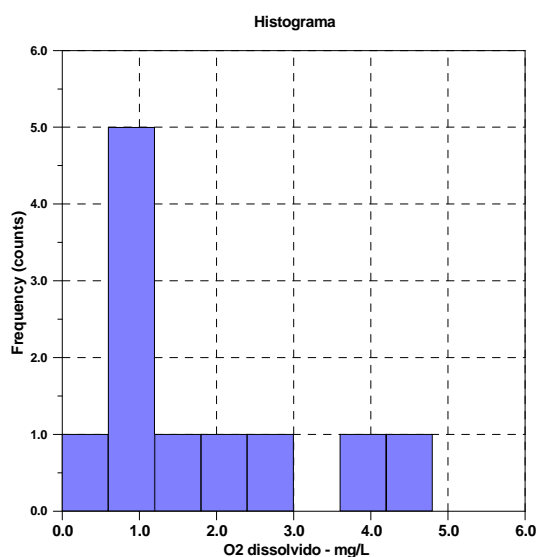


Figura 5 – Distribuição estatística do OD (mg/L) em todos os pontos amostrados

3.6 – Total de sólidos dissolvidos – TDS (mg/L)

O Total de Sólidos Dissolvidos – TDS foi determinado em laboratório pelo LABAGUAS somente nas amostras do PM-00A a PM-00J e PA-084 (PM-VVNA), nas demais amostras o TDS foi calculado analiticamente a partir dos íons maiores utilizando o programa AquaChem, WHI (2000). O TDS apresentou valores entre 29,92 mg/L no poço PA-02 (DNPM-02) e 371 mg/L no poço PM-00B, demonstrando comportamento similar ao observado na CE. O gráfico da Figura 6 ilustra um comportamento log-normal do TDS com a maioria dos valores inferiores a 50 mg/L, ilustrando a baixa salinidade das águas subterrâneas, característico de ambientes pouco reativos e de rápida circulação, denotando a existência de um aquífero extremamente vulnerável a contaminação superficial. O valor do TDS para o PM-084 (PM-VVNA) instalado no aquífero Macacu/Barreiras foi de 185 mg/L, sugerindo uma circulação mais profunda atravessando formações um pouco mais reativas que nos aquíferos aluvionares, como era de se esperar tendo em vista ser um aquífero bem mais profundo.

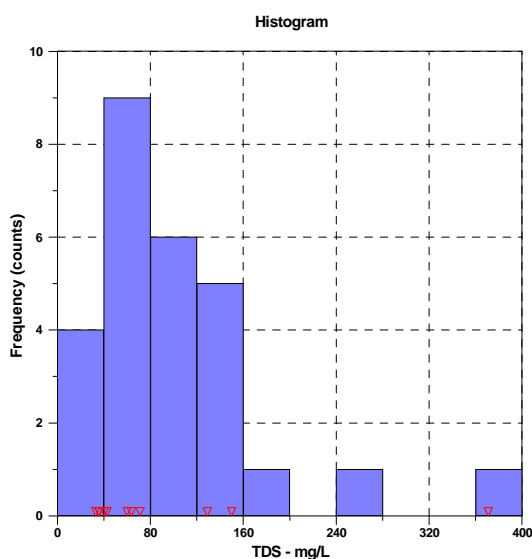


Figura 6 – Distribuição estatística do TDS de todos os pontos amostrados

A Figura 7 apresenta a relação entre a condutividade elétrica CE e o total de sólidos dissolvidos TDS para todas as amostras de água subterrânea. A reta de ajuste entre os dois parâmetros obteve um coeficiente de regressão linear R de 0,91, resultando na seguinte equação: $TDS (mg/L) = 0,729 \times CE + 25,9 (\mu S/cm)$, obedecendo o valor teórico entre 0,6 e 0,8. Observa-se que os valores de CE e TDS menores apresentam menor dispersão em relação a reta de ajuste e os valores maiores apresentam maior dispersão em relação a reta de ajuste, representado pelas amostras dos seguintes pontos DNPM-01 (PA-01) e DNPM-03 (PA-03).

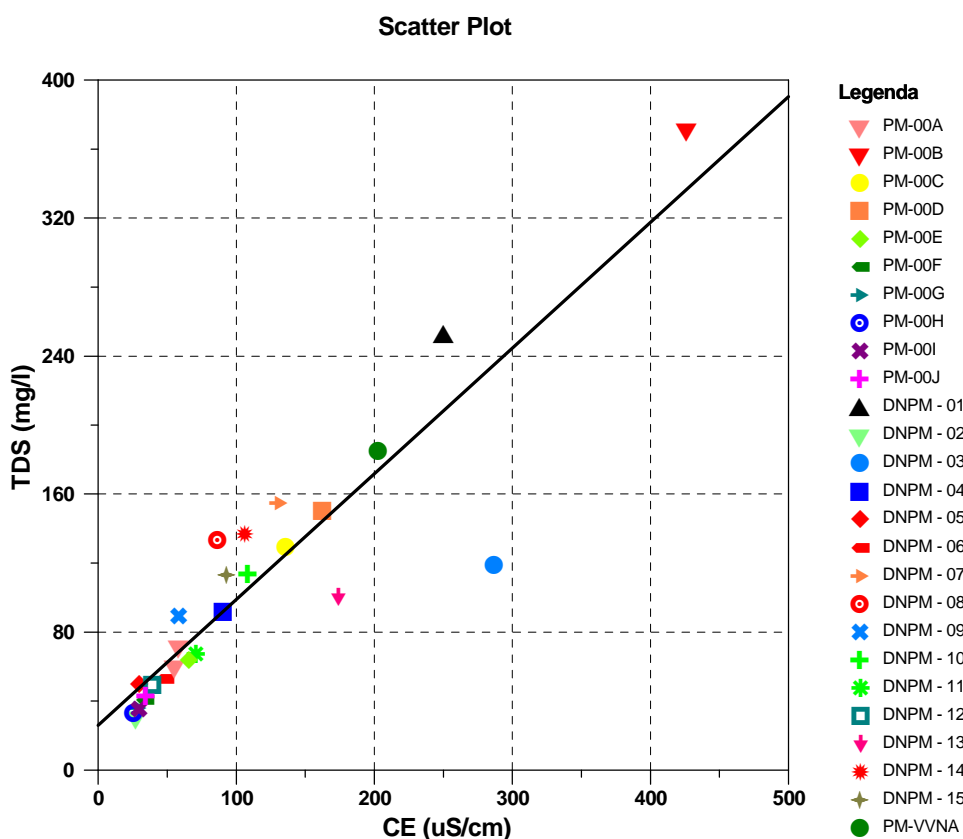


Figura 7 – Relação entre a condutividade elétrica (CE) e o total de sólidos dissolvidos (TDS).

3.7 – Classificação iônica das águas subterrâneas

A partir das concentrações dos cátions (Ca, Mg, Na e K) e ânions maiores (Cl, SO₄ e HCO₃), pode-se classificar as águas subterrâneas de modo a melhor compreender a sua evolução geoquímica. A Figura 8 apresenta o diagrama Piper com todas as amostras dos pontos de água subterrânea. Observa-se que alguns pontos apresentam o HCO₃ como anion principal e outras apresentam o Cl como anion principal, as demais apresentam um equilíbrio entre as concentrações de Cl e HCO₃. As concentrações de SO₄ não são significativas, com exceção da amostra PM-00C que apresentou concentração pouco superior ao valor do Cl. Com relação aos cátions, observa-se que o Na é o elemento dominante em quase todas as amostras, seguido pelo Ca com menor importância. As concentrações de Mg não são dominantes em nenhuma amostra. Deste modo, temos os seguintes grupos de amostras:

- Águas cloretadas sódicas NaCl: PA-12, PM-00A, PM-00D, PM-00E e PM-00I;
- Água sulfatada-cloretada-sódica - Na-SO₄-Cl: PM-00C;
- Águas bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas sódico-calcicas Na-HCO₃ e Na-Ca-HCO₃: PA-01, PA-02, PA-03, PA-04, PA-05, PA-08, PA-09, PA-10, PA-11, PA-14, PM-00G, PM-VVNA;

- Água bicarbonatada-calco-magnésiana - Ca-Mg-HCO₃: PA-013;
- Águas bicarbonatada-cloretada-sódica e bicarbonatada-cloretada-sódica-cálcica – Na-HCO₃-Cl e Na-Ca-HCO₃-Cl: PA-06, PA-15, PM-00B, PM-00H E PM-00J;
- Água cloretada-bicarbonatada-magnésiana - Mg-Cl-HCO₃: PA-07;
- Água Bicarbonatada-sulfatada-sódico-cálcica-magnésiana – Na-Ca-Mg-HCO₃-SO₄: PM-00F.

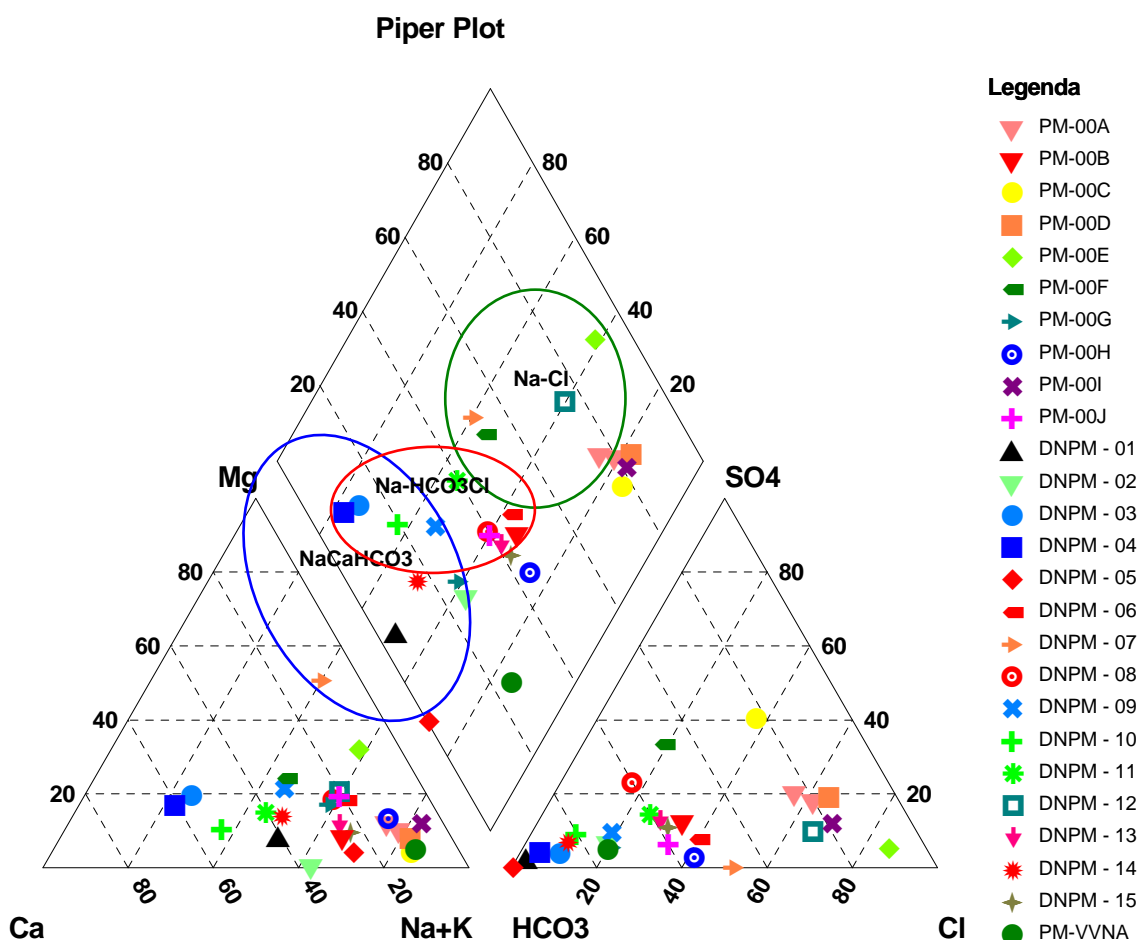


Figura 8 – Diagrama de Piper para todos os pontos de água subterrânea

A Figura 9 apresenta o diagrama de Schoeller para todos os pontos d'água subterrânea. O diagrama de Schoeller permite visualizar os cátions e ânions principais e as concentrações relativas de cada íon. Neste diagrama, observa-se que a amostra que possui maior concentração iônica total e maior concentração de Na, Cl, SO₄ e HCO₃ é do poço PM-00B, tendo apresentado também maior valor de CE e TDS, conforme apresentado anteriormente. A amostra que possui a maior concentração de Ca é a amostra do PA-03 (DNPM-03). A amostra que possui a menor concentração de Mg é a amostra do poço PA-01 (DNPM-01). A amostra que possui a menor concentração de Cl é

a amostra do poço PA-05 (DNPM-05) e as amostras que apresentam as menores concentrações de SO₄ são as amostras dos poços PA-05 (DNPM-05) e PA-07 (DNPM-07).

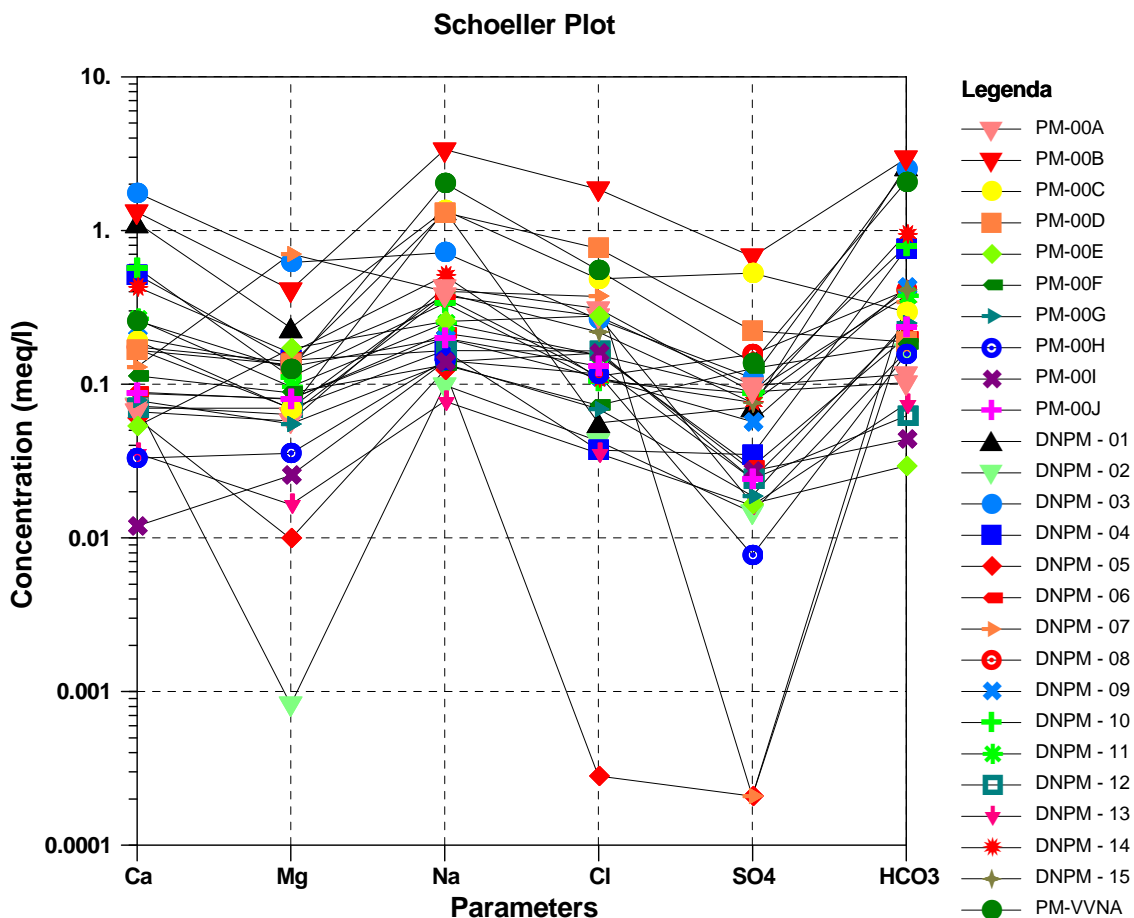


Figura 9 – Diagrama de Schoeller para todos os pontos de água subterrânea

3.8 – Elementos maiores - Cátions

Considerando os cátions maiores como cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K), a Figura 10 apresenta os histogramas de distribuição destes elementos nas amostras de água subterrânea. Observa-se que as concentrações são em geral bem baixas com valores inferiores a 40 mg/L de Ca, 9,0 mg/L de Mg, 80, mg/L de Na e 7,0 mg/L de K. as setas em vermelho indicam as amostras de água subterrânea dos aquíferos aluvionares que apresentaram em geral as menores concentrações destes cátions. Com relação a distribuição estatística, observa-se que o Ca, Mg e o Na apresentam uma distribuição log-normal e o K apresenta uma distribuição normal com valor médio próximo de 1,0 mg/L de K

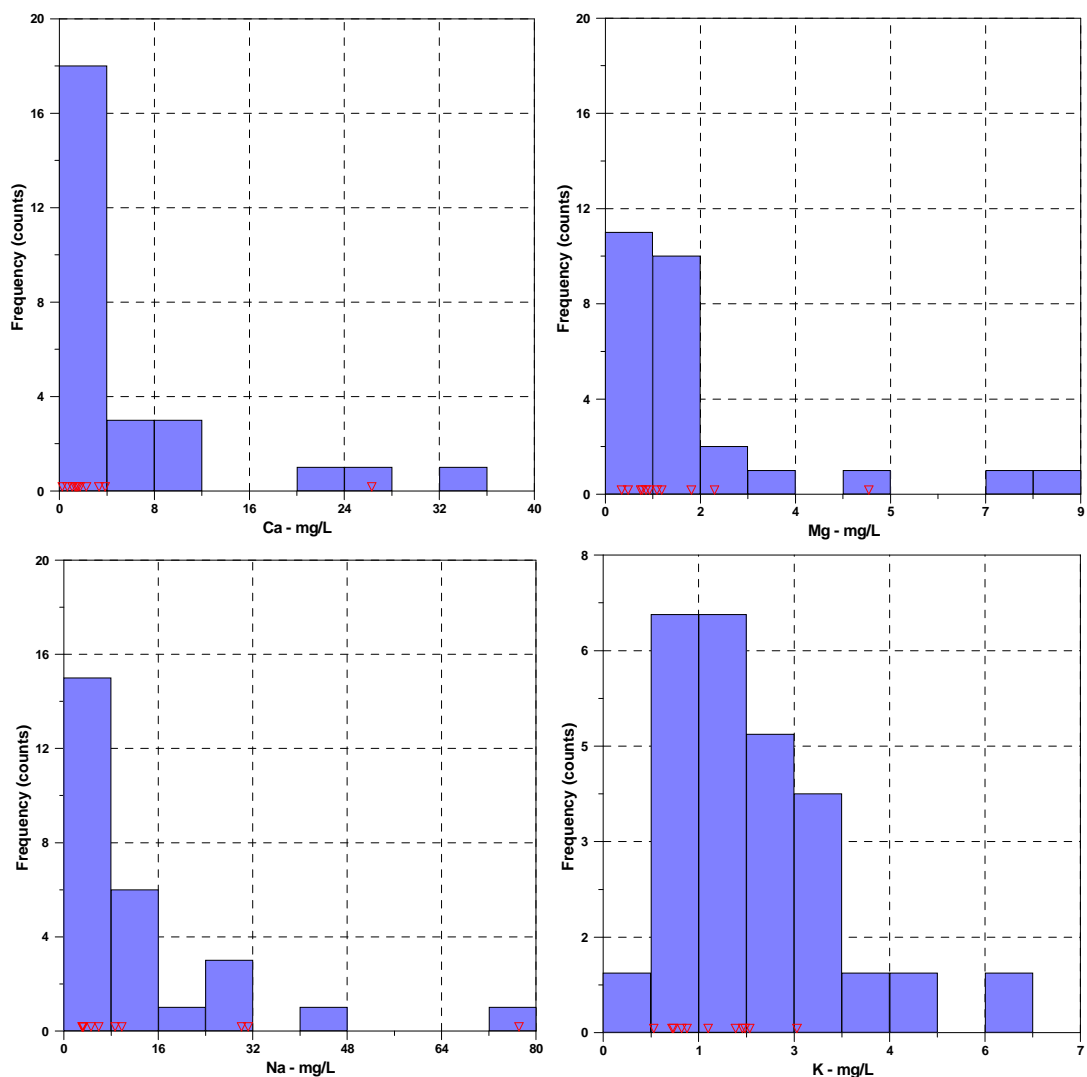


Figura 10 – Histograma de distribuição estatística dos cátions maiores: Ca (cálcio), Mg (magnésio), Na (sódio) e K (potássio).

3.9 – Elementos maiores - Ânions

Considerando os ânions maiores como Cloreto (Cl), sulfato (SO₄) e bicarbonato (HCO₃), a Figura 11 apresenta os histogramas de distribuição destes elementos nas amostras de água subterrânea. Observa-se que as concentrações são em geral bem baixas com valores inferiores a 70 mg/L de Cl, 40,0 mg/L de SO₄ e 180, mg/L de HCO₃. As setas em vermelho indicam as amostras de água subterrânea dos aquíferos aluvionares que apresentaram em geral as menores concentrações destes ânions. Com relação a distribuição estatística, observa-se que todos os ânions apresentam uma distribuição log-normal.

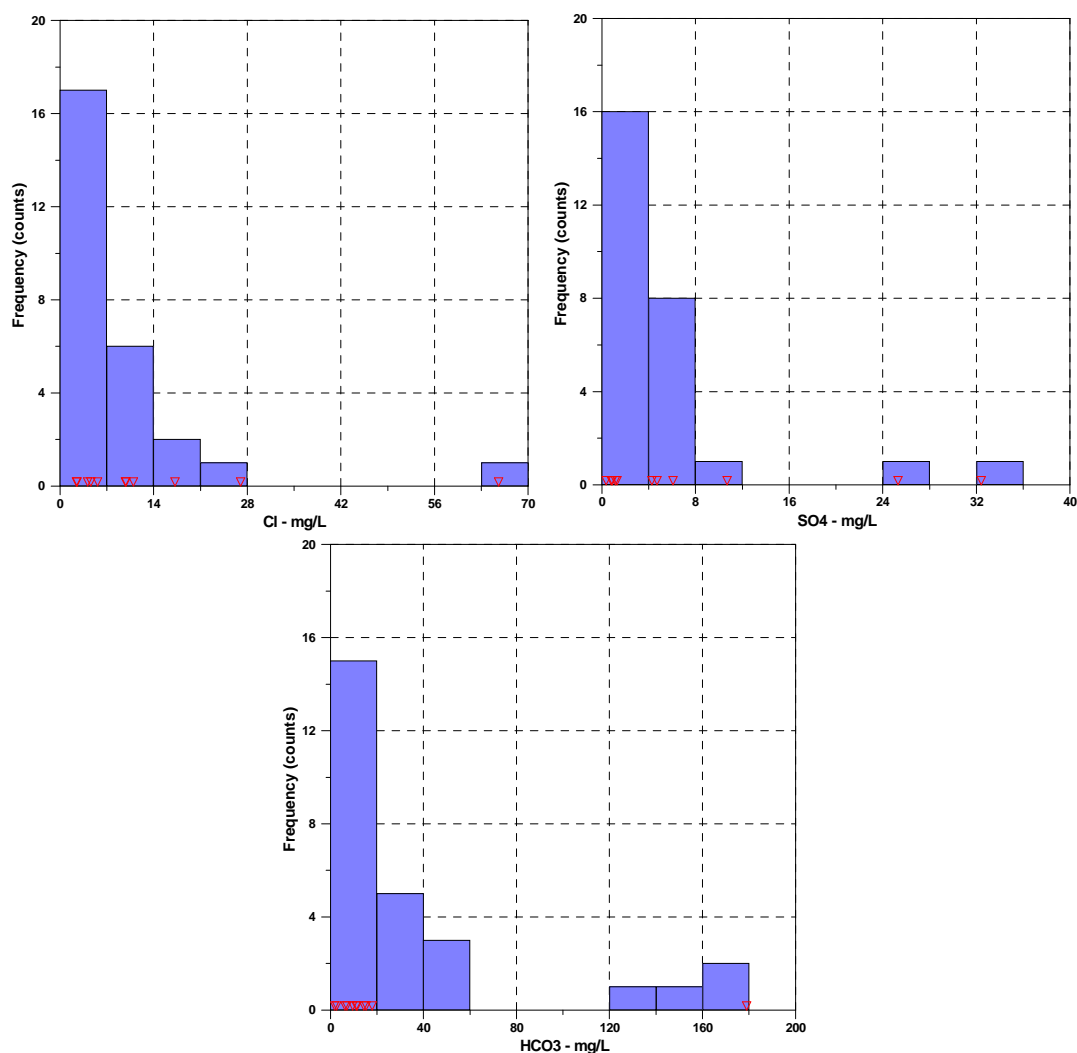


Figura 11 – Histograma de distribuição estatística dos ânions maiores: Cl (cloreto), SO4 (sulfato), HCO3 (bicarbonato).

3.10 – Qualidade da água para consumo humano

Para avaliação da qualidade das águas para consumo humano utilizou-se o padrão da ANVISA da portaria 518 de 2004 do Ministério da Saúde, Brasil (2005) que define o padrão de potabilidade para substâncias que representam risco a saúde humana e padrões de aceitação para consumo humano.

3.10.1 – Substâncias inorgânicas que representam riscos à saúde humana

Das substâncias inorgânicas que representam risco à saúde humana, temos:

- Antimônio Sb – todas as amostras apresentaram concentrações inferiores ao limite de detecção do método < 0,001 mg/L e, portanto, inferior ao limite de potabilidade de 0,005 mg/L;

- Arsênio As - todas as amostras apresentaram concentrações inferiores ao limite de detecção do método $< 0,001$ mg/L e, portanto, inferior ao limite de potabilidade de 0,01 mg/L;
- Bário Ba - todas as amostras apresentaram concentrações inferiores ao limite de potabilidade de 0,7 mg/L, a amostra que apresentou maior concentração foi a do poço DNPM-09 (PA-009) com 0,20 mg/L de Ba;
- Cádmiio Cd - todas as amostras apresentaram concentrações inferiores ao limite de detecção do método $< 0,001$ mg/L e, portanto, inferior ao limite de potabilidade de 0,003 mg/L;
- Chumbo Pb – com exceção da amostra PM-00C que apresentou concentração de 0,13 mg/L de Pb, conforme ilustrado no gráfico da Figura 12, todas as demais amostras apresentaram concentrações inferiores ao limite de potabilidade de 0,01 mg/L de Pb;
- Cobre Cu - todas as amostras apresentaram concentrações inferiores ao limite de potabilidade de 2,0 mg/L, sendo que a amostra que apresentou a maior concentração foi a do poço PM-00C com 0,033 mg/L de Cu;
- Fluoreto F - todas as amostras apresentaram concentrações inferiores ao limite de potabilidade de 1,4 mg/L, sendo que as amostras que apresentaram as maiores concentrações foram as do poço PM-00B e PM-00C com 0,53 e 0,54 mg/L de F respectivamente, conforme histograma da Figura 12. Vale destacar que estas amostras são do aquífero aluvionar da margem direita da bacia do rio Caceribu onde há uma mina de fluorita desativada em Itaboraí, de modo que as rochas nesta porção da bacia tendem a apresentarem maiores concentrações de flúor;
- Mercúrio Hg - todas as amostras apresentaram concentrações inferiores ao limite de detecção do método $< 0,001$ mg/L e, portanto, inferior ao limite de potabilidade de 0,001 mg/L;
- Nitrato NO₃ – com exceção da amostra do DNPM-13 (PA-13), que apresentou uma concentração de 83 mg/L de NO₃, ilustrado na Figura 12, todas as demais amostras apresentaram concentrações inferiores ao limite de potabilidade de 10,0 mg/L de N ou 45 mg/L de NO₃;
- Selenio Se - - todas as amostras apresentaram concentrações iguais ou inferiores ao limite de detecção do método $< 0,001$ mg/L e, portanto, inferior ao limite de potabilidade de 0,01 mg/L;

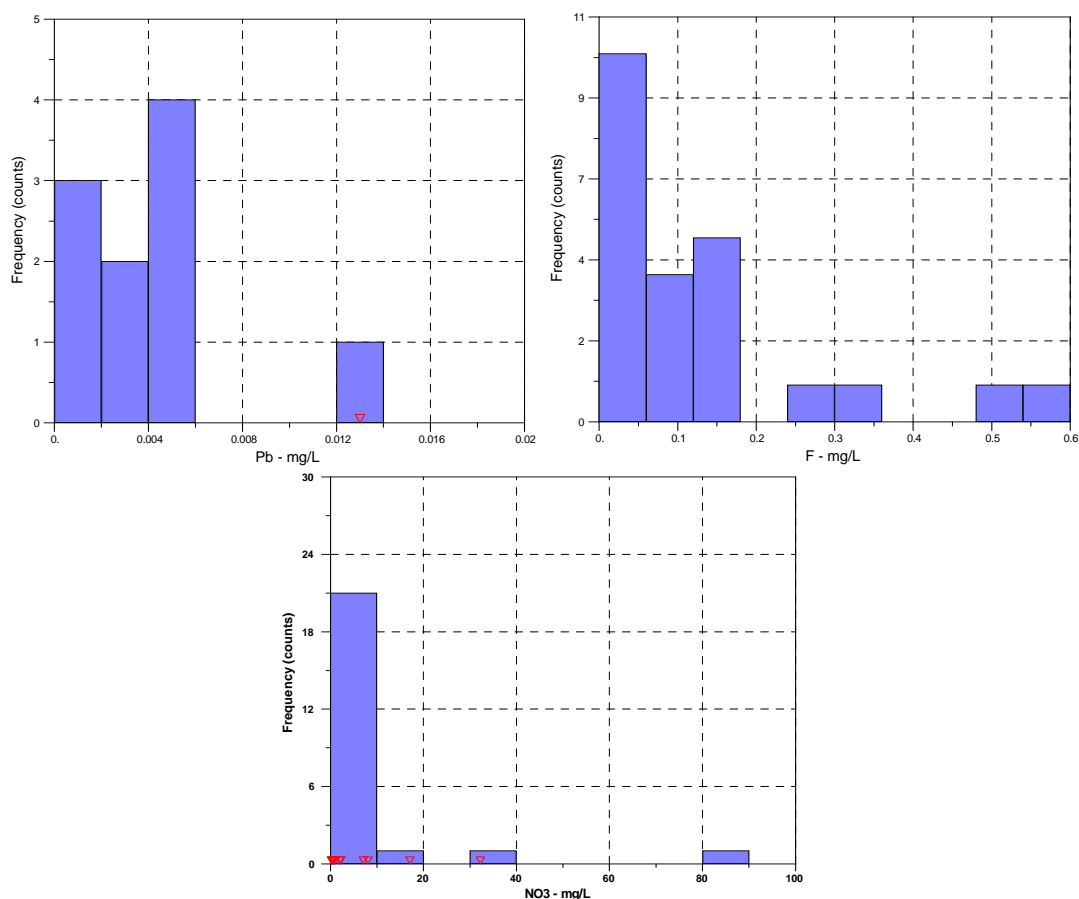


Figura 12 – Distribuição estatística da concentração de Pb (Chumbo), F (Fluor), NO3 (Nitrato) nas amostras de água subterrânea.

3.11 – Origem dos elementos traços a partir da modelagem geoquímica

De modo a entender os processos geoquímicos, minerais que tendem a controlar a presença e concentração dos íons dissolvidos em solução, responsáveis pela qualidade das águas subterrâneas, Foi utilizado o programa PHREEQC Interactive 2.15, desenvolvido pelo USGS (2008) para realizar a especiação e o cálculo dos índices de saturação para os respectivos minerais da base de dados.

3.11.1 – Origem do bário (Ba)

O gráfico da Figura 13 apresenta a variação da concentração de bário (Ba) em relação ao índice de saturação da Barita - $BaSO_4$ (si_Barite) para cada amostra de água subterrânea modelada. Observa-se que o índice de saturação em Barita aumenta exponencialmente com a concentração de Ba dissolvido em água subterrânea, sugerindo que a barita esteja controlando a concentração do bário dissolvido. Segundo Apello e Postma (1999), índices de saturação próximos de zero, entre - 0,5 e + 0,5 indicam que há um equilíbrio geoquímico entre a espécie e o mineral. Deste modo,

podemos postular que o mineral Barita está controlando as concentrações de bário dissolvida maiores que 0,05 mg/L. Considerando a reação de equilíbrio da Barita com o Bário, Equação 1, observamos que a presença de SO₄ em solução pode limitar a dissolução da Barita. De fato, pelo gráfico da Figura 14, observamos que para as amostras em equilíbrio com a Barita (-0,5 < si_Barite < 0,5), quanto maior a concentração de SO₄, menor a concentração de Ba dissolvido. Deste modo, entendemos que a Barita é a provável fonte de bário das águas subterrâneas, entretanto, a concentração de sulfato preexistente limita a dissolução da Barita, limitando a concentração de Ba dissolvido.

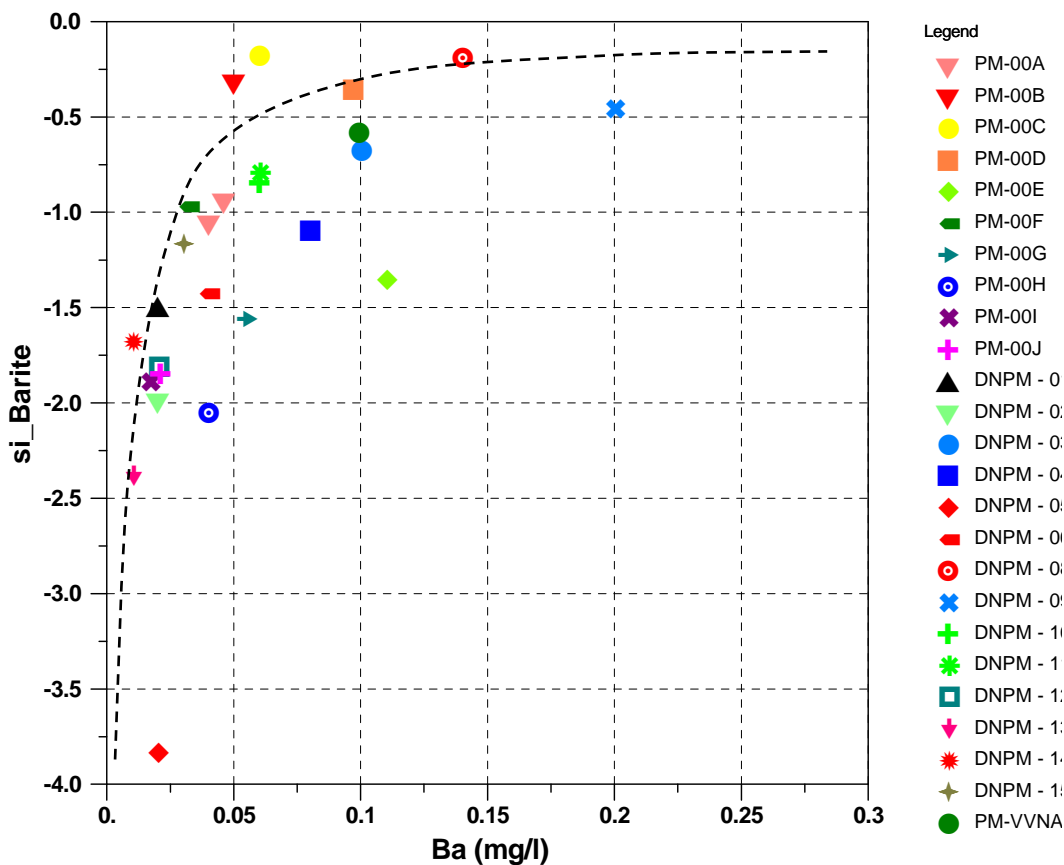


Figura 13 – Gráfico da concentração de bário (Ba) em relação ao índice de saturação da Barita (si_Barite) para cada amostra de água subterrânea modelada.

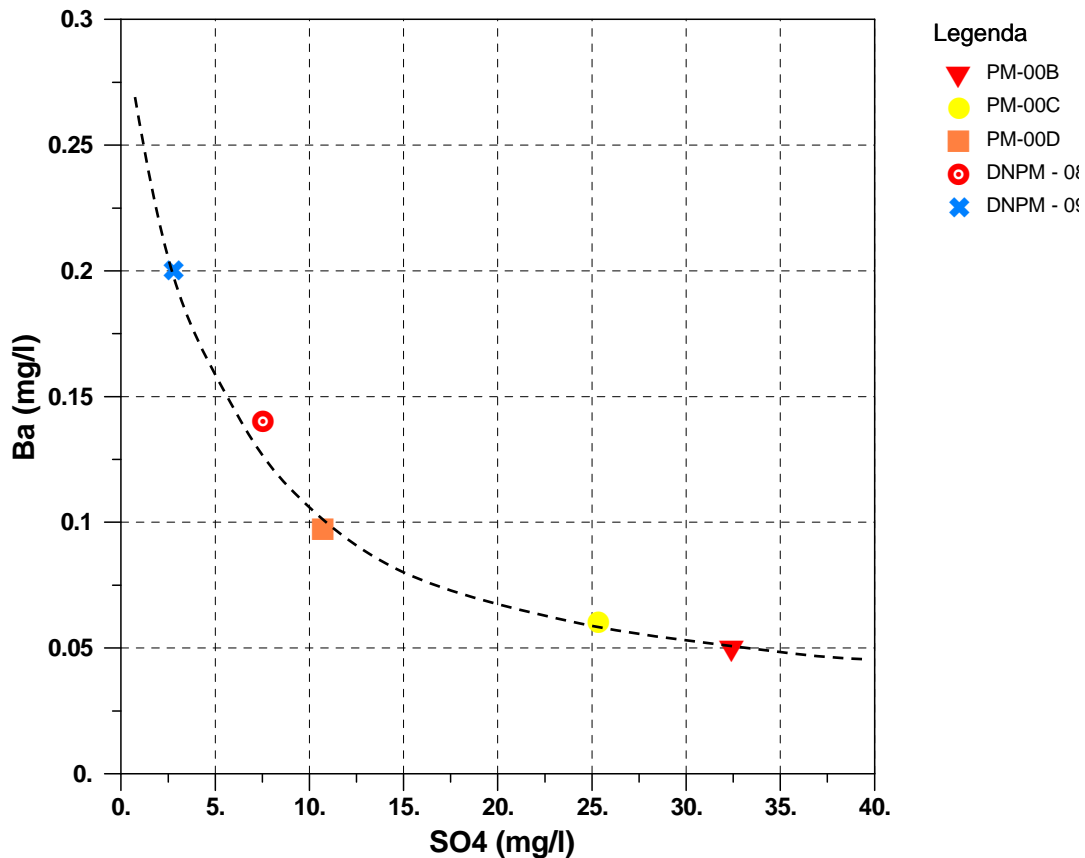


Figura 14 – Gráfico da concentração de bário (Ba) versus sulfato (SO₄), para as amostras em equilíbrio com a Barita (-0,5 < si_Barite < 0,5).

3.11.2 – Origem do flúor (F)

O gráfico da Figura 15 apresenta a variação da concentração de flúor (F) em relação ao índice de saturação da Fluorita - CaF₂ (si_Fluorita) para cada amostra de água subterrânea modelada. Observa-se que o índice de saturação em Fluorita aumenta exponencialmente com a concentração de F dissolvido em água subterrânea, sugerindo que a fluorita esteja controlando a concentração do flúor dissolvido. Apesar dos baixos valores do índice de saturação da Fluorita, inferiores a -2,0, indicando que as águas não estão em equilíbrio geoquímico com este mineral, observa-se que o índice de saturação possui uma boa correlação com a concentração. Provavelmente a concentração de cálcio (Ca) na água está limitando o equilíbrio da Fluorita com o flúor na água subterrânea, pois a tendência natural é a reação de dissolução da calcita até o equilíbrio, entretanto, a presença de uma concentração de cálcio dissolvido na água subterrânea pode limitar o equilíbrio conforme apresentado na Equação 2. De fato, pelo gráfico da Figura 16, observamos que para as amostras que apresentaram os maiores valores de saturação com a Fluorita, quanto maior a concentração de Ca, menor a concentração de F dissolvido, com exceção da amostra do PM-00B que apresentou concentrações elevadas de Ca e F. Deste modo, entendemos que a Fluorita é a provável fonte de

flúor das águas subterrâneas, entretanto, a concentração de cálcio preexistente limita a dissolução da Fluorita, limitando a concentração de F dissolvido, conforme a reação da Equação 2.

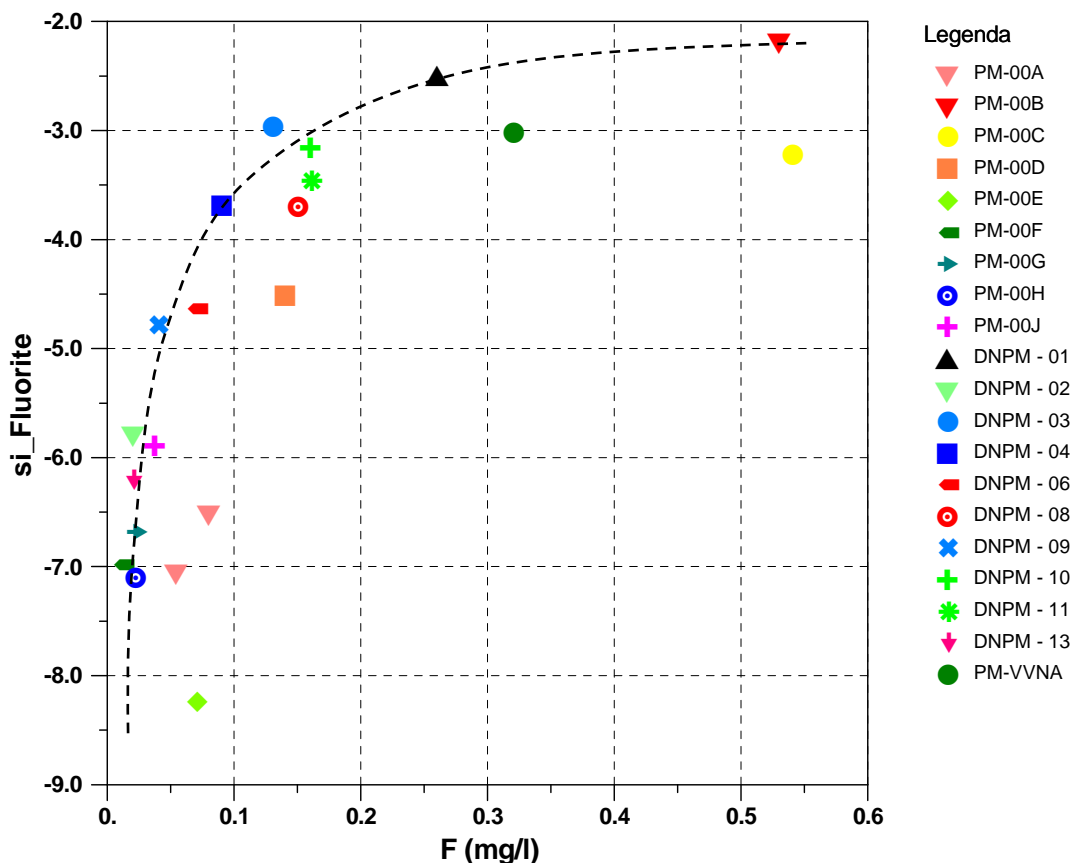


Figura 15 – Gráfico da concentração de Flúor (F) em relação ao índice de saturação da Fluorita (si_Fluorite) para cada amostra de água subterrânea modelada.

Uma análise mais detalhada dos índices de saturação dos minerais de cálcio Calcita, Aragonita, Dolomita, Gesso e Anidrita, na amostra do PM-00B revelaram que os índices de saturação da Anidrita e do Gesso para esta amostra são mais elevados que nas demais amostras. Deste modo parte da concentração de cálcio dissolvido está em equilíbrio geoquímico com a Anidrita e o Gesso, diminuindo a sua influencia na reação da Equação 2, explicando a exceção observada.

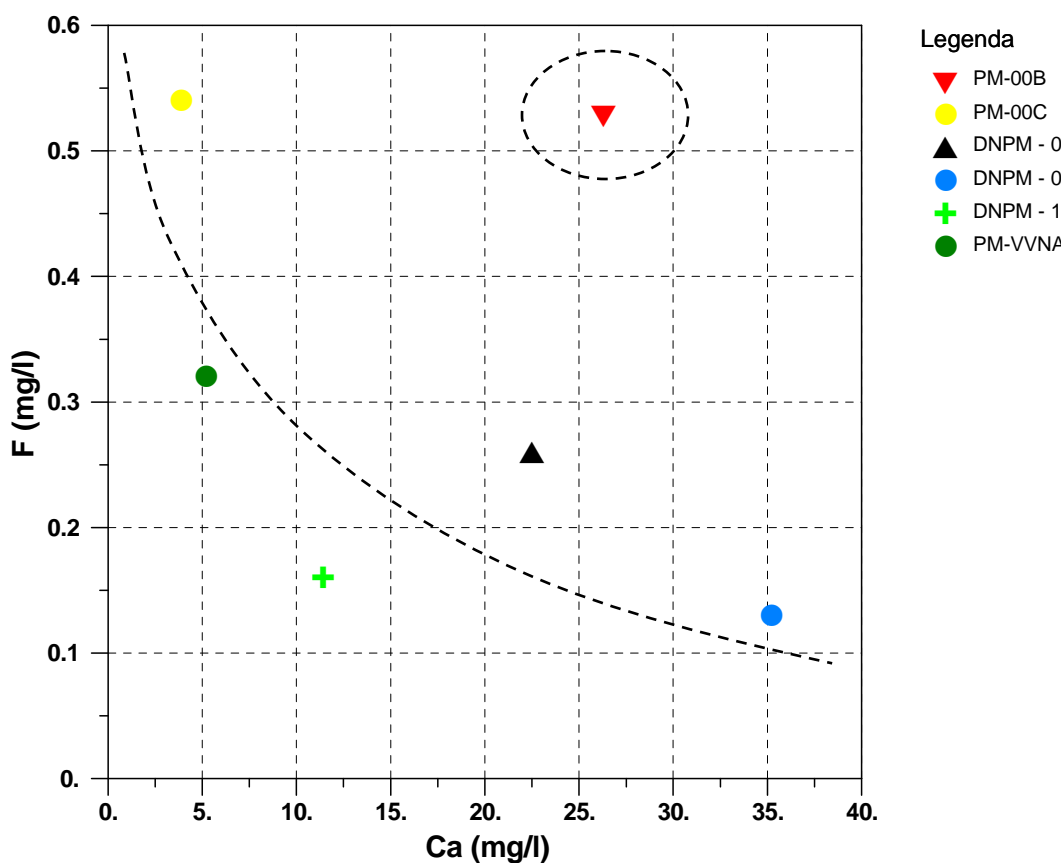


Figura 16 – Gráfico da concentração de Cálcio (Ca) em relação ao índice de saturação da Fluorita (si_Fluorite) para cada amostra de água subterrânea modelada.

4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As águas subterrâneas apresentam grande variação no pH de modo que as águas com pH mais baixo são dos aquíferos aluvionares e as águas com pH mais próximo do neutro são dos aquíferos mais profundos e com maior interação com a rocha e respectivos minerais. Em geral as águas subterrâneas apresentam baixa condutividade elétrica e portanto baixa salinidade com TDS (total de sólidos dissolvidos) médio inferior a 150 mg/L. A existência de várias captações de água mineral na região ilustra a boa qualidade química das águas subterrâneas.

A classificação iônica das águas subterrâneas indica que os ânions principais apresentam-se na seguinte ordem $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ e os cátions principais apresentam-se na seguinte ordem $\text{Na}+\text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$.

A avaliação da qualidade das águas subterrâneas para o consumo humano indicou que praticamente todas as águas são próprias ao consumo, considerando as substâncias que representam risco a saúde humana. As exceções foram as amostras dos poços PM-00C com 0,13 mg/L de Pb e no poço PA-13 com 83 mg/L de NO_3 .

A modelagem geoquímica utilizando o programa PHREEQC permitiu um melhor entendimento da ocorrência e concentração dos elementos traço nas águas subterrâneas, bem como sua relação com os elementos maiores Ca e SO₄.

Tendo em vista a facilidade atual de acesso a programas de modelagem geoquímica livres, recomenda-se a sua utilização no dia a dia de modo a melhor caracterizar a química das águas subterrâneas e facilitar o entendimento do comportamento dos elementos traços identificados e sua relação com os elementos maiores.

5 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto Macacu “Planejamento Estratégico da Região Hidrográfica dos Rios Guapi-Macacu e Caceribu-Macacu”, realizado através do Programa PETROBRAS Ambiental.

6 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPELO, C.A.J & Postma, D. 1999. Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam, Balkema, p. 536.

BRASIL 2005. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Portaria MS n.º 518/2004 / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Coordenação- Geral de Vigilância em Saúde Ambiental – Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2005. 28 p. – (Série E. Legislação em Saúde) ISBN 85-334-0935-4. (http://e-legis.anvisa.gov.br/leisref/public/showAct.php?mode=PRINT_VERSION&id=22322).

SIGHIDRO (2008). Banco de Dados das Fontes Hidrominerais do Brasil, DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, <https://sistemas.dnpm.gov.br/sighidro>.

USGS 2008. PHREEQC Interactive, version 2.15.0.2697, released February, 5, 2008. United States of Geologic Survey software <http://water.usgs.gov/software>.

WHI (2000). AquaChem V. 3.4., Waterloo Hydrogeologic Inc, Canadá.