

# ÁGUAS DA FORMAÇÃO AÇU

Ivan Edilberto Mendes Teixeira<sup>1</sup>

**Resumo** - A Formação Açú é uma unidade litoestratigráfica da Bacia Potiguar, que está situada no extremo nordeste do Brasil. Boa parte dos reservatórios desta unidade são portadores de água de baixa salinidade, amplamente explorados para consumo humano e irrigação.

Estudos hidrogeológicos desenvolvidos na região atestam a ocorrência de fluxo hidrodinâmico subterrâneo nesta unidade que, especialmente na porção média inferior, é constituída por espessos pacotes arenosos de excelente permeabilidade, que a caracterizam como o melhor sistema aquífero da Bacia.

Este fluxo é responsável pelo contato óleo/água inclinado, característico das diversas acumulações de hidrocarbonetos descobertas em seus reservatórios, algumas com adiantado estágio de biodegradação. O aporte de água se dá a partir da área de recarga, associada à superfície de afloramento localizada na borda da Bacia, ou via drenança vertical descendente de águas de unidades estratigráficas sotopostas, especialmente a Formação Jandaíra.

As análises de diagramas hidroquímicos e de razões entre componentes iônicos atestam a procedência continental das águas da Formação Açú. Este estudo tenta definir um zoneamento para as águas da Formação Açú, com base na interpretação hidroquímica, incluindo o comportamento da salinidade, e nas características hidrodinâmicas da formação, inclusive na relação regional entre a sua carga hidráulica e aquela da Formação Jandaíra.

**Abstract** - The Açú Formation belongs to the Potiguar Basin, located at Brazil's far northeast region. The reservoirs, most of them fulfilled with fresh water, are widely exploited to the human or even agricultural use.

Hydrogeological studies developed at the region attest the occurrence of hydrodynamic flow, specially at the meddle basal portion, where this formation is characterized by thick sandy sequences that make it the best aquifer system inside the basin.

The subsurface water flow is answerable for the tilted water-oil contact observed all over the Açú Formation oil accumulations, some of them bearing oil in a high biodegradation phase. The main recharge area is that associated with the formation outcrop, placed at the Potiguar Basin border,

---

<sup>1</sup> Geólogo, PETROBRAS/UN-RNCE/ATEX/AAG  
Av. Euzébio Rocha 1000, Bl. F, Sala22, 59.064-100/Nazaré/Natal-RN; ivanmt@petrobras.com.br, iemt@eol.com.br

followed by recharge due to the vertical descendent water flow from overlapping stratigraphic units, specially from the Jandaíra Formation.

The interpretation of hydrochemical diagrams and ionic ratios testify a continental origin to the water stored in the Açú Formation. This study is a attempt to define a zoning to the Açú Formation waters, based on hydrochemical interpretations, including the water salinization pattern, and on the hydrodynamic mapping, including that observed in the regional relationship between the hydraulic heads of the Açú and Jandaíra formations.

**Palavras-chave:** Hidroquímica; Açú; Potiguar.

## INTRODUÇÃO

A Bacia Potiguar está localizada quase que totalmente no Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1), somente uma pequena parte recobre a região litorânea do estado do Ceará. Estende-se desde o continente até a isóbata de 2.000 m, cobrindo uma área total de 48.000 km<sup>2</sup>, aproximadamente, sendo 21.500 km<sup>2</sup> correspondentes à parte emersa.

Segundo Soares[1], “o arcabouço estrutural da Bacia Potiguar é constituído basicamente de quatro feições morfo-estruturais, relacionadas com os grandes eventos que afetaram a mesma: grabens e altos internos, relacionados às fases de estiramento crustal (fase rift), e plataformas rasas do embasamento e talude, relacionadas à fase de deriva continental”.



Figura 1. Mapa de localização de Bacia Potiguar

Na Figura 2, adaptada de Cremonini et al.[2], estão representadas estas grandes feições e identificadas as suas subdivisões, três das quais de suma importância no zoneamento hidroquímico apresentado neste trabalho, os altos estruturais de Quixaba, Serra do Carmo e Macaú.

A Formação Açú tem área de ocorrência em toda a Bacia, constituindo-se em uma seqüência transgressiva de idade albo-cenomaniana, segundo Bertani et al.[3]. Informalmente, da base para o topo, Vasconcelos et al.[4] dividiram esta formação em quatro unidades: Açú 1, Açú 2, Açú 3 e Açú 4, relacionadas ao sistema deposicional predominante. Composta basicamente por intercalações de folhelhos, siltitos e arenitos, estes últimos por vezes sob a forma de espessos pacotes, especialmente

nas unidades Açú 2 e Açú 3 que, em grande parte têm seus reservatórios preenchidos por água de baixa salinidade.

Face à sua extensão e potencialidade, a unidade Açú 2 desempenha importante papel no suprimento de água subterrânea na região, tanto para o abastecimento público quanto para fins agrícolas e industriais, sendo reconhecidamente o principal sistema aquífero da Bacia Potiguar.

Igualmente importante e reconhecida é a capacidade de acumulação e produção de óleo dos reservatórios da Formação Açú. Campos de óleo estão distribuídos em boa parte de sua área de ocorrência, associados às águas de baixa salinidade e sob o efeito de fluxo hidrodinâmico, o que lhes confere contatos óleo/água inclinados. A avaliação hidrodinâmica, realizada com o apoio de mapas de superfície potenciométrica[5], tal como apresentado na Figura 3[6], tem sido usada rotineiramente como ferramenta auxiliar na prospecção de petróleo destes reservatórios.

Os pontos identificados nesta figura correspondem aos poços de cujos testes, de formação ou de produção, foram obtidos os valores de pressão e de nível estático, que foram usados para o cálculo dos valores de potenciometria que

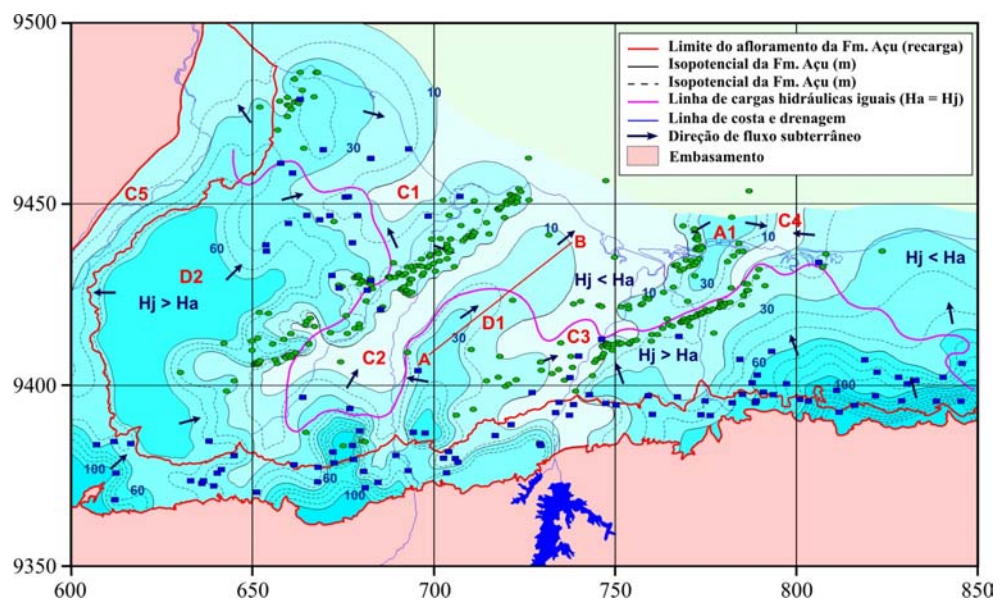


Figura 3. Mapa de Superfície Potenciométrica da Formação Açú

estão contornados no mapa. Os dados de poços de captação de água pertencentes a particulares, retirados do relatório do IPT[7], foram fundamentais para o melhor controle no contorno das isotenciais.

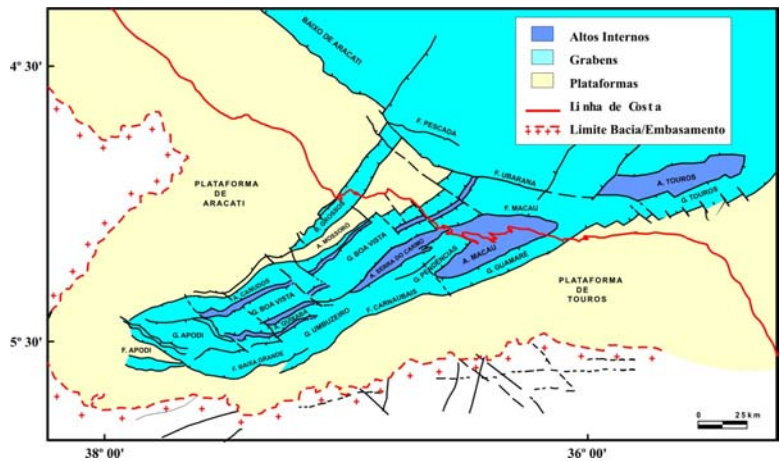


Figura 2. Arcabouço Tectônico da Bacia Potiguar

Como parte de uma bacia hidrodinamicamente matura, o fluxo subterrâneo na Formação Açú é centrípeto, a recarga de água para seus reservatórios se dá através do seu afloramento, da infiltração de águas nos aluviões dos rios e da drenança vertical descendente de águas da Formação Jandaíra. O volume total de água infiltrada, segundo dados do IPT, é de cerca de  $20,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  por ano. O fluxo hidrodinâmico na Fm. Açú é centrípeto, conforme indicado pela setas, no sentido das calhas potenciométricas associadas ao baixo de Grossos(C1), grabens de Apodí e de Boa Vista (C2), grabens de Umbuzeiro e de Pendências (C3) e graben de Guamaré (C4). A área de descarga principal está situada no sentido do mar, vindo em segundo plano os vales dos rios e lagoas, estes atingidos por drenança vertical ascendente, inclusive através da Fm. Jandaíra. Grande volume de água é escoado artificialmente para os poços que exploram o potencial hídrico, causando uma deficiência no balanço hídrico que já em 1982, segundo o relatório do IPT, era da ordem de  $13,8 \times 10^6 \text{ m}^3$  de água por ano.

Três aspectos, identificados no mapa da Figura 3, foram de suma importância para o zoneamento hidroquímico da Formação Açú, a saber: relações entre as cargas hidráulicas das formações Açú e Jandaíra, o divisor de águas associado aos altos estruturais de Quixaba e de Serra do Carmo e o alto potenciométrico associado ao alto estrutural de Macau.

As relações entre cargas hidráulicas porque limitam áreas na direção geral Norte-Sul, separando o grupo composto pelas áreas hidroquímicas 2 e 3, caracterizadas por uma influência maior de íons alcalinos-terrosos, daquele formado pelas áreas 1, 4, e 5, onde é definitivo o domínio de íons alcalinos. Este limite é representado pela linha de igualdade entre as cargas hidráulicas das formações Açú e Jandaíra ( $H_a = H_j$ ), conforme evidenciado na figura, separando as regiões onde ocorre a drenança vertical descendente daquelas onde desenvolve-se a drenança vertical ascendente.

O divisor de águas correspondente ao altos estruturais de Serra de Quixaba e de Serra do Carmo (D1), com eixo aproximado representado pelo segmento A-B do mapa, porque reparte a Bacia em duas regiões, na direção geral Leste-Oeste. A primeira, composta pelas áreas hidroquímicas 1 e 2, é caracterizada por reservatórios com excelente permo-porosidade, com fluxo hidrodinâmico franco, diminuindo o tempo de residência das águas e contribuindo para a baixa concentração iônica nas mesmas. A segunda, constituída pelas áreas hidroquímicas 3, 4 e 5, é caracterizada por reservatórios mais argilosos, menos permo-porosos, onde o tempo de residência das águas é prolongado, facilitando as trocas iônicas rocha/fluido e o conseqüente aumento na concentração iônica.

O alto potenciométrico associado ao alto estrutural de Macau (A1) porque é fator determinante na ocorrência da área hidroquímica 4, visto que desloca águas salinizadas no sentido do continente, modificando as razões iônicas, em um ao contra-fluxo que, também, é responsável pelo

maior tempo de residência da água na área 2. As águas infiltradas na plataforma de Aracatí (D2) são divididas, indo uma parte para os grabens de Apodí e de Boa Vista e outra parte para o vale do rio Jaguaribe (C5).

Neste trabalho buscamos a caracterização hidroquímica da Formação Açú, utilizando registros de análises de águas recuperadas em testes de formação por tubulação ou em operações de produção. Utilizamos dados obtidos de intervalos associados ou não à produção de óleo, inclusive de poços particulares, visando dar um caráter mais regional ao mesmo.

## TRATAMENTO DAS ANÁLISES QUÍMICAS

As registros hidroquímicos foram incluídos no banco de dados do Sistema Hidro e analisados através dos vários aplicativos nele contidos. Na Tabela 1 são apresentadas as diversas fases de avaliação e os correspondentes números de registros restantes, após a eliminação dos dados espúrios em cada uma das fases de avaliação. O percentual eliminado em cada uma delas está apresentado na última coluna. Observe-se que o número final de registros considerados válidos para a avaliação hidroquímica (162), corresponde a 7,2% do número inicial de análises disponíveis.

<b>Fase de Avaliação</b>	<b>Número de Registros</b>	<b>Percentual Eliminado</b>
Seleção inicial de dados da Formação Açú	2242	0,0
Aplicação do balanço iônico variável	440	80,4
Submissão ao sistema de classificação de Sulin	278	7,2
Utilização da razão iônica Magnésio/Cálcio	246	1,4
Uso da razão iônica Cloretos/Bicarbonato	210	1,6
Emprego da razão iônica Alcalinos-Terrosos/Alcalinos	200	0,5
Avaliação dos dados de salinidade	174	1,2
Análise do diagrama de Stiff	162	0,5

Tabela 1. Número avaliado de análises de águas da Formação Açú.

O baixo percentual aproveitável está associado ao estilo de teste de formação normalmente usados na exploração de petróleo. Entretanto, este percentual está acima da média nacional da empresa, situada entre 4% e 5%, devido às amostragens especiais realizadas através do Programa de Amostragem de Água Associada ao Óleo (PASSO) e do Programa de Amostragem em Poços Produtores de Água (PAPPA), assim como também à padronização implantada na região para os

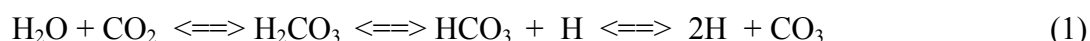
procedimentos de coleta, amostragem e transporte até o laboratório que, por sua vez, passou a usar procedimentos mais modernos, via computação, para validação dos resultados das análises.

Após a análise via Sistema Hidro, em ambiente “main-frame”, os dados foram transferidos para o ambiente de microcomputador e então gerados gráficos e mapas, através dos aplicativos Quattro Pro<sup>®</sup> e Corel Draw<sup>®</sup>, e realizada análise estatística, por meio do pacote SAS<sup>®</sup>.

## PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS BÁSICAS

### Potencial hidrogeniônico

O pH das águas associadas a hidrocarbonetos é normalmente controlado pelo sistema CO<sub>2</sub>/HCO<sub>3</sub>. Conforme também apresentado na Figura 4, representativa do comportamento do PH na Fm. Açú, a condição de equilíbrio é dada pela Equação 1. As medições mais confiáveis de pH para as águas da Formação Açú indicam valores entre 6,5 e 7,5. Estas foram realizadas na boca do poço, em amostras coletadas de aquíferos das Áreas 1 e 2.



Note-se a diferença no comportamento da concentração em íons Carbonato e Bicarbonato para as águas das Áreas 1 e 2 em relação às Áreas 3 e 4. Tal como as duas primeiras áreas, as duas últimas formam um conjunto interconectado, mas cada conjunto encontra-se separado fisicamente do outro por altos estruturais centrais da Bacia Potiguar, os altos de Quixaba e de Serra do Carmo. A expressiva diferenciação na concentração destes íons está intimamente ligada ao zoneamento definido neste trabalho.

Boa parte dos valores de pH registrados na Figura 4 deve estar superestimada em relação àqueles naturais da água da formação, devido à decomposição do íon HCO<sub>3</sub> em íon CO<sub>3</sub>, ocorrida naturalmente quando do transporte e estocagem da amostra até a medição no laboratório, naqueles casos em que não foi feita a preservação exigida e/ou nos casos em que houve um excessivo tempo ente a coleta e a análise.

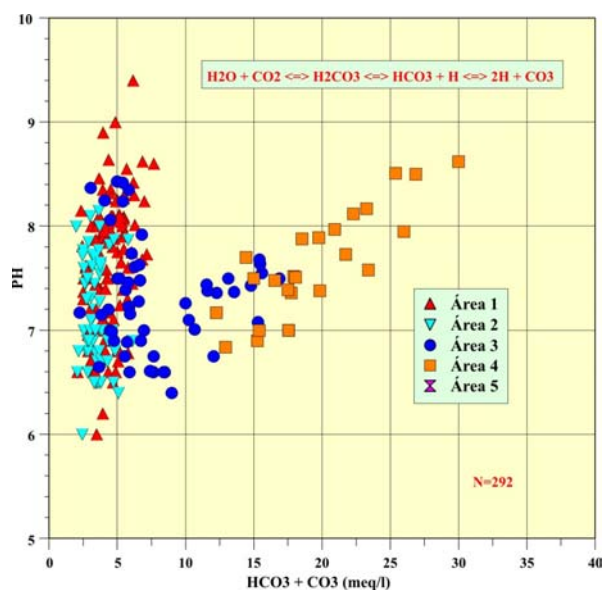


Figura 4. pH versus (HCO<sub>3</sub> + CO<sub>3</sub>)



## Densidade

A Figura 5 representa a relação entre a densidade e o Total de Sólidos Dissolvidos (TSD) para as águas da Formação Açú. Nota-se sutil incremento da densidade, coerente com o aumento do TSD que, por sua vez, advém do aprofundamento e salinização das águas.

Em média, os menores valores de densidade são aqueles relacionados às áreas hidroquímicas 1 e 2, enquanto que os maiores são oriundos das áreas 3 e 4. Também esta diferenciação está associada ao zoneamento hidroquímico proposto.

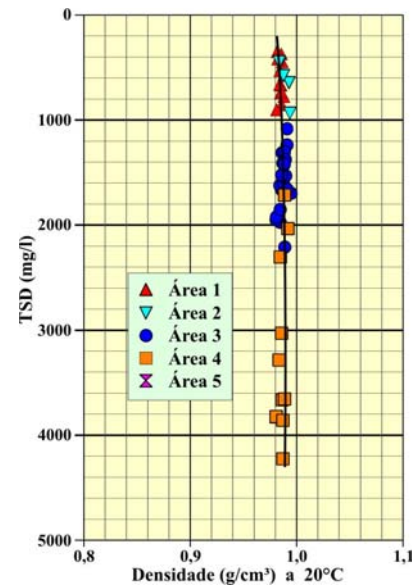


Figura 5. Densidade versus TSD

## Resistividade

Os valores de salinidade apresentados na Figura 6 são resultantes de cálculos baseados nas medições de resistividade da água, através da Equação 2:

Observe-se a grande variação de valores de resistividade relacionada aos baixos valores de salinidade das áreas hidroquímicas 1 e 2, onde o fluxo hidrodinâmico é mais franco.

Nas áreas 3 e 4, de modo coerente com a salinização, foram registrados os menores valores de resistividade para as águas da Formação Açú.

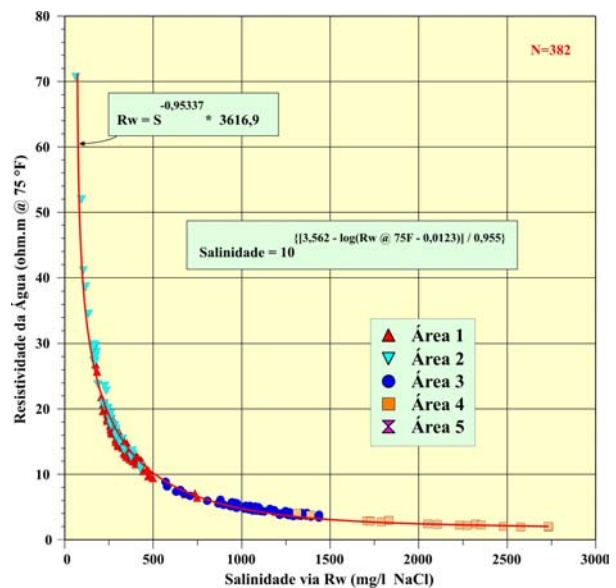


Figura 6. Salinidade versus Resistividade

$$\text{Salinidade: } 10^{\{[3,562 - \log(Rw @ 75^\circ\text{F} - 0,0123)] / 0,955\}}$$

(2)

## Salinidade

Na Área hidroquímica 1 ocorre o mais regular comportamento da salinidade de toda a Formação Açú. Os valores de salinidade situam-se abaixo de 200 mg/l NaCl, seja qual for a unidade da Formação Açú, conforme pode ser observado na Figura 7.

A distribuição regular de baixos valores deve-se ao fato de que, nesta área, não ocorre contribuição direta de águas da Formação Jandaíra, já que o fluxo interformacional é caracterizado pela drenança vertical ascendente de águas da Formação Açú para a Formação Jandaíra. No entanto, observando-se a curva de ajuste da figura, nota-se uma ligeira inversão de salinidade que está relacionada a passagem dessas águas pela Área 2, que recebe influência de águas salinizadas da Formação Jandaíra nos horizontes mais rasos.

A homogeneidade e os baixos valores também são fortemente favorecidos pelo fluxo hidrodinâmico franco instalado nesta área, que engloba a região em que a carga hidráulica da Formação Açú é maior do que aquela da Formação Jandaíra e que está localizada a oeste dos altos estruturais de Quixaba e Serra do Carmo, incluindo o Graben de Boa Vista, o baixo de Grossos e partes do Alto de Mossoró e da Plataforma de Aracati.

A salinidade na área hidroquímica 2 sofre o efeito da drenança vertical descendente de águas da Formação Jandaíra para a Formação Açú. Este efeito, visualizado na Figura 8, faz com que águas doces infiltradas na área de recarga atinjam valores de salinidade superiores a 250 mg/l, além do que seria normal com o aprofundamento, nos horizontes próximos à interface com a Formação Jandaíra.

Com o aprofundamento dos reservatórios e com o fluxo no sentido de horizontes mais profundos, a salinidade tende a ajustar-se ao padrão da unidade Açú 2, onde estão localizados os aquíferos mais potentes. O

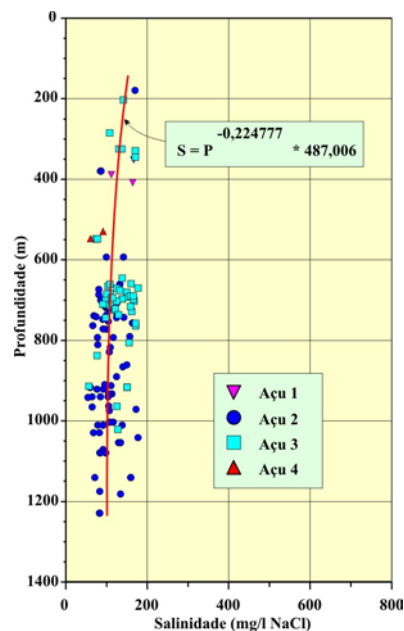


Figura 7. Salinidade vs Profundidade na Área hidroquímica 1

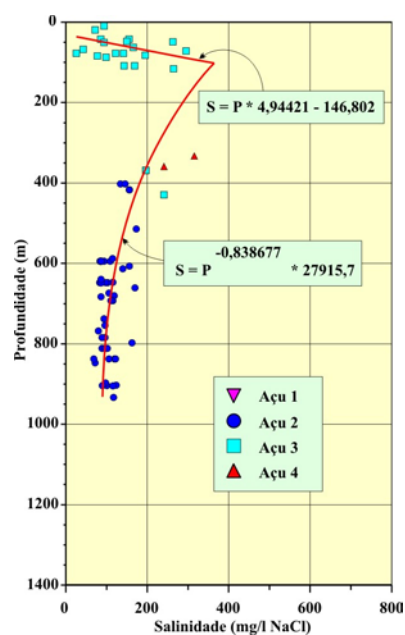


Figura 8. Salinidade vs Profundidade na Área hidroquímica 2



rápido ajuste para salinidade mais baixas, inferiores a 100 mg/l, semelhantes aos da unidade Açú 2 da Área 1, é favorecido pelo fluxo hidrodinâmico franco instalado nesta área, que engloba a região em que a carga hidráulica da Formação Açú é menor do que aquela da Formação Jandaíra e que está localizada a oeste do alto estrutural de Quixaba, incluindo o Graben de Algodões e as partes iniciais do Graben de Boa Vista e da Plataforma de Aracati.

O comportamento da salinidade na Área hidroquímica 3, apresentado na Figura 9, até certo ponto é semelhante ao da Área 2, já que ambas estão sob efeito de drenança vertical descendente de águas da Formação Jandaíra para a Formação Açú. As diferenças observadas residem nos maiores valores de salinidade das águas da Área 3, independente de que unidade se tome como exemplo, e na maior dificuldade de ajuste ao padrão de baixas salinidades observado nas áreas 1 e 2, mesmo para os aquíferos mais potentes da unidade Açú 2 da Formação Açú. Estas diferenças são causadas pelo maior tempo de residência das

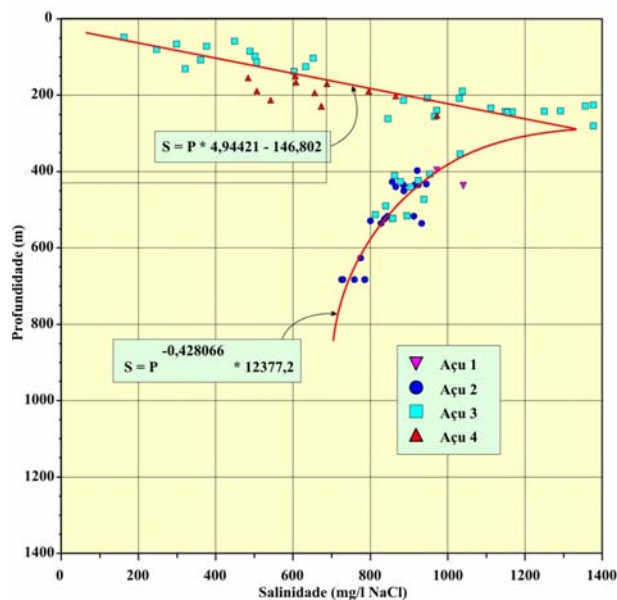


Figura 9. Salinidade vs Profundidade, Área 3

águas, que facilita a troca iônica entre rocha e fluido nesta. Por seu turno, o maior tempo de residência está associado às piores condições de permo-porosidade dos reservatórios localizados a leste dos altos estruturais de Quixaba e de Serra do Carmo, e também ao contra-fluxo instalado na Área Hidroquímica 3, região de descarga natural das águas infiltradas na Área 2.

De qualquer modo, também de modo semelhante ao que ocorre na Área 2, com o distanciamento dos reservatórios em relação à Formação Jandaíra ocorre uma inversão de salinidade, que passa de valores próximos a 1400 mg/l, nos horizontes mais rasos, para registros em torno de 700 mg/l nos aquíferos mais profundos, associados à unidade Açú 2 da Formação Açú.

A Área hidroquímica 4 está quase que totalmente circunscrita ao Alto Estrutural de Macau, que está situado a leste do Alto Estrutural de Serra do Carmo, encaixado entre os grabens de Pendências e de Guamaré. Nesta área ocorrem as águas mais salinizadas da Formação Açú, conforme está apontado na Figura 10, chegando a atingir valor máximo próximo a 1700 mg/l, nos registros disponíveis até o momento.

Tal comportamento se deve não somente ao aprofundamento dos aquíferos, mas também devido ao fato de serem águas previamente salinizadas na Área 3, devido aos motivos já expostos e, especialmente, por estas águas estarem sob forte influência da expulsão de águas de pelitos de fácies

distais da Formação Açú ou mesmo do “Canyon” de Ubarana, um pacote de folhelhos com espessuras registradas superiores a 900m, ambos situados no domínio marinho da Bacia. Estas águas do domínio marinho são deslocadas em contra-fluxo em direção ao continente, configurando um Alto Potenciométrico bem definido associado ao Alto Estrutural de Macau.

As águas que atravessam a Área 3, endurecidas pelo ganho em Cálcio e Magnésio, são severamente abrandadas na Área 4, com a perda destes íons e crescimento nas concentrações de Sódio que, ligado ao Cloro, responde pelo crescente e constante aumento da salinidade. Dentre todas, esta é a única área com comportamento normal de salinização das águas de acordo com o aprofundamento dos reservatórios.

Na área 4 a carga hidráulica da Formação Açú (Ha) é maior do que aquela da Formação Jandaíra (Hj), resultando em drenança vertical ascendente ligada a região de descarga.

O comportamento geral da salinidade das águas da Formação Açú pode ser observado na Figura 11. Fica evidente a diferença no grau de salinização das águas áreas hidroquímicas 1 e 2, situadas a oeste do divisor de águas associado aos altos estruturais de Quixaba e de Serra do Carmo, em relação às áreas 3 e 4, situadas a leste deste divisor, ainda que, nas duas regiões, sejam idênticos os processos básicos de salinização e de ajuste, por inversão do gradiente de salinização, aos baixos valores dos aquíferos mais potentes, situados na unidade Açú 2.

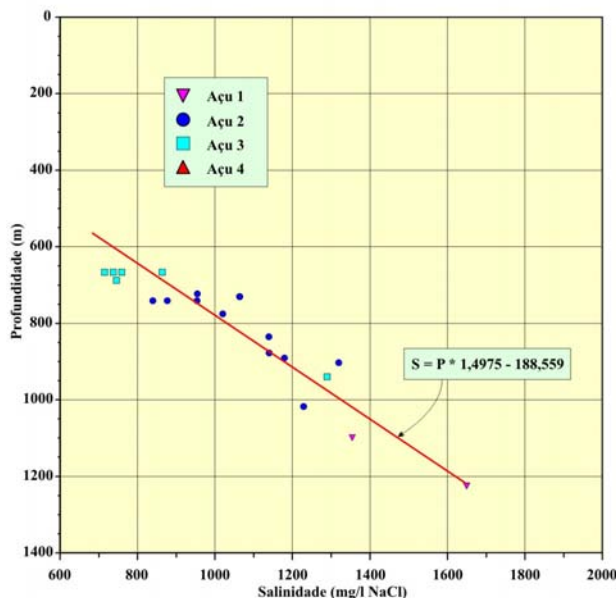


Figura 10. Salinidade vs Profundidade, Área 4

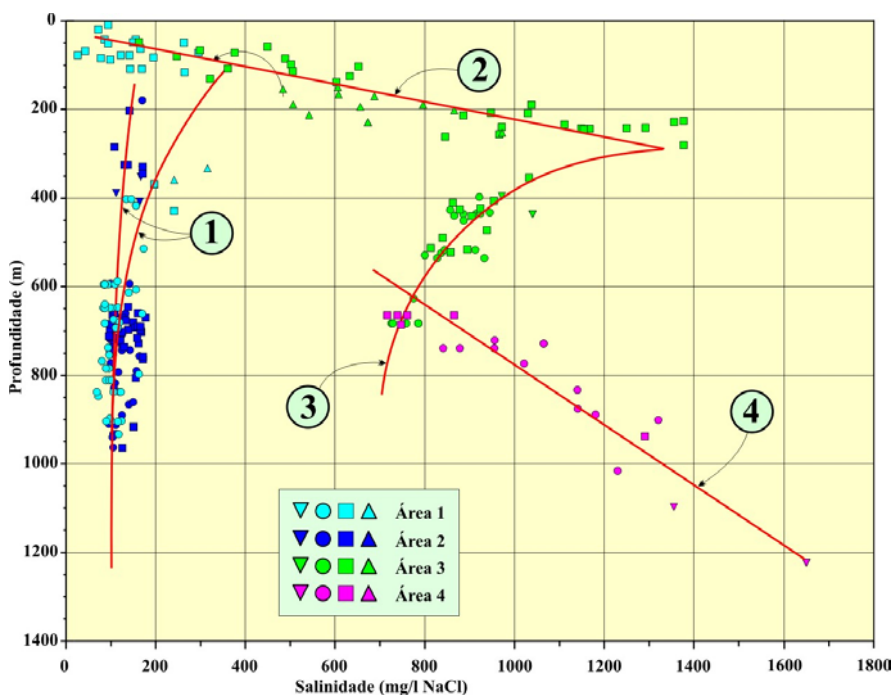


Figura 11. Salinidade versus Profundidade, Formação Açú

## Mapa de salinidade

Os pontos plotados na Figura 12, estão relacionados aos poços com registros confiáveis de salinidade para a Formação Açú. Observa-se que em grande parte da Bacia Potiguar, a água da Formação Açú tem valor de salinidade abaixo do limite máximo tolerado para as águas potáveis, que é igual a 500 mg/l NaCl.

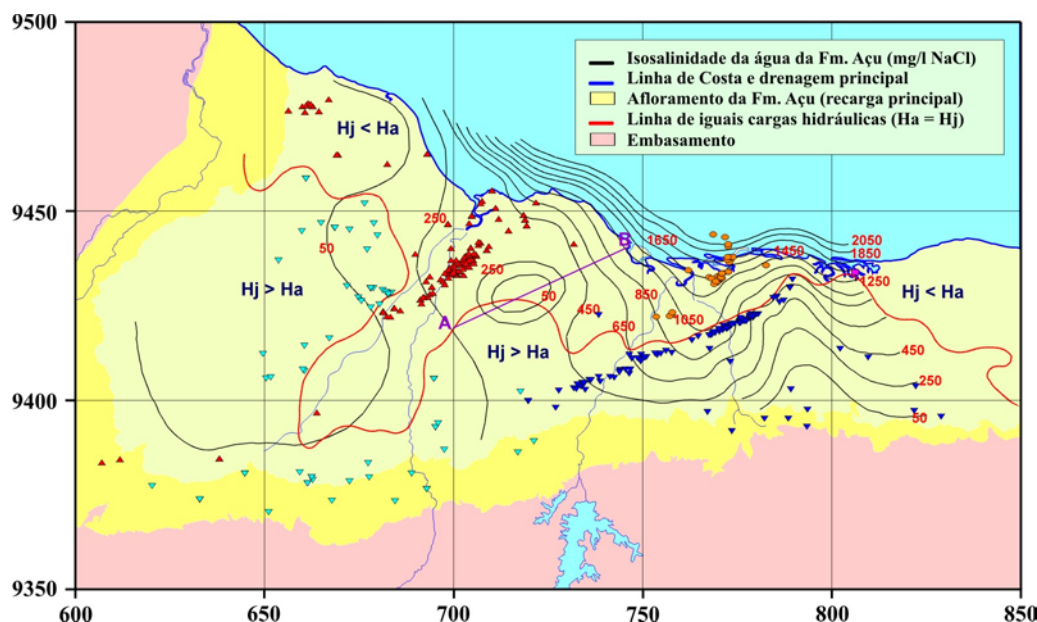


Figura 12. Mapa de salinidade das águas da Formação Açú

Dois blocos distintos de comportamento da salinidade ficam evidenciados nesta figura, separados pelo divisor de águas, cujo eixo aproximado está representado pelo segmento A-B. Em ambos os blocos a salinidade cresce em direção ao mar, resultado do aprofundamento dos reservatórios da Formação Açú, mas com gradiente de salinização mais acentuado no bloco situado a leste do divisor.

No bloco oeste, o largo espaçamento entre as linhas de isosalinidade e os valores mais baixos associados a estas são reflexo dos reservatórios com maior permo-porosidade e fluxo hidrodinâmico mais franco. Neste bloco estão localizados os melhores aquíferos da Formação Açú, com salinidades inferiores a 450 mg/l NaCl, independente da profundidade e da distância em relação à área de recarga. Assim é que, em testes realizados em poços situados até 30 Km da costa, em profundidades superiores a 1400m, foram registradas salinidades entre 350 e 400 mg/l NaCl. A linha representativa dos pontos de igual carga hidráulica para as formações Açú e Jandaíra ( $H_j = H_a$ ), apresentada na figura, separa as áreas hidroquímicas 1 e 2, situadas neste bloco.

No bloco leste, o menor espaçamento entre as linhas de isosalinidade refletem o maior gradiente de salinização. Os maiores valores e o rápido incremento resultam do maior tempo de

residência das águas que, por sua vez, é causado por barreiras impostas ao fluxo hidrodinâmico relacionadas a reservatórios com menor permo-porosidade, ao pacote sedimentar com menor razão areia/argila e, inclusive, ao contra-fluxo de água salinas originadas no domínio marinho da Bacia. As áreas hidroquímicas 3, 4 e 5 estão localizadas neste bloco, sendo a área 3 separada das duas últimas pela linha em que são idênticas as cargas hidráulicas das formações Açu e Jandaíra.

## CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS

### Classificação de Sulín

No sistema de classificação de águas subterrâneas proposto por Sulín[8] são considerados quatro tipos genéticos de água, associados a três diferentes tipos de ambiente: Sulfato-sódico e Bicarbonato-sódico, naturais de ambientes continentais, Cloreto-magnésiano, originado em ambientes marinhos, e Cloreto-cálcico, representando condições de altas profundidades. As águas da Formação Açu pertencem ao tipo genético Bicarbonato-sódico, de origem continental meteórica, conforme atestam os valores das razões iônicas que o definem, apresentadas na Figura 13.

Sendo  $r_{Na/Cl} > 1$ , as águas contêm um excesso de Sódio, que combinar-se-á com outros íons. Como  $r(Na-Cl)/rSO_4 > 1$ , não existe sobra de Sulfato e o Sódio combina-se com o Bicarbonato. A razão iônica Sódio/Cloretos mostra boa separação para as diversas áreas hidroquímicas, atestando os baixos valores de salinidade observados nas áreas 1 e 2 e os maiores valores da área 4. Sulín[8], em trabalho que analisou os tipos de águas associados a hidrocarbonetos em todo o mundo, concluiu que as águas do tipo

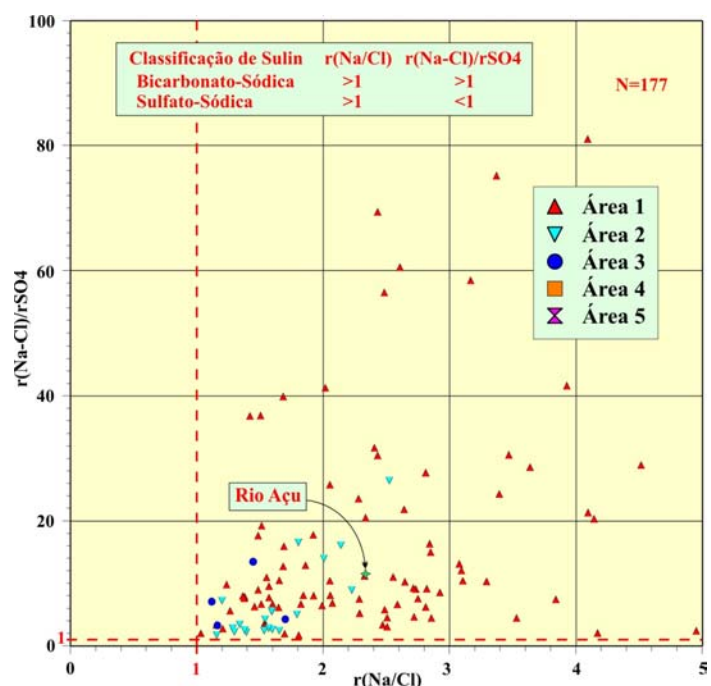


Figura 13. Classificação de Sulín[6]

Bicarbonato-sódico, em conjunto com as do tipo Cloreto-cálcico, são as mais comumente encontradas em associação com acumulações de hidrocarbonetos.

## Diagrama Trilinear de Piper

O Diagrama de Piper[9] combina três campos distintos para plote. Nos dois triângulos basais são registradas as concentrações de cátions (esquerda) e ânions (direita), em percentuais de unidade de reação, cada um representando um máximo de 50% da amostra. No losango central, representativo de 100% da amostra, os registros resultam do cruzamento dos percentuais de cátions e ânions. A Figura 14 é representativa do Diagrama de Piper para as águas da Formação Açú, estando associadas a regiões dos triângulos basais representativas de até 90% das águas potáveis.

Analisando-se os números associados às divisões do losango central, canto superior esquerdo da figura, que estão ligados a propriedades químicas específicas da água, pode-se afirmar que nas águas da Formação Açú:

1) Os íons alcalinos dominam sobre os alcalinos-terrosos, já que os pontos estão praticamente todos restritos à região 2;

2) Nas águas da Área 3 predominam os radicais ácidos fortes sobre os ácidos fracos, pontos situados na região 4, mas o inverso ocorre na Área hidroquímica 4, que tem a quase totalidade de seus pontos situada na região 3 do losango central.

3) Combinações destas características acontecem na região 7, indicando domínio de íons alcalinos e de radicais ácidos fortes; na região 8, indicativa de águas de baixa dureza e coerentemente ocupada somente por pontos das áreas hidroquímicas 1 e 4; e na região 9, onde não existe domínio de qualquer par cátion-ânion de Palmer[10].

Através do Diagrama de Piper é possível visualizar que as águas da Fm. Açú estão incluídas na Classe 1 de Palmer, que representa o domínio dos íons alcalinos.

Também as classes e subclasses de Sulin[8] estão graficamente representadas neste diagrama. Observa-se que nas áreas hidroquímicas 1 e 4 estão presentes a Classe S1 na qual predomina a salinidade primária (S1), subclasse S1A1A2, e a Classe A1 onde prevalece a alcalinidade primária conferida pelos íons alcalinos, subclasse A1S1A2. Nas áreas hidroquímicas 2 e 3 estão representadas a Classe S1, subclasse S1A2A1, e a Classe A2, dominada por íons alcalinos-terrosos, subclasse A2S1A1. Todas estas classes e subclasses ligadas ao tipo genético bicarbonato-sódico. Observações realizadas por Sulin apontam as subclasses S1A1A2 e A1S1S2 como as de ocorrência mais comum

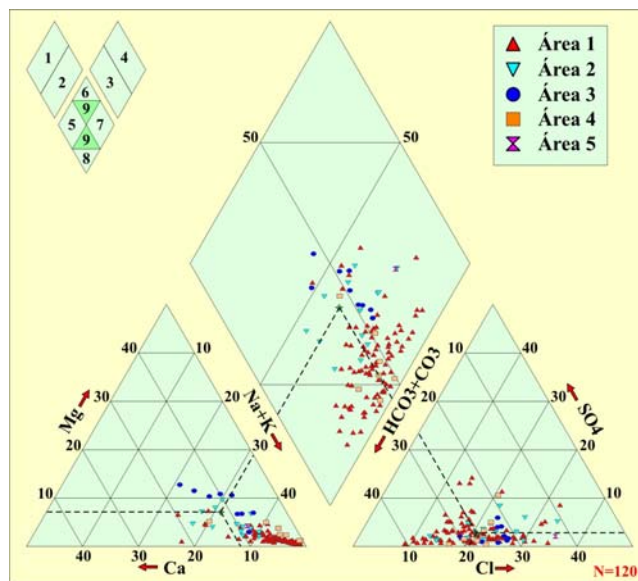


Figura 14. Diagrama de Piper[7]



em associação com acumulações de hidrocarbonetos, o que está em acordo com as maiores e melhores acumulações de óleo da Formação Açú, que situam-se nas áreas hidroquímicas 1 e 4.

## RAZÕES IÔNICAS

### Razão Iônica Magnésio/Cálcio

Segundo Custodio & Llamas[11], as águas de origem continental apresentam razão iônica Magnésio/Cálcio variando entre 0,3 e 1,5 e as águas de origem marinha mostram valor médio igual a 5 para esta razão. As concentrações dos íons devem ser expressas em unidades de reação, tal como apontado na Figura 15, representativa de águas da Formação Açú.

Observa-se que grande parte dos pontos localiza-se dentro do intervalo de variação das águas de origem continental, atestando a sua origem. Entretanto, muitos dos registros, especialmente os relativos à Área hidroquímica 1, situam-se abaixo do limite mínimo considerado como normal (0,3). Naturalmente, isto não significa que as águas por eles representadas tenham origem diversa das outras. Atribuímos tal comportamento ao seqüestro de Magnésio das águas, causando o deslocamento dos pontos para a esquerda.

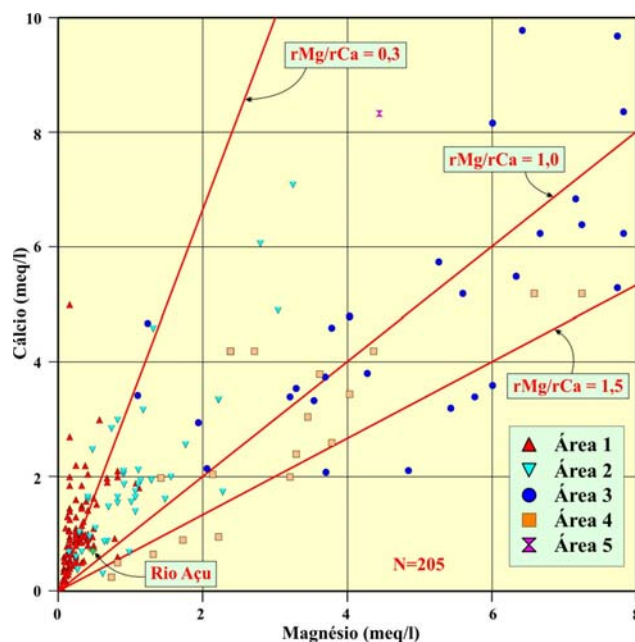


Figura 15. Razão iônica Magnésio/Cálcio

Em situação normal o Magnésio é mais estável do que o Cálcio quando em solução, e deveria assim permanecer apesar do aumento de pressão e temperatura que acompanham o aprofundamento das águas, tal como ocorre no deslocamento da água da Área 2 para a Área 1, que estão hidráulicamente conectadas. A precipitação de cálcio está atestada pela normalmente maior frequência de cimento calcífero, tipo o  $\text{CaCO}_3$ , nos reservatórios da Fm. Açú. Portanto, seria de se esperar que razão  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$  na água da Área 1 fosse igual ou maior do que aquela da Área hidroquímica 2, o que de um modo geral não se observa.

O seqüestro de Magnésio, tal como interpretamos, estaria associado à alteração de feldspatos para constituição de argilas do tipo esmectita e do par interestratificado ilita-esmectita que, segundo mapa apresentado por Bagnoli et alli[12] para toda a Bacia Potiguar, são mais freqüentemente observadas em reservatórios dos campos de Mossoró, Alto da Pedra, Canto do Amaro e Fazenda Belém, o primeiro parcialmente e os três últimos totalmente associados à Área hidroquímica 1. À



época os autores não dispunham de explicação para os altos valores observados nestas áreas. Análises comprobatórias da participação de espécies magnesianas foram solicitadas ao Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES), corroborando esta interpretação.

Nas áreas hidroquímicas 3 e 4, hidraulicamente conectadas, os valores da razão iônica  $rMg/rCa$  estão entre os maiores observados. Embora Bagnoli et ali tenham detectado elevada ocorrência de argilas de alteração no “trend” de Carnaubais, incluído na Área 3, interpretamos que os elevados valores da razão estejam ligados à maior influência de águas oriundas de terrenos dolomíticos da Formação Jandaíra, já que nesta região é maior o tempo de residência das águas da Formação Açu, submetidas que estão à uma menor velocidade de escoamento que, pelos motivos já comentados anteriormente.

Na Área 4, natural área de descarga das águas infiltradas através da Área 3, a simples estabilidade do Magnésio aos efeitos do aprofundamento já poderia explicar a elevada razão  $rMg/rCa$  observada. A contribuição de águas com influência marinha, relacionadas ao alto potenciométrico associado ao alto estrutural de Macau, incluso na área, seria mais um fator a contribuir para o aumento da mesma.

### Razão Iônica Cloretos/Bicarbonato

A razão iônica entre Cloretos e Bicarbonato é importante para o acompanhamento da concentração em sais nas águas de formação, em especial para a caracterização de intrusão marinha, conforme postulado por Custodio & Llamas[11]. Estes autores afirmam que em águas continentais os valores de  $rCl/rHCO_3$  variam entre 0,1 e 5,0 enquanto que na água do mar esta razão situa-se entre 20,0 e 50,0. Na Figura 16, representativa desta razão para as águas da Fm. Açu, todos os registros situam-se dentro do intervalo padrão, atestando a origem meteórica continental das águas da Fm. Açu.

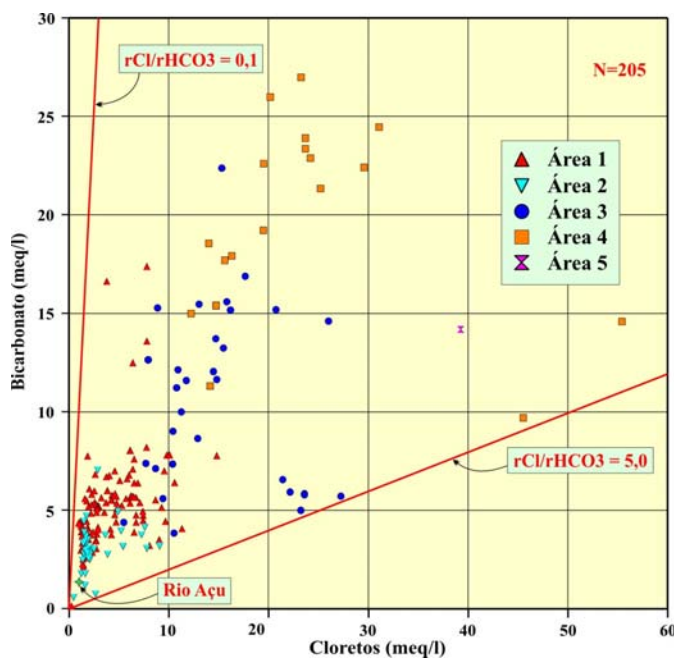


Figura 16. Razão Cloreto/Bicarbonato ( $rCl/rHCO_3$ )

Nas áreas hidroquímicas 1 e 2 as concentrações em Cloretos e Bicarbonatos são menores do que 10 meq/l para a quase totalidade dos registros, fato que as separa de modo claro das três áreas

restantes. Sem dúvida o menor conteúdo em Cloretos nas áreas 1 e 2 é resultado do fluxo hidrodinâmico menos afetado por barreiras de permeabilidade e da ocorrência de reservatórios mais potentes, característica observada em toda a área situada a oeste dos altos estruturais de Quixaba e de Serra do Carmo, reconhecido divisor de águas na Bacia Potiguar.

As águas das áreas hidroquímicas 3 e 4 apresentam concentrações em cloretos atingindo valores máximos significativamente maiores do que aqueles das duas primeiras. No caso da Área 3, esta maior concentração está associada à menor velocidade de fluxo subterrâneo, que é prejudicado pela maior argilosidade e pela menor pujança dos reservatórios da região situada a leste dos altos estruturais de Quixaba e de Serra do Carmo. A água passa maior tempo em contato com a rocha, antes do deslocamento final para a área de descarga, ficando mais sujeita a trocas iônicas, tal como atestam outras razões iônicas, inclusive o índice de câmbio de bases.

Nas duas primeiras áreas, assim como em boa parte dos registros das áreas 3 e 4, a razão entre Cloretos e Bicarbonatos varia em uma faixa grosseiramente semelhante. Exceções para este comportamento são 4 registros da Área 3 e dois registros da Área 4, possivelmente como resultado de uma mais efetiva contribuição de águas de origem marinha, tal como descrito anteriormente, corroborando o afirmado em Custodio & Llamas[11] quanto ao emprego desta razão iônica.

### **Razão Iônica Alcalinos-Terrosos/Alcalinos**

Embora esta não seja uma razão iônica comumente apontada na bibliografia sobre hidrogeoquímica, neste caso reveste-se de importância pois permite uma boa correlação com os processos hidrogeológicos atuantes sobre a Formação Açú. Na Figura 17 observa-se o comportamento da razão Alcalinos-Terrosos/Alcalinos para as águas da Fm. Açú.

Na Área hidroquímica 1 as águas da Formação Açú não recebem influência direta das águas da Formação Jandaíra, já que ali ocorre drenança vertical ascendente, conforme dito anteriormente. Por esta razão é menos efetiva a participação de íons alcalinos-terrosos na composição química das águas. As águas infiltradas através da Área 2 perdem alcalinos-terrosos, que se precipitam no espaço poroso, ao aprofundar-se em direção à Área 1, resultando na cimentação calcífera e nas argilas de alteração comumente observadas, e recebem em troca íons alcalinos das rochas, especialmente o Sódio, seguindo processo de abrandamento apontado nesta figura. Portanto, este processo de troca iônica rocha-fluido é responsável pelos baixos valores desta razão para a Área 1.

Na Área hidroquímica 2 ocorre drenança vertical descendente de águas dos carbonatos da Fm. Jandaíra para a Fm. Açú que, assim sendo, tem suas águas enriquecidas em alcalinos-terrosos, com conseqüente aumento na razão, em um processo de endurecimento, cujo sentido está apontado pela seta na figura acima.

Na Área hidroquímica 3 também se faz presente a drenança vertical descendente de águas da Fm. Jandaíra para a Fm. Açú. A concentração em alcalinos-terrosos atinge valores quase semelhantes aos dos alcalinos, já que a razão aproxima-se da unidade, a exemplo do que ocorre na Área 2. Nota-se entretanto, que as concentrações em alcalinos-terrosos na Área 3 são significativamente maiores, resultado do maior tempo de residência da água da Fm. Açú na região a leste do alto estrutural de Quixaba e de Serra do Carmo.

Na Área hidroquímica 4 observa-se a maior variação para a razão alcalinos-terrosos/alcalinos. Os menores valores da razão estão ligados ao abrandamento das águas da Área 3 por águas provenientes do domínio marinho da Bacia, conforme já comentado. Os maiores valores estariam ligados a águas da Área 3 ainda não radicalmente modificadas.

### Índice de Troca de Base (ITB)

As águas da Formação Açú apresentam ITB de valor negativo, resultado da supremacia dos íons alcalinos, conforme pode-se observar na Figura 18.

Nas áreas hidroquímicas 1 e 4 ocorrem os valores mais negativos, por semelhantes motivos. Ao atingirem estas áreas, as águas provenientes das áreas 2 e 3, respectivamente, já foram submetidas a processos severos de troca iônica com a rocha, associados ao câmbio de base de íons alcalinos-terrosos por íons alcalinos, ou abrandamento, resultando na cimentação calcifera, nas argilas de alteração e no maior aporte de íons alcalinos para as águas. O enriquecimento em alcalinos, aumenta a diferença  $Cl - (Na + K)$ , numerador na equação de definição exibida nesta figura, tornando mais negativos os valores de ITB. No caso específico da Área 4 este processo de abrandamento é reforçado pela influência de águas mais salgadas, deslocadas pelo contra-fluxo instalado no Alto de Macau. O abrandamento acontece no sentido apontado na figura.

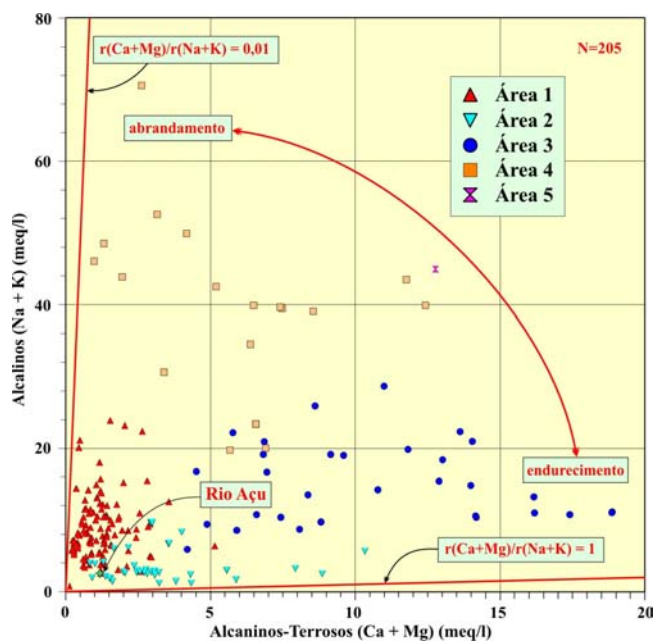


Figura 17. Razão Alcalinos-terrosos/Alcalinos

Na áreas hidroquímicas 2 e 3, situadas nas proximidades da área de recarga, as águas da Formação Açú sofrem mudança de base de endurecimento pela influência de águas da Formação Jandaíra, via drenança vertical descendente. Embora os íons alcalinos ainda sejam dominantes, as águas mostram razão iônica  $rCl/rNa$  e razão Alcalinos-Terrosos/Alcalinos que se aproximam do valor unitário, daí os valores menos negativos de ITB para estas duas áreas.

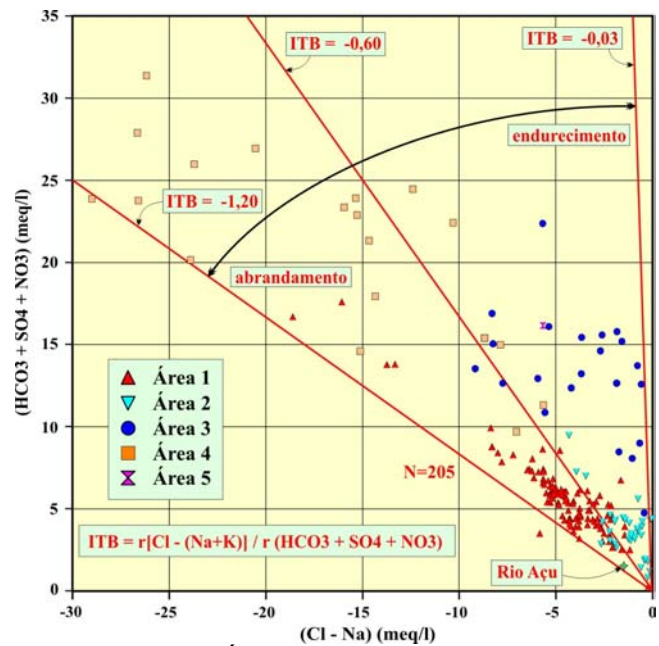


Figura 18. Índice de Troca de Base (ITB)

### TRAÇADORES ESTÁVEIS

A relação entre traçadores estáveis tais como os isótopos do Oxigênio ( $^{18}O$ ) e do Hidrogênio ( $^2H$ ) é particularmente importante para o estudo da evolução da água da formação, sua diluição ou concentração por mistura com águas de diferentes salinidades e as condições climáticas a que estiveram submetidas.

Os valores de  $^{18}O$  e de Deutério ( $^2H$  ou D) apresentados na Figura 19 foram obtidos de amostras coletadas de águas de superfície e das formações Açú e Jandaíra, tendo sido usados em estudo do IPT[7], que concluiu pela ocorrência de mudança climatológica na região entre 20.000 e 100.000 anos atrás. O baixo número de amostras de superfície, especialmente as de precipitações pluviométricas, não permitiu conclusões mais precisas neste estudo. As medidas estão expressas em relação ao padrão SMOW, definido por Craig[13].

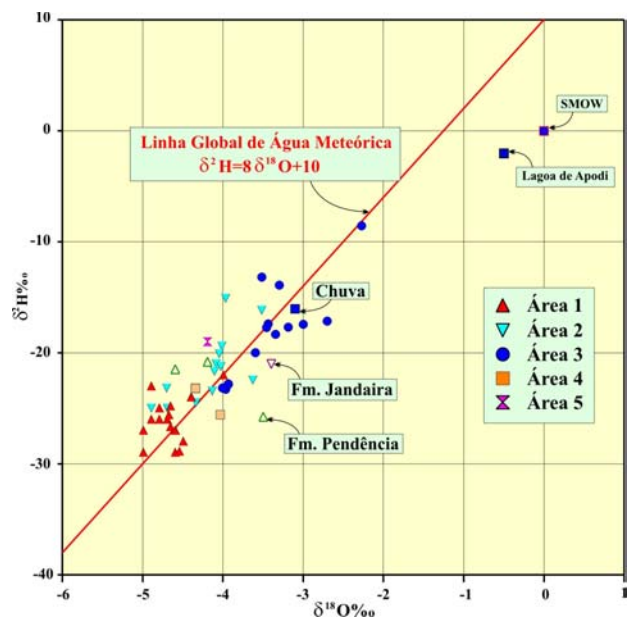


Figura 19. Relação entre  $^{18}O$  e  $^2H$

Em Faure[14] lê-se que, “com base em amostras coletadas de chuvas em diferentes latitudes geográficas, Craig[15] demonstrou que existe uma relação linear entre os valores de  $\delta^{18}O$  e de  $\delta^2H$ , que pode ser expressa pela Equação 3, representativa da composição isotópica média das águas meteóricas”. Esta relação resulta do fracionamento isotópico das moléculas de água no ciclo hidrogeológico.

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (3)$$

Observa-se que os registros da Fm. Açú caem no mesmo alinhamento definido pela equação, de modo coerente com a origem das águas. Entretanto nota-se que, em relação ao dado atual de  $\delta^{18}\text{O}$  e de  $\delta^2\text{H}$  na água da chuva, os registros das águas da Fm. Açú encontram-se depletados em  $^{18}\text{O}$  e em  $^2\text{H}$ , indicando a ocorrência de um clima mais ameno na época em que as águas foram infiltradas.

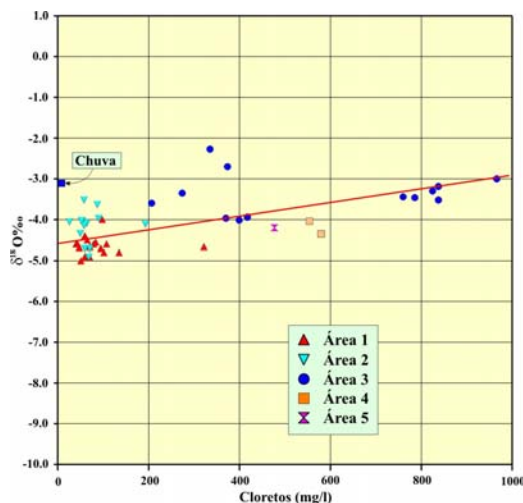


Figura 20. Cloretos versus  $^{18}\text{O}$

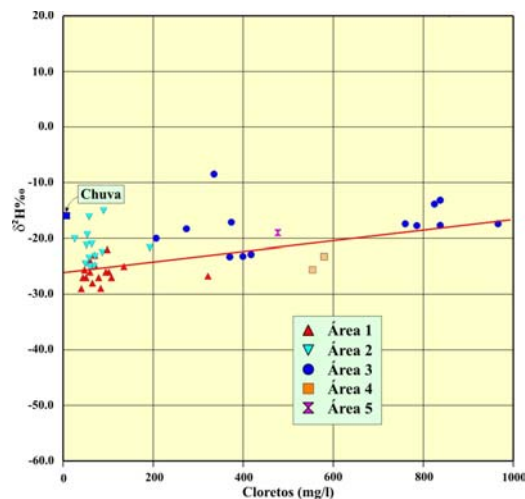


Figura 21. Cloretos versus  $^2\text{H}$

Esta depleção também é responsável pela não convergência do alinhamento dos registros de subsuperfície para o ponto representativo da água da chuva, na Figura 20 e na Figura 21, que mostram o comportamento do  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  em relação à concentração em Cloretos, respectivamente.

### PADRÕES DO DIAGRAMA DE STIFF

Stiff[16] criou um diagrama hidroquímico em que os valores de reação dos íons são plotados em um sistema de coordenadas retangulares. As formas geométricas geradas pela união dos pontos, pela facilidade de construção e pela boa definição visual, são muito usadas na indústria do petróleo para correlação entre águas. Em verdade este diagrama foi a base inicial para a realização do zoneamento hidroquímico preliminar da Formação Açú[17], apresentado no III Seminário Técnico de Operações Geológicas da PETROBRAS (STOG III).

Conforme pode ser observado no primeiro diagrama da Figura 22, padrão para a Área hidroquímica 1, a forma geométrica é dominada amplamente pelo bicarbonato, basicamente proveniente de precipitações pluviométricas. A água nesta área, em especial nos horizontes mais profundos, já cedeu boa parte dos íons alcalinos-terrosos, introduzidos em sua passagem pela Área hidroquímica 2, para a formação do cimento calcífero e para os processos químicos que envolvem a alteração de feldspatos, conforme já previamente comentado.

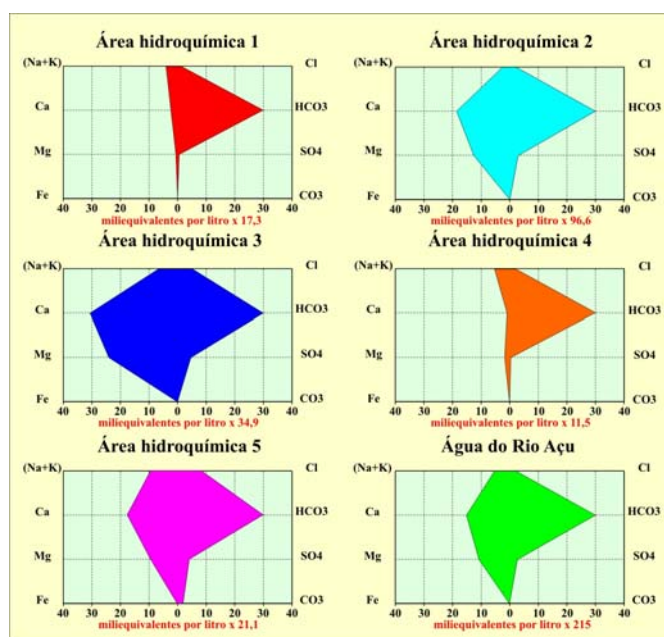


Figura 22. Diagramas-padrão para águas da Fm. Açú

O segundo diagrama é padrão para a Área hidroquímica 2, localizada próxima à área de recarga. É evidente a contribuição dos íons alcalinos-terrosos Cálcio e Magnésio na forma geométrica do diagrama, fruto da drenança vertical descendente de águas associadas a carbonatos da Formação Jandaíra.

O diagrama seguinte é representativo do padrão para a Área hidroquímica 3, também localizada próxima à área de recarga. O efeito causado pelos alcalinos-terrosos provenientes da Formação Jandaíra é maior ainda, especialmente o Magnésio, devido ao maior intercâmbio iônico que, por sua vez, é propiciado pelo maior tempo de residência das águas da Formação Açú, pelos motivos já expostos anteriormente.

A forma geométrica padrão da Área hidroquímica 4 está configurada no quarto diagrama. Nota-se facilmente o abrandamento da água proveniente da Área 3, por câmbio de base entre os íons Cálcio e Sódio. A diminuição na concentração de Magnésio é menor devido ao seu maior poder de manter-se em solução, apesar do aprofundamento da águas e conseqüente incremento na temperatura e, possivelmente, também devido à contribuição de águas oriundas pelitos de regiões do domínio marinho da Bacia, conforme já sugerido anteriormente.

O diagrama padrão para a Área hidroquímica 5 está representado em seguida. Representa águas deslocadas da Área 3 por fluxo hidrodinâmico e que, por esse motivo, mostra marcante participação dos íons alcalinos-terrosos mas, devido ao aprofundamento e trocas iônicas com a rocha, apresentam maior conteúdo em íons Sódio e Cloretos configurando, de modo similar ao que ocorre na Área 4, um abrandamento das águas.



O último diagrama é representativo de água coletada na Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, do Rio Açu, situada a próxima a borda da Bacia, sobre o embasamento cristalino, a oeste do divisor central de águas, associado aos altos estruturais de Quixaba e de Serra do Carmo. É notável e natural a semelhança da sua geometria com as dos diagramas padrão das áreas 2 e 3, isto porque representa as mesmas águas de precipitação pluviométrica que se infiltram na área de recarga da Formação Açu e que posteriormente, iniciando seu caminho em direção às áreas de descarga, já em reservatórios subjacentes a carbonatos da Formação Jandaíra, são enriquecidas em íons alcalino-terrosos, por efeito de drenança vertical descendente.

No mapa apresentado na Figura 23 estão representados todos os Diagramas de Stiff analisados e usados neste estudo. Por uma questão de limpeza visual representamos alguns destes como triângulos, mas suas formas geométricas originais correlacionam-se àquelas dos diagramas de mesma cor. As suas

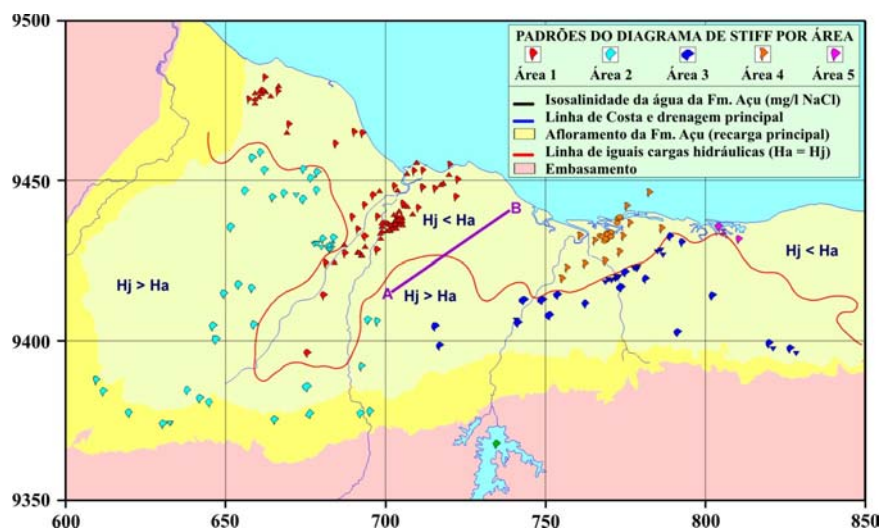


Figura 23. Diferenciação baseada nos Diagramas de Stiff

localizações no mapa correspondem àquelas dos poços dos quais foram coletadas as amostras das águas que representam.

Observando-se o mapa pode-se concluir, sem muita dificuldade, pela existência de pelo menos quatro áreas com características hidroquímicas diferenciadas, fruto da distribuição dos diagramas no mesmo, que ressalta a importância de dois aspectos físicos aos quais está intimamente ligada; o divisor de águas central da Bacia, cujo eixo aproximado está representado pelo segmento A-B na figura, e a linha de definição de iguais cargas hidráulicas entre as formações Açu e Jandaíra, definida no estudo do IPT[7] e redesenhada, tal como vista na figura, a partir de novos registros levantados em estudos hidrodinâmicos aplicados à prospecção de petróleo[6] ou mesmo da própria correlação entre os diagramas. A Área 5, sem maior número de registros hidroquímicos completos e confiáveis, foi definida com maior ênfase em aspectos hidrodinâmicos comparativos e em observações gerais sobre o comportamento hidráulico regional das formações Açu e Jandaíra, inclusive as apresentadas no estudo do IPT[7].

Tal como afirmado anteriormente, a distribuição dos diagramas foi a base para o zoneamento hidroquímico preliminarmente proposto para as águas da Formação Açu[17]. Os resultados obtidos,

e agora apresentados, com o uso de diversas ferramentas de análise hidroquímica, nos permitiram a confirmação deste zoneamento, tal como delineado no final deste trabalho.

## ANÁLISE ESTATÍSTICA

Definidas as áreas hidroquímicas, buscamos o apoio matemático para esta interpretação através da análise estatística dos dados, realizada por meio do pacote estatístico SAS. Inicialmente foi usado o procedimento STEPDISC, que selecionou um subconjunto de variáveis qualitativas para produzir um modelo de discriminação. Das 10 (dez) variáveis submetidas (Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>, rMg/rCa e rNa/rCl), foram selecionadas 8 (oito), sendo eliminadas as variáveis K e CO<sub>3</sub> que apresentavam baixa amostragem. As cinco áreas hidroquímicas foram usadas como classes de agrupamento de dados.

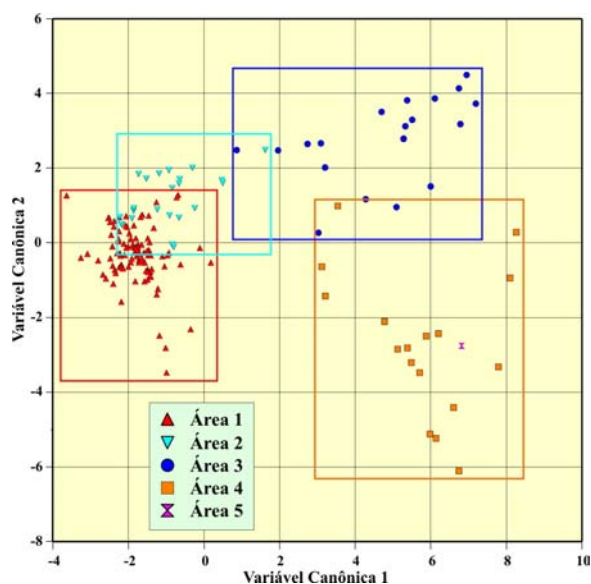


Figura 24. Relação entre Variáveis Canônicas

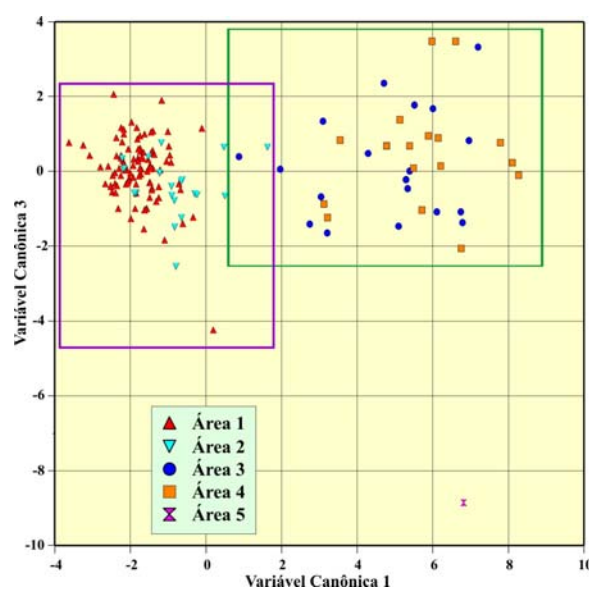


Figura 25. Relação entre Variáveis Canônicas

Usando o subconjunto selecionado, e as áreas como classes, foi executado o procedimento DISCRIM, para computar as funções discriminantes visando a classificação das observações. Este procedimento apontou os seguintes erros percentuais por área informada: Área 1 (14,4%), Área 2 (28,6%), Área 3 (5,3%), Área 4 (11,8%) e Área 5 (0,0%), perfazendo uma média de 12%. Portanto, a maior margem de erro estava relacionada com a Área 2, correspondendo a registros obtidos em regiões limítrofes com a Área 1, em torno da linha divisória em que a carga hidráulica da Fm. Jandaíra é igual àquela da Fm. Açú, tais como os obtidos nos campos de Mossoró e Fazenda São João e em alguns poços de captação de água.

Os erros apontados por registro foram analisados e corrigidos e, então, executado o procedimento CANDISC, de análise discriminante canônica, que é uma técnica de redução de dimensão relacionada à análise de componente principal e à análise canônica. Foram usadas as 10

variáveis iniciais, dos 162 registros hidroquímicos mais confiáveis, tomando as cinco áreas como classes. Quatro variáveis canônicas foram definidas, sendo a relação entre as duas primeiras, como apontado na Figura 24, a que melhor representa a separação individual das quatro áreas hidroquímicas mais amostradas. As outras relações possíveis apontam, basicamente, a separação das áreas 1 e 2 em relação às áreas 3 e 4, tal como visto na Figura 25.

## ZONEAMENTO HIDROQUÍMICO

O zoneamento hidroquímico da Formação Açú, apresentado na Figura 26, é resultado da interação de todas as ferramentas de avaliação anteriormente analisadas. Consideramos a existência de cinco áreas hidroquímicas distintas, as quatro primeiras com elevado grau de confiabilidade, a quinta área foi definida, basicamente, por critérios hidrodinâmicos.

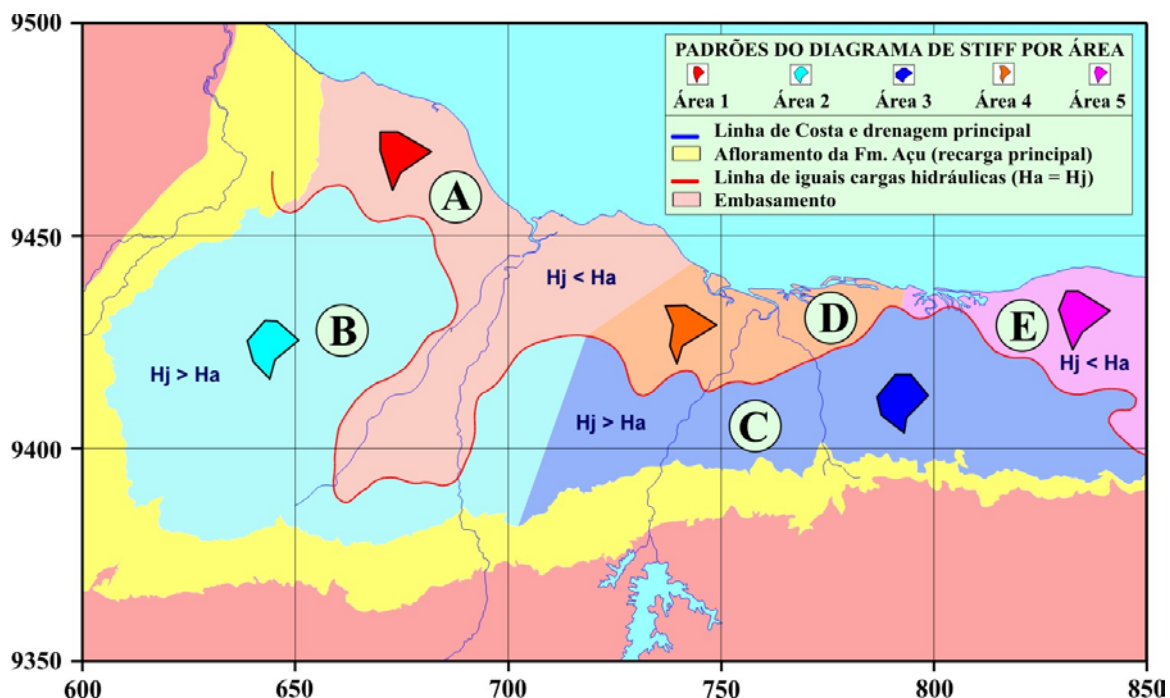


Figura 26. Zoneamento hidroquímico das águas da Formação Açú

A entrada de águas na Formação Açú acontece na região abrangida pelas áreas hidroquímicas 2 e 3, seja através da superfície de afloramento da Formação Açú ou via drenança vertical descendente de águas da Formação Jandaíra. A área de descarga destas águas situa-se no sentido das áreas hidroquímicas 1, 4 e 5.

Um resumo das características destas áreas é apresentado na Tabela 2, com o acréscimo de uma avaliação geral da qualidade das águas associadas a elas sob o ponto de vista da potabilidade.

	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5
PH	6,0 - 9,4	6,0 - 8,2	6,4 - 8,4	6,8 - 8,6	7,2 - 7,6
Densidade	0,90 - 0,95	0,92 - 0,96	0,90 - 0,98	0,90 - 0,96	?
Resistividade	50 - 180	20 - 250	170 - 1380	700 - 1650	1500
Classe Sulín	HCO <sub>3</sub> -Na	HCO <sub>3</sub> -Na	HCO <sub>3</sub> -Na	HCO <sub>3</sub> -Na	HCO <sub>3</sub> -Na
rNa	2,0 - 22,0	2,0 - 9,7	5,5 - 28,0	20,0 - 70,0	44,0
rMg	0,1 - 1,2	0,2 - 3,3	1,1 - 7,8	0,7 - 7,3	4,3
rCa	0,1 - 5,0	0,4 - 7,0	2,0 - 9,8	0,3 - 5,2	8,3
rCl	2,0 - 12,0	1,0 - 15,0	5,5 - 27,0	12,0 - 56,0	39,0
rHCO <sub>3</sub>	2,0 - 17,0	0,5 - 8,0	4,0 - 22,5	9,7 - 27,0	14,5
Potabilidade	Boa a Excelente	Boa	Regular a Ruim	Ruim	Regular a Ruim

Tabela 2. Resumo das características das áreas hidroquímicas

## AGRADECIMENTOS

Aos geólogos Aníbal César Alves, Eduardo Eidelwein, Ubiraci Manoel Soares pelas sugestões técnicas e correções no texto inicial. Aos geólogos José Alexandre de Melo e Luis Zapparolli pelo decisivo apoio no tratamento estatístico dos dados e finalmente, mas não menos importante, à minha esposa Ana Maria, pelo apoio e compreensão pelos constantes “tive que ficar até mais tarde para terminar o ....gráfico, mapa, texto”

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SOARES, U.M.: As relações entre tectonismo e seqüências deposicionais no Rift Potiguar – porção SW do Graben de Umbuzeiro, Bacia Potiguar Emersa. Em: Dissertação de Mestrado, UFRN, 2000.
- CREMONINI, O. A. et alli.: O Rift Potiguar: novos dados e implicações tectônicas. Em: UNESP, Simpósio sobre o cretáceo do Brasil, 4, 1996, Rio Claro, *Boletim*.
- BERTANI, R.T. et alli.: Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e “habitat” do petróleo na Bacia Potiguar. Em: GABAGLIA, G.P.R. et al, (ed). Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro, 1990 : PETROBRAS.
- VASCONCELOS, E. P. et alli.: Unidades de correlação da Formação Açú. Em: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 36, 1990, Natal, *Anais...*, v.1, p-227-240.
- SOUZA, O.R. et alli.: Acumulações de petróleo sob condições hidrodinâmicas na Bacia Potiguar. Natal, PETROBRAS, 1983.
- TEIXEIRA, I.E.M.: Superfície Potenciométrica da Formação Açú. Natal, PETROBRAS, 1985.

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A.: O aquífero Açu. Em: Estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do RN, v1. São Paulo, IPT, 1982, p. 91-148.
- SULIN, V.A.: Waters of oil reservoir in the system of natural waters, Moscow, Gostoptekhizdat, 1946.
- PIPER, A.M.: A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis, Trans. Am. Geophys. Union, 1944, 25, p. 914-923.
- PALMER, C.: The geochemical interpretation of water analysis, U.S. Geol. Surv. Bull., 1911, 749, p. 5-31.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R.: Evolucion geoquímica de las aguas en los acuíferos. Em: Hidrología subterránea, v1. Barcelona, Ediciones Omega S.A., 1976, p. 1019-1036.
- BAGNOLI, E. et alii: Petrografia e aspectos estratigráficos regionais da unidade 3 da Formação Açu na Bacia Potiguar emersa, PETROBRAS, 1993.
- CRAIG, H.: Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters, Science, 1961a, 133, p. 1833-1934.
- FAURE, G.: Oxygen and hydrogen in the hydrosphere and the atmosphere. Em: Principles of isotope geology, New York, John Wiley & Sons, 1986, p. 429-459.
- CRAIG, H.: Isotopic variations in meteoric waters, Science, 1961b, 133, p. 1702-1703.
- STIFF, H.A.: The interpretation of chemical water analysis by means of patterns, J. Petrol. Technol., 1951, 03, p. 15-17.
- TEIXEIRA, I.E.M.: Caracterização hidroquímica da Formação Açu. Em: Anais do Seminário Técnico de Operações Geológicas (STOG III), v2. Cabo Frio, PETROBRAS, 1991, p. 541-550.