

## AUMENTO DO RISCO DE SALINIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA PLANÍCIE DE RECIFE DEVIDO À ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

Anderson Luiz Ribeiro de PAIVA <sup>1</sup>; Jaime Joaquim da Silva Pereira CABRAL <sup>2</sup>; Suzana Maria Gico Lima MONTENEGRO <sup>3</sup>; Antonio Freire COSTA SOBRINHO <sup>4</sup>

**RESUMO** - A cidade do Recife, situada na região costeira do Estado de Pernambuco, poderá ter diversos problemas intensificados devido à elevação do nível do mar. Alguns trabalhos mencionam uma elevação estimada entre 500 a 844 mm até 2095. Os grandes movimentos verticais que ocorrem ao nível dos oceanos provocam alteração no volume de água e no tamanho das bacias oceânicas ao longo do tempo. Recife é uma região estuarina de planície deltaica que apresenta cota média de elevação variando de 2 a 10 m, e entrecortada por vários rios, córregos e mangues, altamente sensível aos movimentos de maré. Os aquíferos sedimentares litorâneos vêm sendo excessivamente explorados, principalmente nas últimas décadas, o que acarretou em grandes rebaixamentos dos níveis potenciométricos, que levou diversos poços a apresentar teores de salinidade acima do padrão de potabilidade. Alguns fatores contribuem para este tipo de contaminação desses aquíferos: problemas na execução da construção dos poços; áreas de mangues; contribuição de rios nos trechos estuarinos; avanço da cunha salina, agravado com o risco da elevação do nível do mar. Pelas baixas cotas, a planície do Recife poderá ter algumas áreas inundadas pelo mar e ainda haverá uma maior penetração de água salgada pelos rios, córregos e mangues.

**ABSTRACT** - The city of Recife, located in the coastal region of Pernambuco state in Brazil, could have problems intensified with the sea level rising. Some studies mention an estimated elevation between 500-844 mm to 2095. Large vertical movements that occur at the level of the oceans cause change in volume of water and the size of ocean basins over time. Recife one of estuarine deltaic plain has an average mean elevation ranging from 2 to 10 m, and is also heavily permeated by several rivers, streams and wetlands is highly sensitive to tide movements. These coastal sedimentary aquifers have been overexploited for last decades, and it resulted in large potentiometric level drawdowns, which led many wells to have salinity levels above the drinking water standards. Some factors contributes to this type of contamination of aquifers: problems in implementing the construction of wells; mangrove areas; contribution of brackish estuarine rivers; advancement of the saline wedge, aggravated with risk of rising sea level. Because of the lower elevations, the Recife plain may have some areas overlapped by sea water and there will be greater penetration of salt water from rivers, streams and wetlands.

**Palavras-chave:** Salinização, Água Subterrânea, Elevação do Nível do Mar.

<sup>1</sup> Prof. Dr., Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia, Caruaru - PE, Brasil. +55(81) 2126-7771. anderson.paiva@ufpe.br

<sup>2</sup> Prof. PhD., Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências – Dept. Engenharia Civil, Recife -PE, Brasil. +55(81) 2126-8223. jcabral@ufpe.br

<sup>3</sup> Profa. PhD., Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências – Dept. Engenharia Civil, Recife -PE, Brasil. +55(81) 2126-7920. suzanam@ufpe.br

<sup>4</sup> Doutorando, Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências – Dept. Engenharia Civil, Recife -PE, Brasil, costasobrinhoaf@gmail.com

# 1 INTRODUÇÃO

A planície de Recife localiza-se na faixa costeira do estado de Pernambuco, Nordeste brasileiro, entre as coordenadas UTM 283000 e 295000 m E e 9098000 e 9215000 m N (Figura 1). Na segunda metade do século XX apresentou um elevado crescimento da população que habita na orla marítima e nas primeiras quadras próximas da orla. Por ser a planície de Recife uma região estuarina de planície deltaica que apresenta cota média de elevação variando de 2 a 10 m, entrecortada por diversos rios, riachos, canais, mangues. Toda essa malha hidrográfica na planície apresenta, em geral, elevado teor salino, mesmo em trechos situados a alguns quilômetros da costa, principalmente na preamar nos períodos de estiagem.

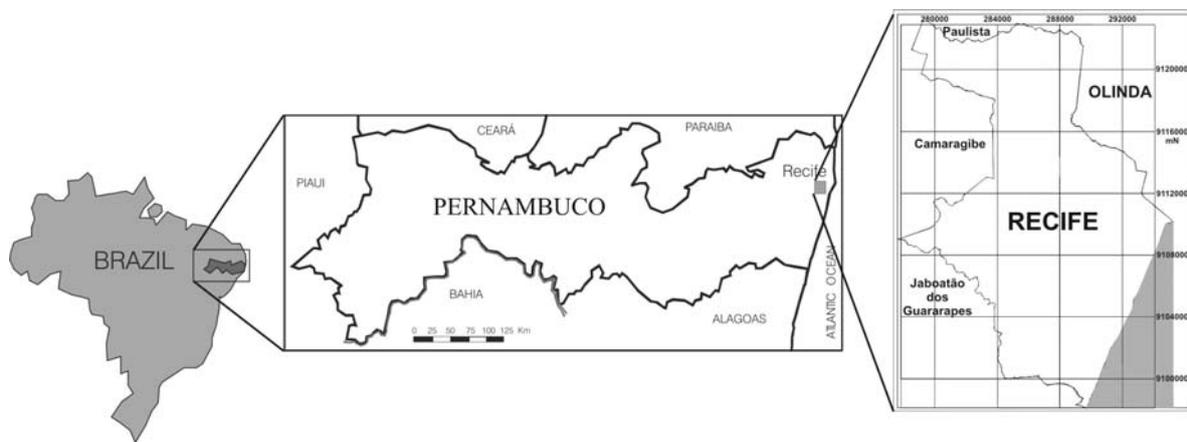


Figura 1. Localização do Estado do Pernambuco e cidade do Recife.

A planície de Recife vem sofrendo desde meados de 1970 diversos problemas devido à acelerada e desorganizada urbanização. Apesar de a região possuir diversos corpos hídricos superficiais, há pouca ou nenhuma condição se aproveitar da água desses mananciais para uso em abastecimento humano. Pois, além do alto teor de sais próximo à costa, também há graves problemas de contaminação desses recursos pelos esgotos domésticos. Para complementar o abastecimento público de água, que não era suficiente para suprir as necessidades da população, muitos poços rasos e profundos foram sendo perfurados, sem nenhum tipo de estudo e de forma desordenada que levou, em diversos locais, as águas subterrâneas começaram um processo de salinização.

A planície de Recife está situada sobre aquíferos sedimentares litorâneos, cuja exploração teve grande incremento de nas duas últimas décadas do século XX, no momento em que a região sofreu com períodos de seca muito intensa, havendo déficits para o abastecimento d'água no Estado como um todo. Foi neste período que ocorreu a corrida para construções de poços, principalmente profundos. Atualmente, a Região Metropolitana do Recife (RMR) possui mais de 12.000 poços perfurados, dentre públicos e privados (em sua maioria), no entanto a Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC), órgão estadual responsável pela emissão de outorgas no estado de

Pernambuco, vem enfrentando grandes desafios para garantir a sustentabilidade hídrica e gestão compartilhada das águas, através da Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos é um dos instrumentos da Política Nacional dos Recursos Hídricos (Lei nº 9433/97) e da Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), instituída pela Lei Estadual nº 11.426/97, atualizada posteriormente pela Lei nº 12.984/05, visando assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos, e o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos. No momento, o Estado de Pernambuco possui aproximadamente 5.000 poços outorgados, dos quais 75% estão localizados na RMR. As mesorregiões do Sertão e Zona da Mata representam 12% e 5%, respectivamente.

Em recente tempo pretérito, esta exploração desordenada ao longo de vários anos acarretou elevados rebaixamentos dos níveis potenciométricos dos aquíferos, que são evidenciados em diversos levantamentos (MONTENEGRO & CABRAL, 2004). Várias regiões, como o bairro de Boa Viagem, na orla, sofreram rebaixamentos acima dos 50 metros. Além do fato dos rebaixamentos apresentados serem elevados, existe o problema de elevada salinidade. Diversos poços nesta malha apresentam teores de salinidade acima do padrão aceitável de potabilidade. Pesquisadores relatam vários fatores que vem contribuindo para a contaminação dessas águas, tais como: problemas na execução da construção dos poços; áreas de mangues; contribuição de rios nos trechos estuarinos; assim como o avanço da cunha salina. Porém, a complexidade da geologia local, resulta numa insuficiência de dados sobre a salinização, apesar dos estudos já realizados em toda a região.

Além dos problemas já relatados, um fator agravante que vem sendo levantado mais recentemente é o risco da elevação do nível médio do mar (*Mean Sea Level – MSL*). Como a cidade está situada em uma planície com baixas cotas, a mesma está susceptível a sofrer maiores danos, pois, atualmente, já sofre com problemas de drenagem urbana e salinização de seus aquíferos, e isto poderá ser intensificado, nas próximas décadas, com a elevação do nível do mar. Alguns trabalhos mencionam uma elevação de aproximadamente 500 a 844 mm, Tabela 1, para até 2095 (CHURCH *et al.*, 2001; WILLIS *et al.*, 2004; CHEN *et al.*, 2006). Isto acarretará um reflexo negativo sobre a malha hidrográfica local, surtindo efeitos diretos sobre a exploração subterrânea, na medida em que haverá maior carga hidráulica do oceano, além de algum avanço sobre áreas da costa. Esta possível elevação do MSL acarretará em uma diminuição e, possível reversão, do gradiente hidráulico do continente para o mar, aumentando a problemática da salinização por intrusão marinha.

No presente artigo são revistas as conjecturas sobre o risco de salinização devido às mudanças climáticas, em especial ao risco de elevação do MSL e a intensidade de bombeamento.

Tabela 1. Estimativas de Aumento no Nível do Mar.

Fator motivador	Autores que estimaram	Valores estimados	Valores Acumulados (1990-2100)
(1) Calotas Polares	MEEHL <i>et al.</i> , 2005	180 a 250 mm/ano	-
(2) Grandes Geleiras	LEMKE <i>et al.</i> , 2007	150 a 370 mm/ano	-
(3) Cumes das Montanhas	CHURCH <i>et al.</i> , 2001	-	600 mm
(4) alterações nas correntes termoalinas	CHURCH <i>et al.</i> , 2001	-	800 mm
(5) pelo efeito termostérico nos oceanos:	CABANES <i>et al.</i> , 2001	3,1 ± 0,4 mm/ano	-
	WILLIS <i>et al.</i> , 2004	3,2 ± 0,2 mm/ano	-
	CHEN <i>et al.</i> , 2006	0,34 a 0,39 (± 0,05) mm/ano	-
	CHURCH <i>et al.</i> , 2001	-	844 mm

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A região costeira da planície de Recife inclui a zona portuária na sua parte central e as praias de Pina e Boa Viagem na sua parte sul. A planície de Recife apresenta cotas baixas (entre 2,0 e 10,0 metros), declividades muito pequenas, e é entrecortada por uma densa malha hidrográfica de rios e riachos que permeiam ao longo da planície e compartilham um estuário comum, Figura 2. Em diversos pontos da região estuarina ocorrem os mangues que se espalham ao longo de áreas consideráveis, e participam da dinâmica do fluxo e refluxo das marés.

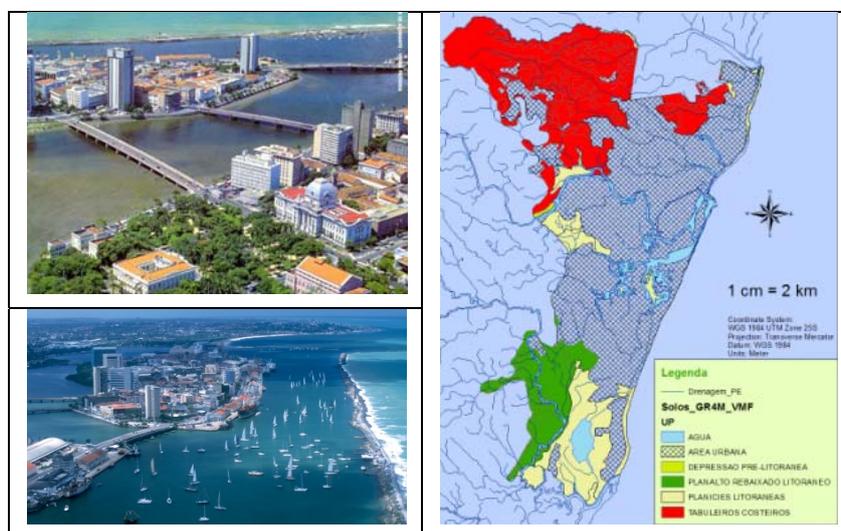


Figura 2. Planície de Recife: rios e ocupação do solo. Fotos: *Google Images* (2014).

O clima da área é quente e úmido, está situada na zona fisiográfica do litoral com precipitação pluviométrica média de 2.450,7 mm/ano, apresentando um período mais chuvoso que vai de março a agosto (sete meses) e um período mais seco, de setembro a fevereiro (cinco meses) com valor médio mensal de 204,2 mm (INMET/3° DISME, 2003).

Com relação à geologia, a planície do Recife está inserida geotectonicamente na bacia sedimentar Pernambuco/Paraíba (norte do Lineamento Pernambuco) e bacia do Cabo (sul do Lineamento Pernambuco). Estas unidades afloram na porção oeste bordejando as duas bacias sedimentares com mergulhos para leste com inclinação de 28m/km. Litologicamente o embasamento é constituído de corpos ígneos, sequência parametamórfica e o complexo gnáissico-migmatítico (MOHRIAK, 2003).

COSTA *et al.* (1998), para efeito da análise sobre alimentação, circulação e exutórios bem como para avaliação das reservas, potencialidades e disponibilidades, consideram o sistema Aquífero Boa Viagem/Beberibe e o sistema Aquífero Boa Viagem/Cabo respectivamente a norte e a sul do Lineamento Pernambuco. Esta subdivisão foi feita devido aos seguintes fatos: o contato entre o Aquífero Boa Viagem com o Aquífero Beberibe e com o Aquífero Cabo é caracterizado por lentes descontínuas areno-argilosas ou silticas-argilosas e não por uma camada impermeável; as recargas para os Aquíferos Beberibe e Cabo é feita principalmente através da filtração vertical procedente do Aquífero Boa Viagem.

### **3 ELEVAÇÃO DO MSL**

#### **3.1 O Aquecimento Global e a Elevação do MSL**

Meehl *et al.* (2005) estudaram de maneira integrada o aumento percentual da temperatura média global do ar na superfície e a conseqüente subida do nível do mar a partir de dois modelos, utilizando valores do período de base 1980 a 1999, para a experiência em que as concentrações de gases de efeito estufa (GEE) e todos os outros constituintes atmosféricos fossem estabilizados no final do século 20 cujos resultados estão representados na Figura 3.

Segundo Van Dam (1999) as alterações climáticas têm causado mudanças no nível do mar ao longo da história geológica. Na atualidade o nível do mar sobe devido aos aumentos das temperaturas que aumentam o volume da água do mar e ainda devido ao derretimento das calotas polares e das geleiras. Muitos desses fluxos das geleiras para o oceano ou lagos ocorre pelo degelo rápido pelo fato de o gelo estão perto da temperatura de fusão (PSMSL, 2011). Projeções feitas no Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2001 e 2007, para o aumento do nível do mar, inferem que durante o século 21, devido ao aquecimento global, o nível do mar continuará a subir, mesmo que os lançamentos de GEE (gases de efeito estufa) estabilizem, devido ao aquecimento imposto por alterações climatológicas do passado. As projeções de aumento do nível do mar no século XXI são apresentadas na Figura 3 (CHURCH *et al.*, 2001).

Segundo Brissos (2008) os grandes movimentos verticais que ocorrem ao nível dos oceanos (MSL), conhecidos como Ciclos Eustáticos, provocam a alteração no volume de água e no tamanho das bacias oceânicas ao longo do tempo. O nível do mar não permanece constante ao longo do tempo, ele pode variar em conseqüência das seguintes causas: (i) Tectono-Eustáticas, que ocorre devido aos movimentos das placas tectônicas; (ii) Termo-Eustáticas, que ocorre em resposta ao

aumento na temperatura da massa de água dos oceanos e mares; (iii) Glácio-Eustáticas, que ocorre durante períodos glaciares, em que parte da água é contida sob a forma de gelo, irá provocar uma diminuição do volume de água e conseqüentemente uma descida do nível do mar. Segundo Van Dam (1999), transgressões e regressões têm ocorrido em toda a história geológica, todas elas em um ritmo muito lento (na ordem de centímetros por século e duraram muitos milhares de anos).

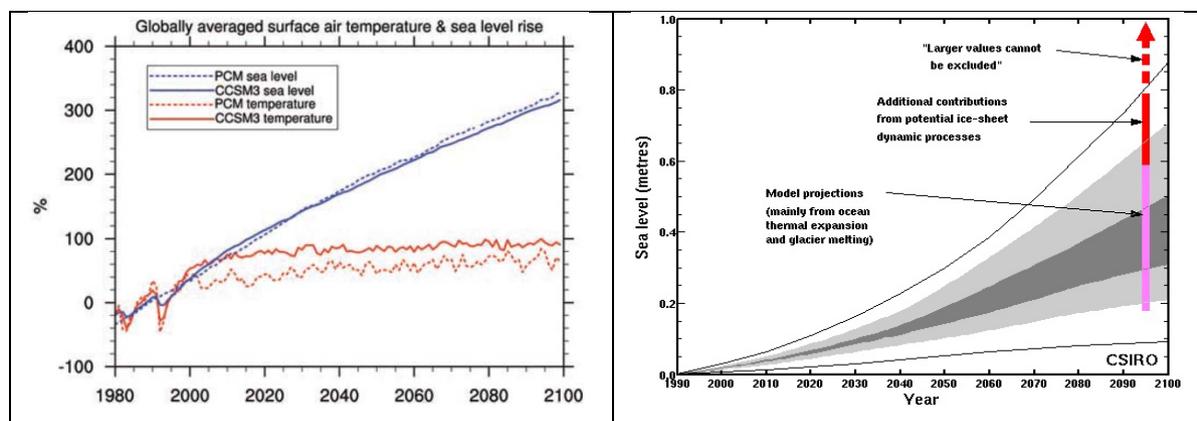


Figura 3. Estimativa de elevação de temperatura do ar e MSL, entre 1980-1999. (MEEHL, 2005; CHURCH *et al.*, 2001).

O fenômeno para o qual o mundo está atualmente caminhando, seria do tipo (ii) e o inverso da (iii), pois ao invés de congelamento, está em progresso um degelo das calotas polares e dos cumes congelados das montanhas, devido ao aquecimento global. E tudo isto, certamente, levará a um aumento no MSL, que é estimado em torno de 844 mm na vertical, conforme visto na Tabela 1. E tal subida no nível, implicará em aumento da carga hidráulica (CH) do lado do oceano, além de um avanço horizontal sobre áreas com baixas cotas, como muitas que são encontradas na planície de Recife.

### 3.3 Influências das Marés na planície do Recife

O incremento de um volume substancial de água de degelo aos oceanos, juntamente com as expansões térmicas, certamente fará com que o nível do mar suba de forma significativa, levando os oceanos a avanços dos limites sobre áreas litorâneas de baixo relevo, Figura 4, como é o caso da Planície de Recife, que é uma região que apresenta cotas de elevação variando na média de 2 a 10m, sendo ainda entrecortada por vários rios e córregos que são altamente sensíveis aos movimentos de maré.

Em recente estudo, Costa *et al.* (2010) concluíram que os resultados indicavam que para um cenário otimista de aumento de 500 mm no nível do mar, pelo menos, 39,32 km<sup>2</sup> de área dos municípios (Figura 6) viria a ser zonas de inundação potencial. Em um cenário de elevação crítica do nível do mar (1.000 mm), este valor seria aumentado para 53,69 km<sup>2</sup>. Para o presente estudo esta

área inundada será o problema não apenas pela possível perda de moradias e terrenos nas áreas atingidas, mas porque estas áreas invadidas por água salgada poderão atingir as águas subterrâneas, trazendo contaminação por salinização. Como os aquíferos que abastecem a RMR estão localizados, sob estes trechos ocupados pelo mar, no aquífero (livre) Boa Viagem, a situação é preocupante. Devido as interconexões conhecidas entre os aquíferos Boa Viagem com os aquíferos profundos Beberibe e Cabo, os problemas poderão se alastrar por grande parte das águas subterrâneas na área litorânea.

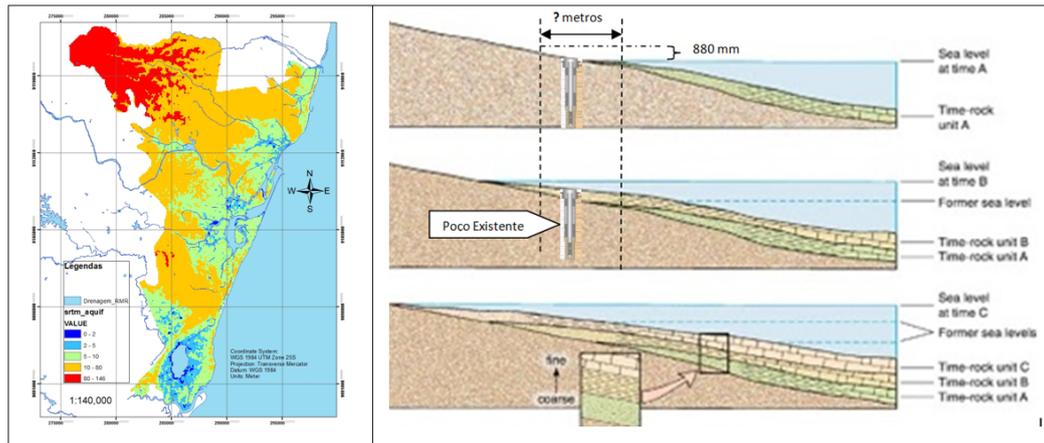


Figura 4. O mapa da esquerda mostra as áreas ocupadas pela elevação do MSL (azuis) e a sequência de figuras da direita mostra possíveis consequências da subida vertical e horizontal do MSL. Adaptado de Levin (2005)

#### 4 RISCO DE SALINIZAÇÃO

Há varias maneiras de um aquífero vir a ser salinizado e entre elas, serão citados as mais comuns: (a) pode ocorrer devido ao excesso de exploração em regiões de irrigação que sejam abundantemente adubadas ou pulverizadas com defensivos químicos; (b) pode ocorrer pelo *upconing* ( *elevação*) devido ao bombeamento intenso em camadas que possuem águas salgadas antigas sotopostas, que foram depositadas em épocas muito antigas quando o mar invadiu algumas partes continentais, fato este de ocorrência já comprovada geologicamente; (c) pode ocorrer devido ao bombeamento acima da capacidade de reposição nos aquíferos próximos a costa, que leva a um aumento no gradiente do mar em direção ao continente, gerando um desequilíbrio de forças na interface *freshwater/saltwater* que passa a avançar na direção do aquífero na terra; (d) pode ocorrer pelo *upconing* por bombeamento excessivo em região do aquífero que fica sobre a cunha de água do mar; (e) pode ocorrer devido a *tsunamis*, que levam grandes massas de água salgada a invadir solos próximos, e por vezes bastante interiores, ocupando locais de recarga dos aquíferos. A situação se torna mais grave quando estes aquíferos são livres e o solo possui alta condutividade hidráulica vertical; (e) pode ocorrer ainda em regiões áridas e semi-áridas, onde os solos possuem uma tendência à salinização muito forte devido à desagregação das rochas que são lavadas pelas

águas das precipitações, carreando os sais da decomposição que se acumulam no subsolo em terrenos de aluvião. Se a exploração destes aquíferos for intensa, pode levar a um aumento na salinização destes aquíferos.

No entanto, a forma mais comum entre estas é a que ocorre pela intrusão da água do mar, e exemplos de situações como estas são encontradas em praticamente todas as regiões costeiras pelo mundo. Por exemplo, Liu & Song (2010) relatam que a exploração excessiva nos anos oitenta trouxeram danos as águas subterrâneas, devido à intrusão salina na baía de Bohai e no mar de Huanghai, nas cidades e províncias de Liaoning, Hebei, Shandong, Jiangxi, Tianjin Shanghai, Guangxi, na China. Segundo estes autores, a dimensão da intrusão salina alcançou 970 km<sup>2</sup> em 1995, e o dano potencial na área alcançou 2.400 km<sup>2</sup> em situações em que o nível de água subterrânea ao longo do continente era mais baixo do que o nível do mar. Casos como este levam a grandes perdas no sentido econômico e social, pois, relata-se que 400 mil pessoas enfrentam a crise da água de beber, 8 mil poços foram abandonados, 40 mil hectares de terra perderam a capacidade da irrigação.

#### **4.1 A Elevação no Nível do Mar e os Aquíferos Costeiros**

Supondo que os outros fatores que geram o equilíbrio na interface entre a água doce e a água salgada não sofressem alterações, sendo alterado apenas o nível atual do mar, com uma subida em torno de 844 mm, isto ocasionaria um aumento na carga hidráulica do oceano, resultando em uma redução no gradiente continente em direção ao mar, podendo haver até reversão deste. Assim a interface água doce/água salgada seria empurrada para o interior do aquífero, na medida em que este gradiente se reduza, e quanto maior seja a redução maior será o avanço da cunha em direção ao continente.

A situação pode se agravar se outro fator for adicionado neste balanço de forças. Este fator seria a diminuição do gradiente do aquífero do continente em direção ao mar, que pode ser ocasionado por fatores como: (a) diminuição na recarga devido à impermeabilização dos solos em locais de recarga e (b) excesso de exploração, dos aquíferos costeiros, e é ainda mais grave se o terreno próximo a costa for de relevo baixo em relação ao MSL, e no caso do novo nível do mar superar a altitude deste solo, o mar passaria a ocupar este terreno (COSTA *et al.*, 2010), e ainda mais se este solo tiver alta condutividade hidráulica vertical, ou áreas de comunicação com aquíferos confinados profundos, quer seja por falhas geológicas, ou por poços ativos ou abandonados, ou furos (escavações profundas sem os critérios de construção recomendados para serem classificados como poços). Nesta situação, a água do mar encontraria rapidamente os aquíferos livres e profundos levando à sua salinização.

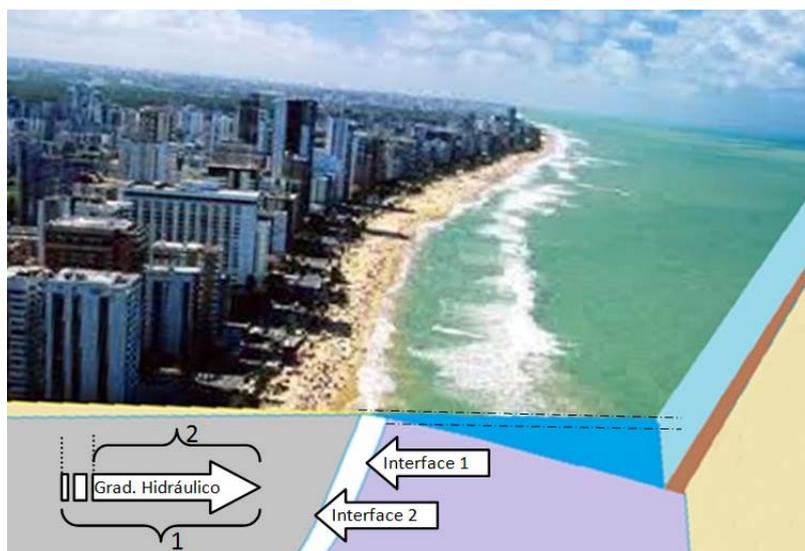


Figura 5. Avanço da Interface e Redução do Gradiente Hidráulico (1) Antes e (2) Depois.

#### 4.2 A RMR e seus Aquíferos Costeiros

A RMR está localizada em uma planície estuarina, basicamente sobre as formações Cabo, Beberibe e Barreiras, onde encontram-se sobre estas algumas deposições como sedimentos de mangues, flúvio-lagunares, sedimentos diversos, aluvionares, de praia, terraços marinhos holocênicos e pleistocênicos e, sedimentos indiferenciados, de diversas origens: Marinho, Fluvial, Mangues, Coluvial, conforme mostrado na figura 7 e 8. Predomina, como tipo morfológico principal, áreas baixas com cotas inferiores a 10 m, sendo constituída, segundo Costa Filho (1994), por depósitos de sedimentos quaternários, que coincidem com as planícies de inundação dos vales de antigos rios e riachos, que recobrem, sul), as bacias sedimentares costeiras Pernambuco (a norte) e Cabo (a separada pelo divisor estrutural Lineamento Pernambuco. Assim sendo, se desenvolveram aquíferos com características hidrodinâmicas distintas.

A Região Metropolitana do Recife corresponde a uma faixa costeira com aproximadamente 2.500 km<sup>2</sup> banhada pelas bacias hidrográficas dos rios Botafogo, Beberibe, Capibaribe, Jaboatão, Pirapama e Ipojuca. Sua pluviosidade média anual fica em torno de 2450,7 mm, com maiores índices pluviométricos no período de março a agosto. Cerca de 10% dessa água se infiltra e alimenta os aquíferos (BATISTA, 1984; OLIVEIRA, 1994; MONTENEGRO & CABRAL, 2004).

Os principais aquíferos que se encontram na RMR, fazem face com as águas marinhas costeiras. São os aquíferos livres, alta permeabilidade e de média permeabilidade, com os parâmetros constantes no Tabela 2, e com nível freático menor que 10 m; aquíferos livres, alta permeabilidade e de média permeabilidade, com nível freático maiores que 20 m; aquífero com produção reduzida e localizada, como mostrado na figura 9, onde, são mostrados alguns poços tubulares profundos, que normalmente retiram água do principal aquífero da RMR, Beberibe Inferior, que originariamente se encontrava protegido da contaminação da superfície por camadas

impermeáveis confinantes. Contudo, poços mal construídos, abandonados ou danificados podem constituir pontos de vulnerabilidade à contaminação das águas desses aquíferos (OLIVEIRA, 1994).

Tabela 2. Coluna lito-estratigráfica e parâmetros hidrodinâmicos (modificado de COSTA, 2002).

Aquíferos →		Boa Viagem	Beberibe	Cabo
Coluna Lito-estratigráfica	Idade	Quaternário	Cretáceo Superior	Cretáceo Inferior
	Espessura média	40 m	100 m	60 m
	Constituição Litológica	Areias, siltes e argilas	Arenitos	Conglomerados arcossianos, arenitos, siltitos e argilitos
Parâmetros Hidrodinâmicos	Transmissividade	$7,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	$2,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	$8,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
	Condutividade Hidráulica	$1,7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$2,2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$1,0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
	Porosidade eficaz	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$7,0 \times 10^{-2}$
	Coefficiente de armazenamento	-	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$
Parâmetros Geométricos	Área	$112 \times 10^6 \text{ m}^2$	$56 \times 10^6 \text{ m}^2$	$35 \times 10^6 \text{ m}^2$
	Espessura saturada	40 m	80 m	60 m

Em particular, a Planície do Recife apresenta também salinização dos aquíferos, onde se verifica área com superexploração. A ausência de camadas confinantes, em alguns pontos dessa área, deixa o aquífero vulnerável à contaminação de superfície, principalmente onde ocorre intenso bombeamento de poços (OLIVEIRA, 1994).

## 5 DISCUSSÃO

No presente artigo foram analisados qualitativamente os efeitos do aumento do MSL tomando em conta os outros fatores que influenciam os aquíferos desta região analisando cada um deles em paralelo com o aumento do MSL.

Entretanto, é conveniente lembrar que nos últimos anos, verificou-se que diversos poços vêm sofrendo com o processo de salinização em vários bairros da planície de Recife, tanto na área das praias, como em bairros centrais. Isto está relatado nos diversos trabalhos já publicados que estudaram esta problemática, mas a complexidade da hidrogeologia local ainda deixa algumas incertezas nos fatores que vem influenciando o aumento da salinidade nos poços, conforme citado, um dos caminhos de propagação da salinização dos poços, é o espaço anelar deixado entre as paredes da perfuração e o revestimento do poço, devido a problemas construtivos.

Com a elevação do nível do mar, haverá o avanço horizontal do mar, principalmente na preamar, e é possível que (i) algumas áreas de recarga e (ii) até mesmo de localização de poços construídos sejam atingidas. Esta é uma grande preocupação, principalmente a (ii) pois levaria a uma rápida contaminação vertical, nos casos de poços abandonados.

A planície do Recife apresenta grandes trechos de mangue e de estuários de rios. Tanto os mangues como os estuários apresentam salinidade elevada, principalmente nos períodos de estiagem, durante a preamar. Com o indicativo de aumento da elevação da água do mar este problema tenderá a ser agravado consideravelmente, pois levaria a salinização dos rios e córregos a avançarem rio acima e pela infiltração do leito, chegaria aos aquíferos.

Nos bairros centrais de Recife, uma causa provável é a infiltração de águas do rio Capibaribe que no trecho final do baixo curso apresenta suas águas misturadas com a água do mar, Figura 6. O bombeamento excessivo dos poços próximos ao rio induz uma recarga do aquífero com águas salinizadas do rio (CABRAL *et al.*, 2004). Os rebaixamentos dos aquíferos Cabo e Beberibe em Recife estão muito acentuados, devido ao bombeamento excessivo o que aumenta os riscos de exaustão do aquífero e de salinização pela intrusão marinha.

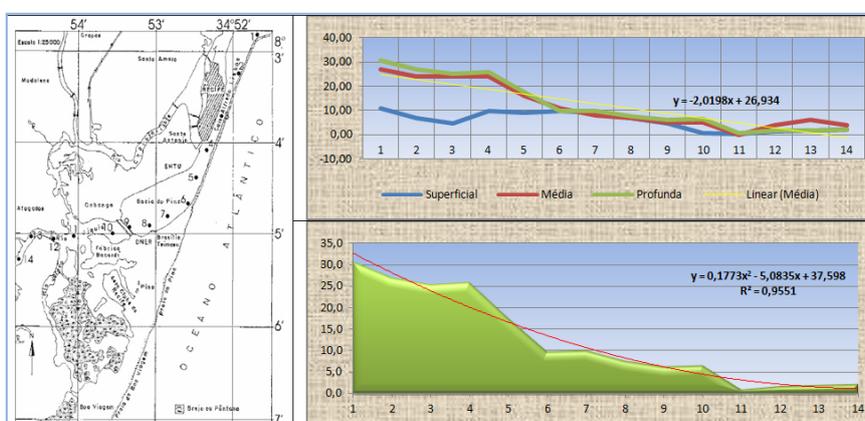


Figura 6. Rio Capibaribe: Estações e Gráficos de Salinização (NASCIMENTO *et al.*, 2003).

Desta forma, esta área inundada será o problema não apenas pela possível perda de moradias e terrenos nas áreas atingidas, mas porque estas áreas invadidas teriam seus poros preenchidos por água salgada e as áreas de recarga do aquífero livre Boa Viagem viriam a ser ocupados pelo mar.

No entanto, o fator que mais causa preocupação, em relação à salinização dos aquíferos da RMR devido ao aumento do MSL, é a combinação entre esse e a retirada excessiva que está sendo praticada que, já encontrava-se em uma crescente de retirada e conseqüente rebaixamento do nível potenciométrico, conforme observado em dados da CPRH plotados no gráfico da Figura 7.

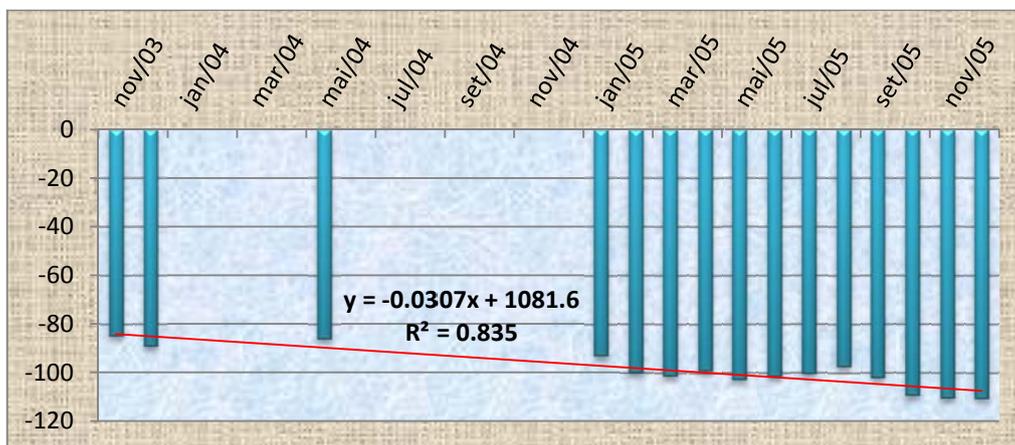


Figura 7. Gráfico do histórico do rebaixamento do nível freático (MONTENEGRO *et al.*, 2005).

Há ainda o agravante de menor quantidade de reposição que vem a ser ocasionada pela ocupação urbana e pelas mudanças no regime das chuvas que, conforme está previsto pelo IPCC, ocorrerá eventos chuvosos que apresentarão grandes intensidades em curtos períodos de tempo, seguidos por longos períodos de estiagem, todos estes fatores e ainda o aumento do MSL, vão contribuir para o avanço da interface salina na direção do continente.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elevação do nível do mar aumentará o risco de salinização dos aquíferos da planície de Recife e é necessário a continuidade do monitoramento das diversas variáveis envolvidas para assegurar um gerenciamento adequado.

É preciso dar continuidade ao detalhamento dos estudos da dinâmica do fluxo e transporte nos aquíferos da planície de Recife como vem sendo feito em outros projetos como por exemplo o projeto Coqueiral em parceria com a CPRM, a USP, a APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima) e algumas entidades da França.

É importante lembrar da necessidade de fiscalização conforme o zoneamento, estabelecido pelo HIDROREC II, e que culminou com Resolução CRH Nº 04/2003, para realizar com cuidado a licença e outorga de novos poços bem como eventualmente exigir a redução nas vazões de bombeamento dos poços existentes conforme preconiza a legislação de água subterrânea do estado de Pernambuco.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, no âmbito do projeto de pesquisa GERAQUI, e pelas bolsas de pós-graduação e PQ. O quarto autor agradece à CAPES pela bolsa de doutorado.

## BIBLIOGRAFIA

- BATISTA, R.P. (1984). Estudo hidrogeológico da planície do Recife-PE. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, 157p., Recife-PE.
- BRISSOS, J. (2008) - Ciclos Eustáticos. Retirado de <http://geostoriaestpal.blogspot.com/2012/11/ciclos-eustaticos.html>; em novembro de 2012.
- CABANES, C.; CAZENAVE, A.; LE PROVOST, C. (2001). Sea level rise during past 40 years. determined from satellite and in situ observations. *Science* 294(5543):840–842. DOI 10.1126/science.1063556.
- CABRAL, J.J.S.P.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; PAIVA, A.L.R.de; FARIAS, V.P. (2004). Groundwater Salinization in the Central Region of Recife (Brazil) due to Brackish Water in Capibaribe River at High Tide. In: 18th Salt Water Intrusion Meeting - SWIM, Cartagena (Murcia), Spain.
- CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D.; HU, X.G. (2006). Thermosteric effects on interannual and long-term global mean sea level changes– *J Geod* 80: 240–247 DOI 10.1007/s00190-006-0055-7
- CHURCH J.A.; GREGORY J.M.; HUYBRECHTS P.; KUHN M.; LAMBECK K.; NHUAN M.T.; QIN D.; WOODWORTH P.L. (2001). Changes in sea level. *Climate Change In: Houghton, JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden P, Dai X, Maskell K, Johnson CI (eds) The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge pp 639–694.*
- COSTA FILHO, W. D. (1997). Estudo Hidroquímico nos aquíferos da Planície do Recife. Dissertação de Mestrado. Recife-PE, UFPE. 225p.
- COSTA, M.B.S.F.; MALLMANN D. L. B.; PONTES P.M.; ARAÚJO, M. (2010). Vulnerability and impacts related to the rising sea level in the Metropolitan Center of Recife, Northeast Brazil *Pan-American Journal of Aquatic Sciences* 5(2): 341-349.
- DOUGLAS, B.C. (1995). Global sea level change: determination and interpretation, U.S. National Report to IUGG, 1991–1994. *Rev Geophys* 33 (Suppl):1425–1432.
- HOUGHTON L.J.T.; MEIRA FILHO, G.; GRIGGS, D.J.; MASKELL, K. (1997). Estabilização atmosférica dos Gases de Efeito Estufa: Implicações Físicas, biológicas e sócio-econômicas. PAINEL Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas IPCC -Technical Paper III, ISBN: 92-9169-102-X.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. 3º DISTRITO DE METEOROLOGIA (DISME) (2003). Boletim com a Normal Climatológica no período 1961 a 1990.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, em <http://www.ipcc.ch/index.htm>, acessada 11/nov/2011.
- LEMKE, P.; J. REN; R.B. ALLEY; I. ALLISON; J. CARRASCO; G. FLATO; Y. FUJII; G. KASER; P. MOTE; R.H. THOMAS; T. ZHANG (2007). Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground, in Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller [eds.], *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York.*
- LEVIN, H. L. (2005) - Ciclos Eustáticos. Retirado de: [http://higheredbcs.wiley.com/legacy/college/levin/0471697435/chap\\_tut/chaps/chapter05-11.html](http://higheredbcs.wiley.com/legacy/college/levin/0471697435/chap_tut/chaps/chapter05-11.html); em novembro de 2012.
- LIU, Q.; SONG R. (2010). Elementary Discussion on Sea Water Intrusion. *Hydrogeology Journal*, 978-1-4244-4713-8/10.

- MEEHL, G. A.; WASHINGTON W. M.; COLLINS W.D.; ARBLASTER J.M.; HU A.; BUJA L.E.; STRAND W.G.; TENG H. (2005). How Much More Global Warming and Sea Level Rise? - by the American Association for the Advancement of Science; all rights reserved. *Science* 307, 1769; DOI: 10.1126/science.1106663.
- MIGUENS, A. P. (1998) Navegação costeira, estimada e em águas restritas. Site do Ministério da Marinha do Brasil, acessado em <[http://www.mar.mil.br/dhn/bhmn/publica\\_manualnav1.html](http://www.mar.mil.br/dhn/bhmn/publica_manualnav1.html)>, 18/10/2011.
- MOHRIAK, W. U. (2003) - Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira Sedimentary Basins of the Brazilian Continental Margin. Cap. III – Petrobras, Parte I – Geologia. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, 87-94. L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.), CPRM, Brasília.
- MONTENEGRO S. G., MONTENEGRO A. A., CAVALCANTI G. L. & MOURA A. E. S. de (2005) - Recarga Artificial De aquíferos Com Águas Pluviais Em Meio Urbano Como Alternativa Para A Recuperação Dos Níveis Potenciométricos: Estudo De Caso Na Planície Do Recife (PE). 5º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva, Teresina, PI (2005).
- MONTENEGRO, S.M.G.L.; CABRAL, J.J.S.P. (2004). Considerações sobre a Salinização dos Aquíferos Costeiros na Planície de Recife. In: Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento. J.J.S.P. Cabral, J.P.C. Lobo Ferreira, S.M.G.L. Montenegro, W.D. Costa (Org.). Editora Universitária, Recife-PE.
- NASCIMENTO et al., (2003) - Disponibilidade Nutricional da Bacia do Pina e Rio Tejipió (Recife-PE- Brasil) Em Relação Aos Nutrientes E Biomassa Primária (Setembro/2000) *Tropical Oceanography – Revista Online - Universidade Federal de Pernambuco Departamento de OceanografiaTropical*, Recife: v. 31, n. 2, p. 149–169
- OLIVEIRA, R.G. de (1994). Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife - Projeto SINGRE; Levantamento Gravimétrico da Área Sedimentar da Região Metropolitana do Recife. Recife: CPRM/FIDEM.
- PSMSL – Permanent Service for Mean Sea Level <, 19/10/2011.
- VAN DAM, J. C. (1999) - Exploitation, Restoration and Management - Chapter 4. In: Bear J, Cheng AHD, Sorek S, Ouazar D, Herrera I (eds) *Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods and practices*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- WILLIS J.K. (2004). Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales. *Journal of Geophysical Research*, V109, C12036, doi:10.1029/2003JC002260.