

Águas Subterrâneas na Zona Costeira da Planície do Recife (PE): Evolução da Salinização e Perspectivas de Gerenciamento

Suzana Maria Gico Lima Montenegro, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral,
Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Departamento de Engenharia Civil / UFPE
suzanam@ufpe.br, jcabral@ufpe.br, anderson.paiva@ufpe.br

Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

Departamento de Tecnologia Rural / UFRPE
monte@hotlink.com.br

José Geilson Alves Demetrio

Departamento de Geologia / UFPE
geilson@ufpe.br

Giancarlo Lins Cavalcanti

Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA)
giancarlo@compesa.com.br

Recebido: 13/05/09 - revisado: 29/06/09 - aceito: 30/06/09

RESUMO

A exploração excessiva de aquíferos costeiros, em desequilíbrio com o processo de recarga, coloca o sistema sob risco de salinização por intrusão marinha. O fenômeno provoca a degradação do aquífero, tornando suas águas impróprias para diversos usos, incluindo o consumo humano. O sistema aquífero da Planície do Recife (PE) é composto por dois aquíferos profundos, Cabo e Beberibe, de características semi-confinadas, recobertos por um aquífero freático, o Boa Viagem. Em condições de superexploração, os aquíferos costeiros da Planície do Recife apresentam-se vulneráveis à degradação por salinização, por diferentes causas. Vários poços nessa região vêm apresentando crescente teor de sais ao longo dos anos, e em alguns casos são desativados, em outros simplesmente abandonados, aumentando o risco de contaminação. No aquífero Cabo, na Zona Sul, o mais explorado, uma das possíveis causas apontadas para a salinização é a intrusão marinha. A salinização também pode ser provocada por conexão, através de poços, com o aquífero superior contaminado por disposição de esgotos, presença de mangues e ligação com estuários de rios. O fluxo vertical através da camada semipermeável que interliga os dois aquíferos também é outra causa provável da salinização do Aquífero Cabo. Seja por conexão com o aquífero superior salinizado, ou por intrusão marinha, a condição de super-exploração do sistema tem influência decisiva no incremento dos teores de salinidade das águas subterrâneas na Planície do Recife. Esse trabalho apresenta uma análise da evolução da salinidade em poços de região com elevada ocupação, alta densidade de poços e exploração intensa, onde vêm sendo observados rebaixamentos excessivos e salinização de diversos poços. O monitoramento foi iniciado em 1999 nos aquíferos Cabo e Boa Viagem. Perspectivas de gerenciamento também são discutidas.

Palavras-chave: Aquífero costeiro, intrusão marinha, monitoramento hidroquímico.

INTRODUÇÃO

A questão da intrusão marinha em aquíferos costeiros afeta grande parte das cidades litorâneas do mundo que utilizam água subterrânea para abastecimento. Este assunto vem sendo objeto de pesquisas por muitas décadas em diversos países (e.g.

Reilly e Goodman, 1985; Diamantino, 1996; Bear et al., 1999; Lhamas e Custodio, 2003; Manzano et al., 2005; Prietro et al., 2006). No Brasil, a intrusão também vem sendo estudada nas últimas décadas (e.g. França et al., 1987; Cabral et al., 1992; Costa Filho et al., 1998; Nobre e Nobre, 2001; Canales et al., 2003; Silva Jr. e Pizani, 2003). As principais abordagens utilizadas nos estudos da interação água

doce - água salgada ou aquífero-oceano, com participação de pesquisadores de diversas áreas do conhecimento podem ser enquadradas em três categorias (Langevin et al., 2007). As abordagens são baseadas em medições físicas, análises químicas e modelagem matemática. Recentemente, o assunto também vem sendo estudado em redes de cooperação internacional, a exemplo do projeto integrando países da Europa (SALTRANS, 2004) e países ibero-americanos (e.g. Bocanegra et al., 2007a), que ressaltam a importância do intercâmbio científico para avanço do conhecimento e estabelecimento de estratégias de conservação de aquíferos costeiros sob risco de intrusão marinha.

Com uma demanda de cerca de 14 m³/s, a Região Metropolitana do Recife (RMR) composta por 14 municípios e uma população de mais de 3 milhões de habitantes tem enfrentado sérios problemas com o déficit do abastecimento público. A água subterrânea vem participando do abastecimento na RMR há bastante tempo. Na década de 70 tem-se registro de diversos poços perfurados pela COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento) e pelo DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), dentre outros, para fins de abastecimento. Com o processo de urbanização, cresceu o número de poços privados em condomínios e estabelecimentos comerciais, como fonte suplementar ao abastecimento, oriundo principalmente de fontes superficiais. Uma crise no abastecimento de água da RMR nos anos de 1998 e 1999, devida a precipitações abaixo da média, levou os mananciais de superfície a níveis próximos ao colapso. Este fato implicou em forte racionamento. Em busca de meios mais confiáveis de abastecimento, a perfuração de poços cresceu bastante por possibilitar maior regularidade de vazões, entre outras vantagens.

Na Região Metropolitana do Recife, a salinização da água subterrânea vem sendo motivo de preocupação desde a década de setenta. A salinização de alguns poços tem ocorrido nos últimos anos. Vários estudos vêm sendo feitos para entender o processo de salinização. Em particular, diversos poços vêm apresentando teores crescentes de sais na Planície do Recife, inserida na RMR e entrecortada por diversos rios, riachos, canais e mangues. Na Planície do Recife, as possíveis causas que vêm sendo apontadas para a salinização são a intrusão marinha, a drenança proveniente de camadas superiores salinizadas pela presença de mangues e conexão com estuários e a passagem de água salinizada dessas camadas superiores através de descontinuidade das camadas impermeáveis intermediárias ou através do espaço anelar de poços mal construídos ou abando-

nados, além de porções dos aquíferos com águas antigas salinizadas, os chamados paleomangues.

O presente artigo analisa a salinidade do aquífero Cabo, manancial muito importante para abastecimento de condomínios residenciais, hotéis, colégios, estabelecimentos comerciais e empresariais na parte sul da Planície do Recife e alguns poços no aquífero Boa Viagem, na mesma região.

CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO E ESTUDOS ANTERIORES

Generalidades

A RMR formada por Recife e mais 13 cidades possui uma população de 3,5 milhões de habitantes. Para Recife, a capital do Estado de Pernambuco, o IBGE (2009) estima a população residente em 2007 em 1.533.580 habitantes. Recife é construída sobre uma planície, com nível médio acima do nível do mar de cerca de 2,0m, e é circundada por elevações topográficas. A Planície do Recife ocupa uma área de cerca de 112 km² e corresponde a uma planície de formação geológica fluvio-marinha, situada nos limites geográficos de ocorrência das bacias sedimentares do Cabo e Pernambuco-Paraíba.

A precipitação média anual em Recife é de 2.458 mm, sendo junho o mês com maior concentração de chuvas com média de 389,6 mm, e novembro o mês mais seco, com uma média de 47,8 mm. A temperatura média anual é de 25,5°C.

Geologia e hidrogeologia

A geologia da RMR é composta por duas grandes unidades geotectônicas: a) Embasamento Cristalino e b) Cobertura Fanerozóica. O embasamento cristalino compreende rochas graníticas, migmatíticas e gnáissicas, pertencentes ao Maciço Pernambuco-Alagoas e afloram na porção ocidental da RMR. A cobertura fanerozóica inclui sedimentos cretácicos das Bacias Pernambuco e Paraíba (Lima Filho, 1999), sedimentos terciários da Formação Barreiras e sedimentos quaternários da Planície do Recife.

Os sedimentos cretácicos das Bacias Pernambuco e Paraíba ocorrem, respectivamente, a sul e a norte da Cidade do Recife, delimitados pelo lineamento Pernambuco.

Os aquíferos da RMR são classificados de acordo com domínios geomorfológicos (Costa et al., 1998) em:

- Domínio das Chãs do Embasamento Cristalino (Aquífero Fissural)
- Domínio dos Tabuleiros Norte (Aquíferos Intersticiais)
- Domínio da Planície do Recife (Aquíferos Intersticiais).

Na Planície do Recife, encontram-se os aquíferos Cabo, Beberibe e Boa Viagem. O aquífero Cabo é constituído por arenitos, siltitos e argilitos, apresentando espessura média de 100 metros. O aquífero Beberibe, dominante ao norte do lineamento Pernambuco, possui espessura média de 100 metros, sendo constituído por arenitos com intercalações de siltitos e argilitos. O aquífero Boa Viagem, com espessura média de 40 metros, recobre os sedimentos dos aquíferos Beberibe e Cabo, sendo composto por areias, siltes e argilas.

O aquífero Boa Viagem, freático, é facilmente explotável e desempenha papel fundamental de recarga. Os sedimentos da Formação Beberibe constituem o aquífero mais explotado nesse domínio em termos de volumes extraídos (Costa et al., 1998). O aquífero Cabo, de natureza semiconfinada, possui o maior número de poços em exploração e é uma importante fonte de abastecimento d'água da RMR, concentrando poços privados perfurados por condomínios, estabelecimentos comerciais de diversos portes e hospitais, ao sul da Planície do Recife. As características desses aquíferos são resumidas na Tabela 1. O aquífero Cabo é o objeto principal dessa investigação, mas a análise também inclui o aquífero Boa Viagem, por estar conectado ao primeiro.

Tabela 1 - Principais características dos aquíferos estudados (Costa et al., 1998).

Parâmetros	Características	
	Boa Viagem	Cabo
Condutividade hidráulica	Baixa a elevada	Média a baixa
Transmissividade	Baixa a média	Regular
Coef. de armazen. ou porosidade eficaz	Baixa a elevada	Regular
Vazões	Média a elevada (17 m ³ /h)	Inferiores a 10 m ³ /h
Vazões específicas	Elevada (4,5 m ³ /h/m em média)	Baixas (<1 m ³ /h/m)

Vale destacar que estudo recente (Costa, 2007) questiona essa descrição hidrogeológica e destaca que ao contrário do que se vem adotando, a formação geológica que domina na profundidade onde vem sendo perfurados poços na região dos bairros Pina, de Brasília Teimosa e norte de Boa Viagem corresponde à formação Beberibe, da bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba. No presente estudo, será adotada a denominação usual, por ser a difundida até o momento na literatura e por essa pesquisa não se tratar de investigação hidrogeológica conceitual.

Abastecimento de água na Região Metropolitana do Recife

Os sistemas de abastecimento da Região Metropolitana do Recife, incluindo captação, adução, tratamento e distribuição, são operados pela COM-PESA – Companhia Pernambucana de Saneamento e têm capacidade para captar e tratar cerca de 10,68 m³/s de mananciais superficiais, embora nem sempre produza a capacidade máxima. Manoel Filho (2004) destaca que a água subterrânea na RMR é usada principalmente para abastecimento urbano e industrial e tem participação estimada na ordem de 15% no sistema de abastecimento administrado pela COMPESA. A maior parte da água subterrânea da região é explotada através de poços particulares e os volumes extraídos ainda são pouco conhecidos (Manoel Filho, 2004).

Costa et al. (1998) e CONTECNICA (1998) relataram que a contribuição de águas subterrâneas para o sistema de distribuição da COMPESA era de 1,6 m³/s, explotados por 110 poços no aquífero Beberibe ao norte da RMR. Logo após a seca de 1998/1999, novas baterias de poços foram construídas, aumentando expressivamente a contribuição das águas subterrâneas ao sistema público de abastecimento. Além dos poços da COMPESA, milhares de poços particulares vêm sendo utilizados principalmente para abastecer edifícios residenciais, os quais bombeiam em média 5,0 m³/h.

Costa et al. (2002) avaliaram em cerca de 12.000 o número de poços públicos e privados existentes só na Planície do Recife o que mostra que a perfuração de poços continuou crescendo mesmo depois da crise no abastecimento. Desse número, não se consegue identificar quantos poços estão efetivamente em operação. Dos poços avaliados, 33% eram profundos, ou seja, com mais de 20 metros de profundidade (limite de poço raso segundo a lei estadual), o que significa que as águas profundas têm sido bastante explotadas.

Gestão de águas subterrâneas no Estado de Pernambuco

O problema da superexploração dos aquíferos na RMR há muito preocupa a comunidade técnico-científica, órgãos gestores e população. Estudo incluindo levantamento detalhado das condições de exploração do sistema estabeleceu um zoneamento da exploração das águas subterrâneas na cidade do Recife (Costa et al., 1998). A aplicação da Lei Estadual 11.427/97, da Conservação e Proteção das Águas Subterrâneas no Estado, e do Decreto 20.423, de março de 1998, de regulamentação da referida lei, prevê o controle das perfurações para a conservação e preservação das águas subterrâneas, com relação à defesa de sua qualidade e quantidade. No entanto, a oferta insuficiente de água a partir dos sistemas em operação e a conseqüente pressão da população vem impedindo que um controle mais rigoroso da perfuração e exploração de poços seja efetivado. Costa (2000) aponta que em 1995 já havia um desequilíbrio entre recarga e descarga de 800L/s.

Costa e Costa Filho (2004) apresentam balanço hidrogeológico entre as entradas e saídas de água nos aquíferos da RMR e ressaltam que o resultado, baseado em estudo recente, é positivo em alguns domínios hidrogeomórficos e negativos em outros. O balanço é avaliado diminuindo da recarga anual, os exutórios naturais e artificiais. O balanço entre potencialidade e disponibilidade apresenta um déficit de 55,12 hm³/ano (1,75 m³/s), nos aquíferos da Planície do Recife; um superávit de 17,98 hm³/ano (0,57 m³/s) nos aquíferos da Planície de Jaboatão dos Guararapes; um déficit de 43,88 hm³/ano (1,39 m³/s) no aquífero Beberibe Inferior em Olinda; e um superávit de 15,17 hm³/ano (0,48 m³/s) no aquífero Barreiras na região dos Tabuleiros ao norte de Recife.

Costa e Costa Filho (2004) também destacam que foi observado que entre 1975 e 1985 o rebaixamento médio do aquífero Cabo, na denominada "Zona A", em Boa Viagem, foi de 17 m, ou seja, 1,7 m por ano; de 1985 a 1995, o rebaixamento foi de 33 m, isto é, 3,3 m por ano, e de 1995 para 2000, o rebaixamento foi de 43 m, no que resulta a média de 8,6 m por ano. Os autores afirmam que a vazão total anual dos poços na região aumentou gradativamente, porém não na mesma proporção do aumento dos rebaixamentos.

Ainda que não efetivamente implantado, o estudo que originou o zoneamento da exploração de águas subterrâneas foi atualizado. De acordo com Costa et al. (2003), o zoneamento explorável dos

aquíferos da região compreendida pelos municípios de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes, na RMR, foi efetuado tomando como base dois princípios:

- profundidade do nível das águas subterrâneas;
- condições de exploração atualmente desenvolvidas.

Costa et al. (2003) apresentam o mapa identificando as zonas, assim como descrição com aquífero explorado, situação da profundidade atual dos níveis d'água e condicionantes de exploração. Das zonas identificadas, a mais crítica é a chamada zona A, que possui as seguintes características:

Tabela 2 - Variação da profundidade d'água em um poço na Zona A.

PERÍODO	Profundidade da água (m)
Jan-92	51,00
Nov-03	84,86
Dez-03	89,13
Mai-04	86,20
Jan-05	92,95
Fev-05	99,99
Mar-05	101,22
Abr-05	99,08
Mai-05	102,87
Jun-05	101,59
Jul-05	100,50
Ago-05	97,47
Set-05	102,17
Out-05	109,43
Nov-05	110,44
Dez-05	110,61

➤ ZONA A

Localização: zona costeira a sul de Boa Viagem

Aquífero explorado: Cabo

Situação atual de profundidade: os níveis potenciométricos no aquífero Cabo encontram-se a profundidades variáveis entre 60 e 110m

Condicionantes de exploração: nenhum novo poço deve ser perfurado nesse aquífero; os poços atualmente existentes deverão ter sua vazão reduzida em 50% e um monitoramento contínuo deverá ser exercido.

A chamada Zona A localiza-se no bairro de Boa Viagem. Essa pesquisa adotou como domínio de

investigação a Zona A e áreas circunvizinhas. A região do bairro de Boa Viagem é uma das regiões mais críticas da Planície do Recife em termos de número de poços perfurados. O bairro tem alta concentração populacional (cerca de 6529,43 hab/km²) com padrão social elevado. Grande parte dos edifícios residenciais do bairro possui seu próprio poço para abastecimento de água. A área também é altamente impermeabilizada. A Tabela 2 apresenta a variação do nível potenciométrico em um poço na chamada Zona A, com 120 m de profundidade. O poço foi perfurado em 1992 e na época a profundidade do nível d' água era de 51 m. Observa-se o rebaixamento do nível potenciométrico no poço e o inexpressivo efeito da recarga pela precipitação (variação ao longo do ano 2005).

No Estado de Pernambuco, a gestão de águas subterrâneas é exercida, com base na legislação mencionada anteriormente, conjuntamente pela CPRH (Agência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco) e SRH (Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco, criada pela Lei nº 13.205 de 19 de janeiro de 2007), que são responsáveis pela concessão das licenças de instalação e operação de poços. A análise dos pleitos para a concessão das licenças baseia-se no zoneamento de exploração em vigor (Resolução CRH (Conselho Estadual de Recursos Hídricos) nº04 de 20 de novembro de 2003). Apesar do moderno arcabouço legal e institucional, o efetivo gerenciamento vem enfrentado problemas devido a dificuldades operacionais, como reduzido contingente de pessoal para fiscalização e ausência de rede de monitoramento de águas subterrâneas. A Tabela 3 ilustra o número de licenças de operação de poços emitidas no Estado de Pernambuco em relação ao total de outorgas no Estado. Pernambuco possui 33 empresas cadastradas de perfuração de poços (<http://www.perfuradores.com.br>, acessado em 16 de abril de 2009).

Tabela 3 - Percentagem de outorgas de águas subterrâneas liberadas em relação ao número total de outorgas no Estado de Pernambuco.

Ano	nº de outorgas	Água subterrânea	%
Até 2004	95107	21874	23,0
2005	3570	629	17,6
2006	1991	292	14,7
2007	426	313	73,5

Salinização de águas subterrâneas

A preocupação com o risco de intrusão marinha na RMR e salinização de alguns poços ocorrida desde a década de 70 incentivou a realização de diversas pesquisas. Além da intrusão marinha, podem ser apontadas outras causas para o problema da salinização de alguns poços na Planície do Recife, como a contaminação vertical, proveniente das camadas superiores salinizadas de antigos mangues, ou proveniente do estuário dos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió que, nos seus trechos finais, sofrem o efeito das marés. A primeira hipótese foi indicada como conclusão de investigação realizada por Costa Filho et al. (1998), com base na análise hidroquímica e de isótopos ambientais em 45 amostras de águas subterrâneas.

Em relação ao aquífero Cabo, a área que oferece maior vulnerabilidade à salinização é a dos bairros de Boa Viagem e Pina, em Recife, e Piedade, em Jaboatão dos Guararapes, por sofrerem uma exploração mais intensa que as demais e estar localizada próxima à costa. Muitos poços da região já vêm sendo abandonados por apresentarem teores de sais elevados, o que aumenta os riscos de salinização por contaminação vertical, pois esses poços tornam-se canais de conexão com o aquífero sobreposto (Boa Viagem) mais salinizado, devido às influências de antigos mangues, de águas antigas que tenham se acumulado em períodos pretéritos de transgressão ou regressão marinha, do estuário dos rios, ou até de esgotos in situ. Além disso, poços com defeitos de cimentação podem funcionar como condutores para as águas da formação superior para a formação inferior. A diminuição do nível potenciométrico do aquífero inferior também pode incrementar a drenagem vertical a partir do aquífero superior, pelo incremento no gradiente hidráulico.

METODOLOGIAS DE ESTUDO DA SALINIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM AQUÍFEROS COSTEIROS

Dentre as técnicas de investigação da salinização de aquíferos costeiros destaca-se a análise de amostras de água coletadas em poços, que se enquadra em umas das três categorias de abordagens destacadas por Langevin et al. (2007). As amostras podem ser analisadas para determinação de condutividade elétrica, íons e isótopos estáveis. Destaca-se que em aquíferos costeiros a investigação dos aspectos

tos químicos é mais importante devido às rápidas mudanças hidroquímicas que podem ocorrer. Para a investigação se a causa da salinidade é de origem marinha, produzida pela intrusão, além das concentrações de alguns íons, algumas razões iônicas são utilizadas. As razões químicas da água do mar podem ser consideradas constantes. Algumas das razões iônicas mais comuns no estudo da intrusão salina são (López Geta et al., 1988):

- $rCl/rHCO_3$: o valor desse índice na água do mar é da ordem de 20 a 50 e na água doce entre 0,1 e 5.
- $rMg+2/rCa+2$: na água do mar essa relação atinge valores de 5 e na água doce é cerca de 0,3 a 1,5.

As concentrações nas relações anteriores são dadas em meq/L.

Walraevens e Van Camp (2004) indicam a comparação do código de troca catiônica ($Na^+K^+Mg^{+2}$) com $(1/2 Cl)^2$ (em meq/L) para identificação de salinização em aquíferos costeiros. O déficit de cátions marinhos é identificado quando $(Na^+K^+Mg^{+2}) < (1/2 Cl)^2$ e indica troca catiônica por salinização.

Os isótopos ambientais estáveis também vêm sendo bastante utilizados na investigação da origem da água subterrânea. A maioria dos isótopos estáveis não reage quimicamente no ambiente subsuperficial e são utilizados para determinação da fonte da água subterrânea e grau de mistura entre águas de diferentes origens. Os isótopos estáveis mais comuns usados na análise hidrológica são o ^{18}O e 2H (conhecido como Deutério ou D).

Na presente investigação foi realizado monitoramento hidroquímico, com acompanhamento da salinidade da água em poços selecionados.

MONITORAMENTO HIDROQUÍMICO DOS AQUÍFEROS NA PLANÍCIE DO RECIFE

Para investigação da origem e dinâmica da salinização nos aquíferos Cabo e Boa Viagem, procedeu-se a um programa de monitoramento, que teve início em maio de 1999. A princípio, apenas os poços da Zona Sul foram investigados, incluindo os bairros de Pina, Boa Viagem e Piedade (Jaboatão dos Guararapes), onde está concentrado grande número de poços em operação. Poços em bairros não localizados na faixa costeira, mas com relativo

grande número de poços em operação também foram investigados, mas não com a frequência dos poços da faixa costeira.

Para a seleção dos poços para o programa de monitoramento foram buscados subsídios em um cadastro da CPRH (Agência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco), órgão responsável pelo licenciamento dos poços. Os poços foram monitorados com frequência individualizada. Para todos os poços e em todas as campanhas foi determinada a condutividade elétrica da água subterrânea, como medida da salinidade. Para alguns poços e em algumas campanhas foram realizadas análises físico-químicas completas.

Na seleção dos poços monitorados, foram adotados os seguintes critérios:

- busca por poços já instalados, preferencialmente os que possuem informações como profundidade, perfis construtivo e litológico, próximos à linha da costa ou próximo às margens dos rios;
- poços que fazem parte de uma das zonas conhecidamente salinizadas ou que estejam próximos a uma delas. Essas zonas foram identificadas pelo próprio monitoramento;
- poços novos.

As amostras foram coletadas de acordo com procedimentos do "Standard Methods for Examination of Water and Wastewaters" (ALPHA/AW-WA/WEF, 1992) em garrafas plásticas. A condutividade elétrica foi determinada no campo, através de condutivímetro portátil, previamente calibrado em laboratório. As amostras coletadas foram armazenadas à 4° C e preservadas quando necessário.

O monitoramento teve início efetivo em maio de 1999 e foram realizadas 29 campanhas nos bairros da faixa costeira (Boa Viagem, Pina e Piedade). A faixa monitorada possui cerca de 10 km de extensão e 300 m de largura. Na faixa costeira, um total de 100 poços foram monitorados (Tabela 4). Os poços monitorados têm profundidade variável e embora a maioria sejam de poços profundos (>50 m) inseridos no aquífero inferior (Cabo), foram selecionados também alguns poços rasos do aquífero Boa Viagem. Do total de poços monitorados, pelo menos 22 foram desativados durante o período, seja por rebaixamento excessivo do nível, seja por salinidade elevada (cerca de 18). O acesso às informações sobre os poços ainda é difícil, uma vez que alguns condomínios não têm sua situação regularizada no órgão gestor, e por vezes, por receio da penalidade

pela clandestinidade, não fornecem informações. Não se tem informação precisa, mas a maioria dos poços que deixou de operar foram simplesmente abandonados, sem a necessária desativação por cimentação do poço, o que pode representar um risco a mais para o sistema.

Tabela 4 - Principais características do monitoramento da salinidade (CE - condutividade elétrica) em poços.

Número de poços monitorados	100
Número de poços com profundidade conhecida	90
Número de campanhas de medição (maio/99 - julho/2007)	29
Número de poços desativados no período de amostragem	22
Número de análises amostradas (CE)	895

A Figura 1 apresenta distribuição de frequência das profundidades dos poços monitorados em Boa Viagem, Pina e Piedade. Os poços selecionados na faixa costeira foram monitorados com frequência individualizada, estabelecida em função da variação da condutividade elétrica e dos íons ao longo do tempo e da magnitude desses parâmetros. Assim, os poços que nas primeiras amostragens apresentaram valores críticos de um dos elementos analisados, ou uma tendência ao incremento das concentrações, são monitorados mais intensamente.

Os poços monitorados na faixa costeira apresentaram variação da condutividade elétrica entre 0,01 e 13,78 dS/m. Observa-se a grande amplitude da faixa de condutividade. Foram retirados dessa faixa valores extremos de poços que salinizaram durante o período da investigação, cujos valores de condutividade elétrica nessa condição estiveram entre 27,8 e 36,5 dS/m.

As análises mais detalhadas do ponto de vista químico foram realizadas em alguns poços nas amostras coletadas nos meses junho, agosto e setembro de 1999, novembro de 2001, maio de 2002 (Costa et al., 2003) e dezembro de 2004, abril de 2006 e julho de 2007. A Tabela 5 apresenta as faixas de variação dos íons analisados em amostras de 16 poços, durante três campanhas sucessivas (junho, agosto e setembro de 1999). As faixas de valores dos íons analisados apresentaram pequena variação de junho a setembro de 1999, embora as faixas sejam bem amplas. As faixas de condutividade elétrica sofreram alteração mais expressiva entre junho e agosto.

Tabela 5 - Faixa de variação de íons e condutividade elétrica em poços selecionados em alguns períodos.

ÍON (mg/L)	Jun/1999	Ago/1999	Set/1999
Ca ⁺²	0,13-153,9	0,07-139,1	0,48-140,0
Mg ⁺²	0,51-110,7	0,52-94,1	0,66-82,3
Na ⁺	8,18-120,0	8,85-189,1	9,98-320,0
Cl ⁻	15,0-193,0		14,0-212,0
K ⁺		2,99-19,59	
HCO ₃ ⁻	0-307,5		
CE (dS/m)	0,12-1,24	0,17-2,69	0,18-2,69

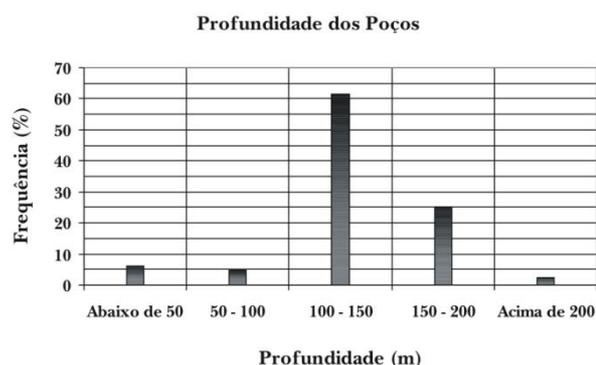


Figura 1 - Distribuição de frequência das profundidades dos poços monitorados.

A Tabela 6 apresenta a condutividade elétrica e as razões iônicas para a água em um dos poços monitorados no período do estudo. Observa-se que ao longo do período não houve alteração significativa da hidroquímica da água do poço.

Durante o período do monitoramento, não foi identificado um padrão de aumento de salinidade. Podem ser destacados alguns fatores que influenciam uma tendência de aumento da salinidade na área. A proximidade dos poços tem grande influência, visto que alguns quarteirões apresentam uma grande densidade de poços e a vazão total bombeada é elevada, intensificando, portanto, os gradientes hidráulicos vertical e horizontal. Outro fator importante é a impermeabilização do solo. Foi identificado um poço onde houve uma provável recarga devido ao período de intensas precipitações ocorridas no ano de 2000 (Tabela 7) (Figura 2). O poço N possui cerca de 50m de profundidade e está localizado próximo a uma área com menor efeito da impermeabilização e com características arenosas. Este poço está em operação há mais de 10 anos. A mesma alteração não foi notada para os outros poços, o

Tabela 6 - Condutividade elétrica e razões iônicas em poço monitorado (Poço B)

	ago/99	nov/01	mar/02	dez/04	abr/06	jul/07
CE (dS/m)	0,77	0,77	0,79	0,65	0,52	0,63
Cl (mg/L)	49,00	42,90	56,10	51,50	54,00	45,00
rCl / rHCO ₃	12,43	0,19	0,24	0,29	0,25	0,23
rK / rNa	0,04	0,05	0,136	0,03	0,03	0,03
rMg / rCa	1,33	2,15	1,00	0,98	0,72	3,03
rHCO ₃ /rMg	0,45	8,33	16,09	14,61	24,03	18,52
rHCO ₃ /rCa	0,60	17,89	16,08	14,38	17,20	56,18
(Na+K+Mg)corrigido	2,68	4,93	5,55	4,33	4,62	4,78
(1/2Cl) ²	0,83	0,78	0,89	0,85	0,87	0,80

que mostra a dificuldade de recarga em áreas altamente urbanizadas, mais um agravante à salinização. A diminuição da salinidade foi observada em outros poços, que logo em seguida ao início da perfuração apresentavam altas concentrações. O acompanhamento de alguns desses poços identificou que o efeito do bombeamento produziu a diminuição da salinidade. Em alguns poços com salinidade elevada foi identificada oscilação dos valores durante o período do monitoramento. Alguns poços profundos apresentam águas com salinidade superior a poços rasos próximos. A Figura 2 também ilustra a variação da condutividade elétrica em um poço (Poço SE), com 154m de profundidade.

Tabela 7 - Totais anuais de precipitação em Recife no período em estudo.

ANO	P(mm)
1998	1255,0
1999	1447,0
2000	3391,1
2001	1655,5
2002	2092,6
2003	2078,2
2004	2239,7
2005	1789,0
2006	1783,0
2007	1956,0

A Tabela 8 apresenta os valores das razões iônicas em dois poços durante o período de observação. No poço EM a água salinizou e foi desativado. Os valores de abril de 2006 são relativos a um poço raso no mesmo edifício que passou a ser utilizado em razão da salinização da água do poço profundo.

No poço MY também apresentou processo de salinização crescente. Os valores de cloreto, a comparação entre (Na⁺+K⁺+Mg²⁺) e (1/2Cl)² e a razão r-Cl/rHCO₃ indicam a possibilidade de intrusão marinha.

A Figura 3 apresenta o histograma de frequência relativa da condutividade elétrica da água em todos os poços monitorados durante todo o período do estudo. Observa-se que as maiores salinidades ocorrem em baixa frequência relativa. No entanto, há que se destacar que a salinidade elevada indica por vezes que o poço foi desativado e, portanto, não faz mais parte do monitoramento. Kelly (2006) destaca a hidroquímica como uma ferramenta reativa e não de predição. Ou seja, não se pode prever o processo de salinização, seja por intrusão marinha ou qualquer outro processo, através do monitoramento hidroquímico, apenas constatar sua ocorrência.

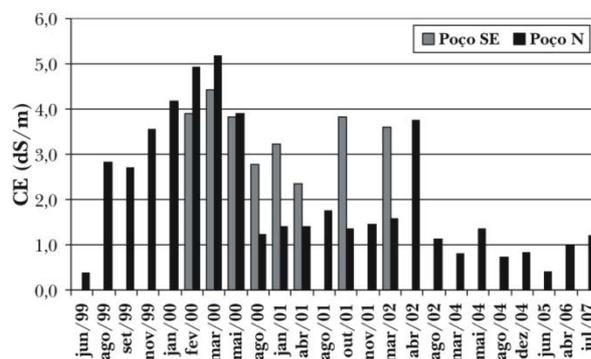


Figura 2 - Variação de condutividade elétrica em dois poços monitorados. a) Poço N, possível efeito de recarga; b) Poço SE, abandonado por salinização.

Tabela 8 - Razões iônicas em dois poços
(poço EM substituído por outro raso no mesmo local a partir de dezembro de 2004)

	Poço EM					Poço MY		
	out/00	nov/00	mar/02	dez/04	abr/06	fev/00	mai/00	mar/02
CE (dS/m)	0,63	1,48	1,49	28,40	0,80	0,51	0,34	6,70
Cl (mg/L)	147,5	244,9	387,8	8431,4	100,0	9,00	60,00	1938,80
rCl/rHCO ₃	3,70	7,84	13,16	73,68	0,40	NE	NE	37,25
rMg/rCa	1,15	1,25	1,15	2,77	0,36	NE	NE	0,14
(Na+K+Mg)corrigido	0,67	0,71	-1,75	-33,24	1,97	NE	NE	-9,46
(1/2Cl) ²	1,44	1,86	2,34	10,90	1,19	NE	NE	5,23

NE: não medido

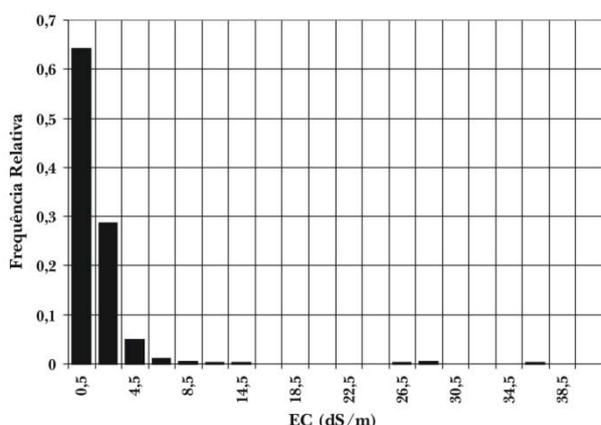


Figura 3 - Histograma de frequência da condutividade elétrica.

Os resultados indicam que poços estão salinizando e uma possível causa é a intrusão marinha, mas não se pode confirmar totalmente essa hipótese pela ausência de um padrão ou a identificação da posição da interface. O fato de alguns poços estarem salinizando próximos a poços com comportamento distintos pode estar relacionado à ocorrência de ‘upconning’, ou seja, a interface estaria abaixo da zona de captação da água pelo poço, mas pelo efeito do bombeamento sofreria uma ascensão localizada. A influência de paleomangues, ou de águas antigas salinizadas também não pode ser descartada. Em alguns poços, nota-se também um efeito de mistura de água doce com água salina. Análise de isótopos estáveis realizada em 16 amostras de poços rasos e profundos da área de estudo sugeriu uma mistura entre água doce e água salina em alguns poços, tan-

to rasos como profundos, embora sem precisar qual a origem dessa água salina (Lima et al., 2003). A análise de isótopos estáveis, $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{D}$, suporta a hipótese da interconexão entre os aquíferos Cabo e Boa Viagem como consequência de defeitos construtivos em poços, além da camada semi-permeável. A partir da assinatura isotópica pode ser dito que a água subterrânea no sistema tem três componentes: a água advinda da recarga de água doce, águas antigas evaporadas e águas salinas. O resultado do estudo aponta para a necessidade de mais investigações.

Monitoramento hidroquímico e análise de razões iônicas têm sido bastante utilizados em estudos para identificação de intrusão marinha em aquíferos costeiros (e.g. Lee e Song, 2007), mas Kelly (2006) destaca que outros indicadores devem ser usados quando outras fontes de salinidade podem estar presentes, para que seja detectada a ocorrência ou não da intrusão e sugere a análise de níveis potenciométricos como ferramenta de predição.

É fato, que em áreas costeiras com grande pressão sob os recursos hídricos subterrâneos, é necessário o emprego de ferramentas de monitoramento e de predição para o estudo da intrusão marinha. No Nordeste do Brasil, em particular, grandes centros urbanos estão situados em formações sedimentares e utilizam água subterrânea como importante fonte de suprimento, colocando em risco as reservas e aumentando o risco de intrusão marinha. Rocha et al. (2004) também usaram razões iônicas para analisar a evolução da salinização nas águas subterrâneas de Maceió (AL). Foi observado que a desativação de alguns poços salinizados e a consequente redução de vazão de exploração produziram impacto significativo nos níveis de cloreto (redução).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclusões

A investigação da salinidade da água subterrânea através do programa de monitoramento iniciado em 1999 vem gerando importantes contribuições tais como a identificação de “manchas” salinas nessa região. No entanto, ainda não se tem uma conclusão definitiva sobre a dinâmica da salinização no sistema aquífero. Observa-se comportamento diversificado da salinidade nos poços monitorados na faixa costeira, nos bairros de Boa Viagem e Pina com grande concentração de poços em operação, em condomínios e hotéis. Em alguns casos, a salinidade apesar de elevada é estável. Em outros casos, o nível de salinidade é crescente. Há casos em que a salinidade diminui, atribuindo-se a duas possíveis causas: recarga e circulação por bombeamento. O monitoramento e a análise realizados acenam para a existência de uma faixa próxima à linha da costa onde a salinidade das águas subterrâneas é mais alta do que nos poços mais afastados em direção ao continente. Isso poderia ser um indício da contaminação por intrusão marinha. No entanto, se isto já estivesse ocorrendo estariam sendo notados níveis crescentes de salinidade em todos os poços dessas manchas, o que não foi detectado. Por outro lado, a salinização de poços isoladamente pode ser indicativo de efeito de ‘upconing’ ou de salinização pela conexão com o aquífero superior, através de descontinuidades no aquífero ou por poços mal construídos, por onde poderia estar ocorrendo a intrusão. O longo período de monitoramento, diferente de campanhas isoladas, permite detectar os níveis crescentes da salinidade dos poços, antes dos mesmos serem abandonados.

Perspectivas de gerenciamento

Como perspectivas futuras para o controle da salinização dos aquíferos costeiros na Região Metropolitana do Recife, inseridas no contexto de gerenciamento de águas subterrâneas na região costeira do Estado de Pernambuco, destacam-se:

- a necessidade de cimentação de poços abandonados. Nesse sentido, estudo realizado para a SRH (Secretaria de Recursos Hídricos / PE) (Costa, 2007) indica procedimento adequado.
- a necessidade de pesquisas para investigação da viabilidade técnico-econômica e ambien-

tal da recarga artificial de aquíferos, utilizando diferentes fontes de água, dentre elas as águas pluviais. Estudos preliminares e pesquisas nesse sentido foram iniciados (Gurgel et al., 2007; Silva et al., 2006; Costa., 2000; Leite, 2001). Experimento e simulações matemáticas avaliaram a influência da recarga com água de chuva através de poços de injeção como efetiva para recuperação de nível potenciométrico. A recuperação dos níveis potenciométricos deverá também promover uma diminuição da salinidade pelo efeito de diluição, além de controlar o fluxo continente-oceano;

- a necessidade do monitoramento sistemático das águas subterrâneas, em termos de nível d’água e salinidade, em regiões de intensa exploração. Ações nesse sentido tiveram início em 2004 através de órgão gestor dos recursos hídricos com implantação de estações telemétricas, conforme reportaram Costa et al. (2003). Atualmente, essas estações encontram-se desativadas. Cabe destacar que o monitoramento quali-quantitativo de águas subterrâneas é uma das ações previstas no Subprograma Ampliação do Conhecimento Hidrogeológico do Plano Nacional de Recursos Hídricos (Programa VIII - Programa Nacional de Águas Subterrâneas).
- a gestão participativa dos recursos hídricos, prevista na Lei 9.433 que estabelece a Política e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, está muito mais avançada em termos dos recursos hídricos superficiais, com conselhos de usuários e comitês de bacias hidrográficas estabelecidos. Há que se considerar que em termos de recursos hídricos subterrâneos, a gestão participativa não tem sido efetivamente implementada. Outros países, a exemplo da Espanha, mesmo reconhecendo que a gestão de águas subterrâneas avança atrás da gestão dos recursos hídricos superficiais, têm exemplo de conselhos de usuários desses corpos hídricos (Hernández-Mora, 2007). Acredita-se que a conscientização da comunidade de usuários e dos construtores de poços da situação atual e perspectivas do sistema aquífero em estudo, podem ajudar no gerenciamento do sistema.
- além do monitoramento hidroquímico, destaca-se o acompanhamento dos níveis po-

ten-ciométricos e uso de modelos matemáticos como ferramentas de predição da ocorrência da intrusão marinha.

- estudos adicionais com indicadores do tipo pressão-estado-resposta e mapeamento de vulnerabilidade a intrusão (e.g. Lobo Ferreira et al., 2007) podem também gerar insumos úteis para o processo de tomada de decisão com relação ao gerenciamento de águas subterrâneas na região, a exemplo do zoneamento de exploração que vem sendo utilizado como critério para emissão de outorgas de captação por poços na Planície do Recife.

Outro ponto a considerar é a possível elevação do nível do mar devido ao aquecimento global. Com a elevação do nível do mar, o gradiente de salinidade, e o fluxo correspondente, tenderá um pouco mais para dentro do continente. Com as mudanças climáticas previstas para as próximas décadas, além da subida do nível do mar, haverá também mudanças no regime de chuvas e conseqüentemente redução nas taxas de recarga, piorando ainda mais a situação do avanço da cunha salina. É necessário a realização de um estudo para analisar o efeito das mudanças climáticas sobre a salinização dos aquíferos de Recife, utilizando modelos matemáticos e previsão de cenários de mudanças em precipitação e evaporação. Ainda, poucos estudos enfocando mudanças climáticas e águas subterrâneas foram realizados, apesar da notória preocupação e atividade de investigação científica com relação a impactos de mudanças climáticas. Oliveira et al. (2007) realizaram estudo avaliando o efeito de mudanças climáticas na recarga de aquíferos. A análise identificou uma possível redução na recarga natural de até 45% devido a mudanças no padrão de precipitação.

Destaca-se ainda a importância da integração internacional para avanço do conhecimento e análise de alternativas de gerenciamento para aquíferos costeiros sob risco de salinização. Comparação de aquíferos com tipologias semelhantes e uso de indicadores para avaliação de características como estado-pressão-resposta pode auxiliar na proposição de alternativas de gerenciamento. São encontrados exemplos recentes na literatura com relação a esse tipo de abordagem (e.g. Bocanegra et al., 2007a; Bocanegra et al., 2007b).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro de projetos de pesquisa ao PADCT III/FINEP e ao CT-HIDRO e CNPq, e agradecem também à CPRH (Agência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco), especialmente ao Geólogo Veronilton Farias, pelo acesso às informações, à COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento), e aos moradores e proprietários dos imóveis visitados.

REFERÊNCIAS

- APHA/AWWA/WEF. Standard Methods for Examination of Water and Wastewaters. 18th Ed., Washington, USA. 1992.
- BEAR, J; CHENG, A.; SOREK, S.; OUAZAR, D.; HERRERA, I. Seawater intrusion in coastal aquifers. Springer. 625p. 1999.
- BOCANEGRA, E. M; POLEMIO, M.; MASSONE, H. E.; DRAGONÉ, V.; LIMONI, P.P., FARENGA, M. Indicators and quality classification applied to groundwater management in coastal aquifers: case studies of Mar del Plata (Argentina) and Apudía (Italy). In: W. Sanford, C. Langevin, M. Polemio, P. Povinec (eds). A New Focus on Groundwater - Seawater Interactions. IAHS Publ. 312: 201-210. 2007a.
- BOCANEGRA, E.; SILVA Jr, G. C.; CUSTODIO, E.; MANZANO, M; MONTENEGRO, S.; REYNOLDS-VARGAS, J. Characterization of Iberoamerican coastal aquifers: state of knowledge and management. Proceedings of the International Congress of Hydrogeology (IAH). Lisbon, Portugal. 2007b.
- CABRAL, J.J.S.P.; WROBEL, L.C., MONTENEGRO, A.A. de A. A case study of salt-water intrusion in a long and thin aquifer. International Conference on Boundary Element Technology. Albuquerque, Mexico. 1992.
- CANALES, A. G., GONZÁLES, R. ISLAS, L. Control methods against sea water intrusion in coastal aquifers. Case of Guaymas and Boca Abierta aquifers in Northwest of Mexico. In: The Second International Conference on Salt Water Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring, Modeling and Management (SWICA II), Mérida, Mexico. 2003.
- CONTECNICA. Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica, Volume 7 - Disponibilidade e Situação de Mananciais para abastecimento da RMR. Recife, PE. 1998.

- COSTA (Costa Consultoria e Serviços Ambientais Ltda). Estudo de identificação de causas de salinização e indicação de processo de obstrução de poços salinizados. 190p. 2007.
- COSTA, W.D. e COSTA FILHO, W.D. A gestão dos aquíferos costeiros de Pernambuco. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cuiabá, MT. Cd-rom. 2004.
- COSTA, W.D.; SANTOS, M.V.; COSTA FILHO, W.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; CABRAL, J.J.S.P.; CAVALCANTI, D.J. Monitoramento dos aquíferos costeiros da região do Recife e adjacências - Pernambuco/Brasil. Anais do II Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa. Recife, PE. 2003.
- COSTA, W.D. (Coord.). Estudo Hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes (HIDROREC II). Recife, Junho, 2002.
- COSTA, W.D. Riscos potenciais e reais decorrentes da super-exploração de águas subterrâneas no Recife-PE. XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cd-rom. Fortaleza, CE. 2000.
- COSTA, W.D.; MANOEL FILHO, J.; SANTOS, A.C.; COSTA FILHO, W.D.; MONTEIRO, A.B.; SOUZA, F.J.A. de; LOPES, A.V.G.; SANTOS, A.J.C.; SILVA FILHO, M.C.; SILVA, M.J. da. Estudo Hidrogeológico da Região Metropolitana do Recife - Relatório Técnico. Vol. I, 116p. Convênio IDRC-UFPE-FADE. 1998.
- COSTA FILHO, W.D.; SANTIAGO, M.M.F.; COSTA, W.D.; MENDES FILHO, J. Isótopos Estáveis e a Qualidade das Águas Subterrâneas na Planície do Recife. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cd-rom. São Paulo, SP. 1998.
- DIAMANTINO, C. M. S. Intrusão salina: caracterização da situação na faixa costeira de Portugal Continental e aplicação de um modelo matemático a uma região a Norte de Sines. Dissertação de Mestrado. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal. 143p. 1996.
- FRANÇA, H.P.M.; VASCONCELOS NETO, B.G.M.; ANDRÉ, H.O.; CIRILO, J.A.; CABRAL J.J.S.P. Análise preliminar do comportamento hidrodinâmico e de intrusão marinha no aquífero Beberibe na Região Metropolitana do Recife. 1º Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste. Recife, PE. p.59-71. 1987.
- GURGEL, G. J. de B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CABRAL, J. J. S. P. Modelagem numérica aplicada a análise de medidas de controle da intrusão marinha na região sul da Planície do Recife (PE). RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v.12, p.7-15. 2007.
- HERNANDEZ-MORA, N. Participación Pública en la Gestión de las Águas Subterrâneas: Visión desde la sociedade civil. In: Las Águas Subterrâneas en Espanã ante las Directivas Europeas: Retos y Persperscticas. Publicaciones del Instituto Geológico Y Minero De Espanã. Serie: Hidrogeología Y Aguas Subterraneas, n.26. p.177- 196. 2007.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <http://www.ibge.gov.br> (acesso em 17 de abril de 2009). 2009.
- KELLY, D. J. Development of Seawater Intrusion Protection Regulations. Proceedings 1st SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference. Cagliari- Chia Laguna, Italy. p.135-145. 2006.
- LANGEVIN, C.; SANFORD, W; POLEMIO, M.; POVINEC, P.. A new focus on groundwater-seawater interactions: Background and Summary. In: A new focus on groundwater-seawater interactions. Proceedings of Symposium HS 1001 at IUGG2007, Perugia, July /2007. IAHS Publ. 312: p.3- 10. 2007.
- LEE, J.-Y.; SONG, S.-H. Groundwater chemistry and ionic ratios in a western coastal aquifer of Buan, Korea: implication for seawater intrusion. Geosciences Journal, Vol. 11, No. 3, p. 259-270. 2007.
- LEITE, B.T. Preliminary evaluation of aquifer storage and recovery in the Recife Metropolitan Region, Pernambuco, Brazil. In Proocedings 1st Joint World Congress on Groundwater. Ceará. 2001.
- LIMA, E.S. de; MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A. de A. Environmental isotopes and the analysis of the origin of groundwater in the Cabo aquifer in Recife coastal plain, Pernambuco, Brazil. In: IV South American Symposium on Isotope Geology, Bahia / Salvador. Proceedings of the IV South American Symposium on Isotop Geology. V.1, p.445-448. 2003.
- LIMA FILHO, M.F. Stratigraphic Evolution of the Pernambuco and Paraíba Basin and its Implications for the Development Paleogeography of Northeast of Brazil. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 1999, Lençóis - BA. Vi Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. v.1, p.34-36. 1999.
- LHAMAS, R.; CUSTODIO, E. Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities, Balkema Publishers, The Netherlands. 2003.
- LÓPEZ GETA, J.A.; MENA ONGLÉS, J.M^a; MARTINEZ, P.N.; BONY, C.L.; GONZÁLEZ, G.R. Aspectos Metodologicos en el Estudio de la Intrusion Salina. Instituto Geologico y Minero de España. 1988.
- LOBO FERREIRA, J.P.; CHACHADI, A.G.; DIAMANTINO, C.; HENRIQUES, M.J. Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: part1 - application the Portuguese Monte Gordo aquifer. In: J.P. LOBO FERREIRA and J.M.P. VIEIRA (eds). Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Vulnerability. IAHS Publ. 310: p.161- 171. 2007.
- MANOEL FILHO, J. Exploração de água subterrânea em zona urbana: caso da Grande Recife. Anais do XIII Con-

- gresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cuiabá, MT. CD-rom. 2004.
- MANZANO, M.; CUSTODIO, E.; MEDIAVILLA, C.; MONTES, C. Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands (SW Spain). In: Groundwater intensive use. A. Sahuquillo, J. Capilla, L. Martínez-Cortina y X. Sánchez Vila (eds.). IAH, Selected Papers on Hydrogeology 7: 209-219. BALKE-MA. 2005.
- NOBRE, M. de M.M.; NOBRE, R.C.M. Caracterização hidrogeológica para o uso racional e proteção dos mananciais subterrâneos em Maceió - AL. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.6, n.1, p.7-20. 2001.
- OLIVEIRA, M.M.; NOVO, M.E.; LOBO FERREIRA, J.P. Models to predict the impact of the climate change on aquifer recharge. In: J.P. LOBO FERREIRA and J.M.P. VI-EIRA (eds). Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability. IAHS Publ. 310: p.103- 110. 2007.
- PRIETRO, C.; KOTRONAROU, A; DESTOUNI, G. The influence of temporal hydrological randomness on seawater intrusion in coastal aquifers. Journal of Hydrology v.330, p.285- 300. 2006.
- REILLY, T.E.; GOODMAN, A.S. Analysis of saltwater upconing beneath a pumping well: Journal of Hydrology, v.89, p.169-202. 1985.
- ROCHA, W.J.S. da; CAMPOS, J.E.G.; LIMA, J.C. de. Considerações sobre a evolução da salinização das águas subterrâneas em Maceió - AL. Anais do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luis-MA. Cd-rom. 2004.
- SALTRANS - European Commission Programme: "Energy, Environment and Sustainable Development". Methods For Assessing Salt Intrusion And Transport In Heterogeneous And Fractured Aquifers. Basic principles and concepts for understanding and managing sea water intrusion in coastal aquifers. 24p. 2004.
- SILVA, G.E.S.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; COSTA, L.M.; MONTENEGRO, A.A. da A.; CAVALCANTI, G. Aplicação e modelagem da recarga artificial com águas pluviais para recuperação potenciométrica de aquífero costeiro na Planície do Recife - PE. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.11, n.03, p.1-10. 2006.
- SILVA Jr., G.C.; PIZANI, T.C. Vulnerability assessment in coastal aquifers between Niterói and Rio das Ostras, Rio de Janeiro state, Brazil, Revista Latinoamericana de Hidrogeologia. v.3(2) p.125-133. 2003.
- WALRAEVENS, K.; VAN CAMP, M. Advances in understanding natural groundwater quality controls in coastal aquifers. In: L. Araguás, E. Custódio e M. Manzano (editors). Groundwater and Saline Intrusion. Cartagena, Spain. p.449- 463. 2004.

Groundwater In The Coastal Zone of the Recife Plain: Evolution of the Salinization and Management Perspectives

ABSTRACT

The overexploitation of coastal aquifers, unbalanced with the natural recharge, puts the system under risk of seawater intrusion. The phenomenon causes the aquifer's degradation by turning its groundwater improper for several uses, including human consumption. The aquifer system in the Recife coastal plain (Pernambuco State, Brazil) is composed of two semi-confined aquifers, Cabo and Beberibe, overlaid by a phreatic aquifer, the Boa Viagem. The overexploitation of the coastal aquifers in the Recife coastal plain poses a risk of groundwater salinization, from different causes. Over the past years several wells have presented high levels of salinity, and some of them have been deactivated or simply abandoned, increasing the contamination risk. One of the possible causes for the salinization is seawater intrusion. In the Cabo aquifer, the most exploited of them, salinization may also occur due to connection through tubewells with the upper aquifer, contaminated by sewage, mangroves and river estuaries. The vertical flow between the aquifers through the aquitard is another possible cause for the salinization of the Cabo aquifer. The overexploitation of the aquifer system in the Recife coastal plain has a strong influence in the increasing salinization levels in the groundwater, caused by either connection between aquifers or by seawater intrusion. This paper presents the analysis of the evolution of the groundwater salinity in a highly populated area with the high density of tubewells, where excessive groundwater depletion has been observed and salinization of several wells have been occurring. The monitoring program was initiated in the Cabo and Boa Viagem aquifers. Present practices and perspectives of management of groundwater quantity and quality are also discussed.

Keywords: coastal aquifer, seawater intrusion, hydrochemical monitoring.