

CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DO AQUÍFERO COSTEIRO DA ILHA DOS VALADARES, PR (BRASIL) E SUA UTILIZAÇÃO PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO

Eduardo Chemas HINDI^{1, 2}
Ernani Francisco da ROSA FILHO¹
André Virmond Lima BITTENCOURT¹
Jorge Montaño XAVIER³

ABSTRACT

Aquifer characterization in terms of geologic-geomorphological considerations, pumping test and hydrochemistry has been carried out to evaluate the groundwater potential of one of the delicate coastal island systems in Paraná State, Brazil. The Valadares Island, lying in the Atlantic coastal zone, represents a stabilized beach ridge having a thickness of more than 60 m unconsolidated quartz-rich sand. Field and laboratory investigations suggest that this homogeneous coastal aquifer can partially meet the local domestic demand of fresh water even though it is in hydraulic continuity with the estuarine and tidal systems of Paranaguá bay. Efficiency of the aquifer to hold and release water was determined by conducting a pumping test in one of the partially penetrating wells in the island for 24 hrs. The physical, chemical and biological analyses of samples from twelve 5 cm diameter wells of the area have indicated that groundwater needs purification for drinking purpose. It is advocated that the groundwater potential of the island aquifer is worth considering for sustained but controlled exploitation. The aquifer hydraulic properties defined through pumping tests are: specific yield: $5,23 \text{ m}^3/\text{h/m}$; transmissivity: $2,27 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{dia}$ and storage coefficient: $1,92 \times 10^{-1}$.

Key words: Valadares island, coastal aquifer, pumping test, water quality, groundwater potential.

RESUMO

Localizada no Complexo Estuarino de Paranaguá, (PR), a Ilha de Valadares constitui um sistema aquífero livre e homogêneo, formado por sedimentos arenosos muito finos a finos. A captação do aquífero é feita através de poços-ponteira com profundidade média de 6 m, para abastecimento da população residente (22.000 habitantes). Amostras coletadas em 12 poços, mostram predominância dos íons Na^+ , Cl^- e SO_4^{2-} . Nas partes internas da ilha ocorre um aumento relativo das concentrações de HCO_3^- , Ca^{+2} e Mg^{+2} . O pH é ácido (3,76 a 5,5) e os sólidos totais dissolvidos variam de 19 a 182 mg/l. As águas são do tipo cloretada-sódica, passando a cloretada-sulfatada-sódica e cloretada-bicarbonatada-sódica-cálcica, na região central da ilha. Em termos bacteriológicos, 60% das amostras apresentaram coliformes fecais e totais; 25% coliformes totais e 15% estavam isentas dessas bactérias. Com base nestes estudos, foram construídas seis baterias cada uma com quatro poços de 50 mm de diâmetro e 12 m de profundidade e um piezômetro. Os nove metros iniciais foram revestidos com tubos de PVC e os três metros finais por filtro espiralado de aço inoxidável. Testes de aquífero nas baterias resultaram nos seguintes valores médios: vazão específica: $5,23 \text{ m}^3/\text{h/m}$; Transmissividade: $2,27 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{dia}$ e coeficiente de armazenamento: $1,92 \times 10^{-1}$.

Palavras-chave: Ilha dos Valadares, aquífero costeiro, qualidade da água, uso de água subterrânea.

¹ Universidade Federal do Paraná - Departamento de Geologia (Brasil).

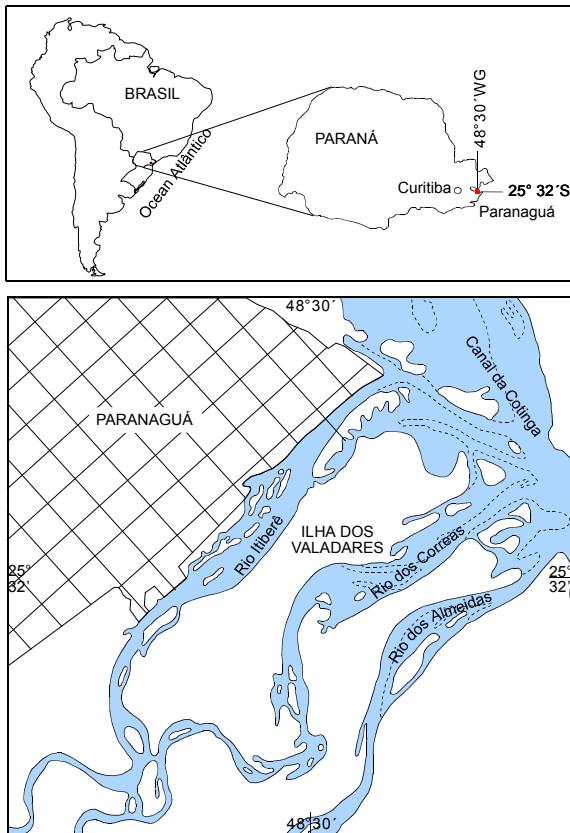
² hindi@ufpr.br; Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas.

³ Universidade de la República del Uruguay (Uruguay).

1. INTRODUÇÃO

Localizada no Complexo Estuarino de Paranaguá, a Ilha de Valadares corresponde a um terraço de construção marinha com altitudes inferiores a 9 m e superfície total de pouco mais de 5 km². A ilha tem forma alongada e largura variando de 0,5 a 1 km. O eixo maior se estende na direção NE medindo cerca de 4 km (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



A ilha limita-se no extremo SW pela confluência dos rios Iberê e dos Correias e no extremo NE, pelo canal da Catinga. O flanco NW da ilha é limitado pela margem direita do rio Iberê e o flanco SE, pela margem esquerda do rio dos Correias. A Ilha está ligada ao continente por de uma passarela sobre o rio Iberê.

Os rios Iberê e dos Correias são canais estuarinos, com profundidades que variam de menos de 1 m até cerca de 5m. Esses canais sofrem influências da maré, manifestadas pela inversão do fluxo das águas, pela inundação das áreas marginais da ilha e por variações na concentração de sólidos dissolvidos.

2. OBJETIVOS DO ESTUDO

A cobertura sedimentar arenosa que forma a ilha constitui um aquífero freático, poroso e homogêneo, cuja reserva hídrica é suficiente para atender, de forma rápida e econômica, a

demanda da população da ilha. No entanto, muitos poços-ponteira construídos pelos moradores da ilha (cerca de 22.000 habitantes), apresentam contaminação por coliformes fecais e totais, causada por efluentes domésticos. Os poços situados nas margens mais baixas e de declive suave captam águas com indícios de contaminação por intrusão salina.

O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar o comportamento hidrodinâmico e hidroquímico do aquífero para viabilizar a exploração sustentada por meio de um sistema piloto de captação de águas subterrâneas, localizado em áreas escolhidas através dos critérios a serem definidos neste estudo, para o abastecimento da população da Ilha dos Valadares, com água dentro dos padrões de potabilidade vigentes.

3. GEOLOGIA LOCAL

A Ilha dos Valadares apresenta duas feições distintas: uma permanente emersa e outra periodicamente inundada pelas marés altas, formando as áreas de mangue e baixios marginais.

A parte emersa é constituída, do topo para a base, por areias eólicas inconsolidadas, bem selecionadas, com granulometria fina a muito fina, sem estruturas sedimentares aparentes seguidas por areias finas a médias, depositadas em ambiente subaquático, (planície de maré), com estruturas sedimentares do tipo cruzada plano paralela, "estruturas de acomodação" e bioturbações. Nas margens dos rios Iberê e dos Correias os afloramentos desse pacote atingem cerca de 6 m de altura. Esse pacote arenoso assenta-se discordantemente sobre as rochas do embasamento cristalino.

De um modo geral, os afloramentos são capeados por uma camada arenosa de coloração variando de cinza a marrom escura, sem estruturas sedimentares, enriquecida em matéria orgânica por processos pedológicos.

Níveis centimétricos de areia cimentada por óxidos de ferro são freqüentes nos afloramentos. Essa carapaça ferruginosa (limonita) aparece acompanhando a base do horizonte húmico sob a forma de laminationes planas sub-horizontais ou camadas corrugadas, estas sem relação com qualquer controle geoquímico. As estruturas aparentes nos níveis limonitzados são epigenéticas, não tendo qualquer relação com os processos sedimentares que formaram a ilha. A origem desses níveis ferruginosos está ligada a processos pedológicos que causaram a dissolução de minerais ricos em ferro que, carreados pelas águas de infiltração, acabaram precipitando ao atingirem um ambiente oxidante nas bordas da ilha, formando os referidos níveis.

As áreas periodicamente inundadas pelas marés são cobertas por sedimentos arenosargilosos, de coloração cinza escura enriquecidos em matéria orgânica.

4. HIDROGEOLOGIA LOCAL

O sistema aquífero da Ilha dos Valadares é formado por um terraço de construção marinha, com cerca de 4 km de comprimento em seu eixo maior, disposto na direção NE. A largura média da ilha é de 0,75 Km. Esse pacote arenoso corresponde à porção permanente emersa da ilha e tem superfície aproximada de 3 km² e altitudes máximas inferiores a 9 m.

Os perfis litológicos observados nas margens da ilha, principalmente no flanco SW (Figura 2), mostram homogeneidade mineralógica, evidenciando predomínio de sedimentos quartzosos com granulometria fina a muito fina. Em toda a extensão da ilha, a camada de areia superficial apresenta-se pedogeneizada, com teores variados de matéria orgânica. A uniformidade litológica da seqüência arenosa que forma o arcabouço do aquífero confere a ele, características hidrogeológicas homogêneas e isotrópicas.

A espessura da camada arenosa não foi determinada no ambiente da ilha, no entanto, correlacionando com perfis de poços perfurados em Paranaguá e, também, com base em levantamentos geofísicos, pode-se estimar que seja da ordem de 60 m.

Figura 2 - Pacote arenoso com 6 m de altura (extremidade SW da ilha)



O modelo conceitual do sistema aquífero da Ilha dos Valadares é o de um aquífero livre, homogêneo e isotrópico, limitado por fronteiras móveis, definidas pela superfície potenciométrica e pela interface água doce – água salgada e por uma fronteira fixa, representada pelo embasamento cristalino sobre o qual se assenta o aquífero.

Aplicando-se a equação de Ghyben-Herzberg aos dados potenciométricos para calcular a profundidade aproximada da interface

água doce – água salgada, verifica-se que, nas partes mais afastadas das margens da ilha, a posição da interface água doce-água salgada estaria situada abaixo da do topo do embasamento. Entretanto, na parte central, onde a ilha tem a menor largura (em torno de 350 m), é possível que as intrusões de água salgada provocadas pelos rios Itiberê e dos Correias estejam bem próximas uma da outra de modo que, nesse local, a zona saturada com água doce apresente a forma aproximada de uma lente em equilíbrio com a água salgada subjacente.

A recarga do aquífero se deve, essencialmente, às precipitações pluviométricas e a descarga ocorre através dos poços domésticos e, principalmente, ao longo das margens da ilha, diretamente para os corpos de água circundantes, conforme se verificou através de medidas de condutividade que mostram valores ligeiramente mais baixos junto às margens do que as medidas realizadas em direção ao eixo do rio. Outro fato que corrobora essa afirmação são as diferenças significativas entre os valores dos parâmetros físico-químicos determinados em amostras de água de poços da ilha e em amostra coletada no rio Itiberê.

4.1 Influência da maré e a potenciometria do aquífero

Nos aquíferos costeiros, o nível da água subterrânea está sujeito a oscilações por influência das marés oceânicas. A amplitude dessas oscilações depende, entre outros fatores, da conexão hidráulica entre o aquífero e o mar, bem como da distância entre o ponto de observação e a linha da costa.

A influência das oscilações dos níveis dos rios Itiberê e dos Correias, devido ao regime de marés oceânicas, no aquífero foram investigadas através da medida de nível da água em dois poços domésticos: um situado no extremo NE da ilha, a 30 m da margem do rio Itiberê e outro situado na metade SW da ilha, a distâncias aproximadamente iguais de ambas das margens. No poço próximo à margem do Itiberê, a resposta do aquífero foi imediata enquanto que as medidas de nível tomadas no poço localizadas na metade SW da ilha, não mostraram variações significativas de nível, que oscilou entre 3,07 e 3,05 m. Atribuiu-se esse fato, a um retardado na propagação da onda de maré através do aquífero durante o período de observação. A elevação da maré foi observada em um único ponto, na margem do rio Itiberê, próximo ao canal da Cotinga.

Os gráficos das Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, a variação no tempo da diferença entre os níveis iniciais e os níveis no momento das medidas no poço 1 (NE) e no rio e,

a relação entre essas variações, evidenciando a linearidade entre os incrementos de nível medidos. A Figura 5 apresenta a variação no tempo do nível da água no poço 2 (SW).

Figura 3 – Variação temporal dos níveis da água no rio Itiberê e no poço 1

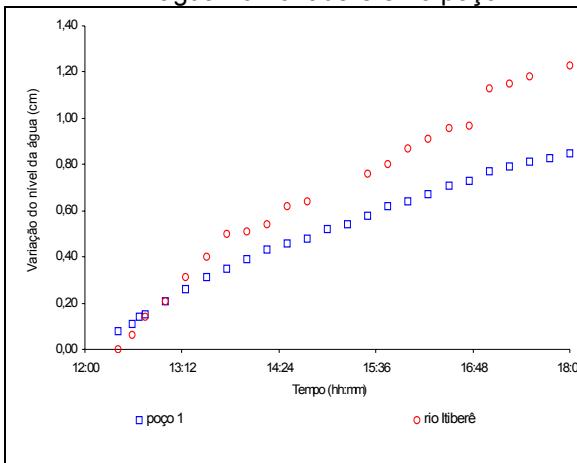


Figura 4 – Relação entre os níveis da água no rio Itiberê e no poço 1

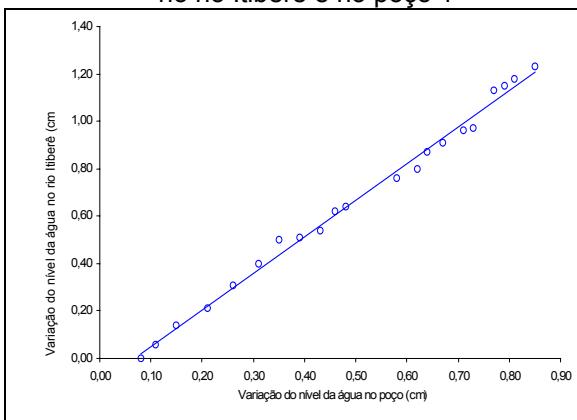
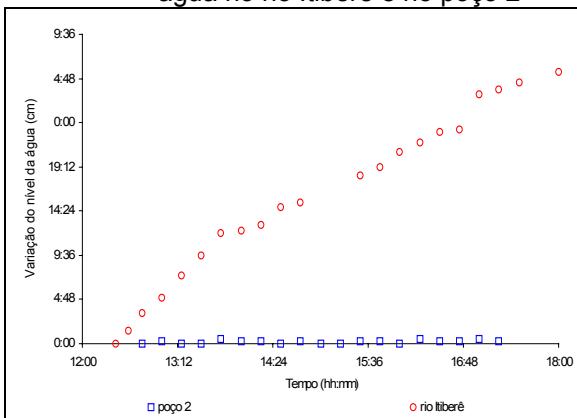


Figura 5 – Variação temporal dos níveis da água no rio Itiberê e no poço 2



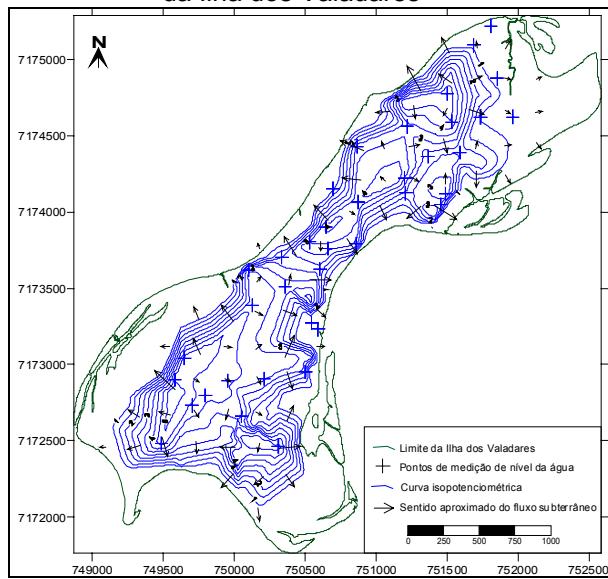
A potenciometria do aquífero é afetada tanto pela oscilação do nível da água causado pelas marés,

como pela recarga por águas de chuva. Para a elaboração do mapa potenciométrico do aquífero da Ilha dos Valadares, tomou-se a precaução de fazer as medidas de nível estático período de pouca chuva e em intervalos de tempo semelhantes, entre 13h e 17 h correspondente à maré baixa. Foram feitas medidas de nível em 50 poços, entre os dias 25 e 29/06/2001. O mapa resultante serve apenas como um indicativo da superfície potenciométrica do aquífero.

O mapa isopotenciométrico (Figura 6), mostra um divisor de águas acompanhando aproximadamente o eixo maior da ilha. Esse divisor de águas subterrâneas coincide, aproximadamente, com as maiores elevações da ilha. A superfície potenciométrica mostra controle topográfico estando, ainda, pouco influenciada por ações antrópicas (drenagens ou bombeamentos). As linhas de fluxo são divergentes e direcionadas para as drenagens que circundam a ilha.

A profundidade do nível freático varia de 4 a 5 m nas partes mais elevadas da ilha, diminuindo à medida que se aproxima das margens da ilha, até aflorar nas zonas de mangue.

Figura 6 – Mapa potenciométrico do aquífero da Ilha dos Valadares



4.2 Qualidade da água

A qualidade química da água subterrânea é, em geral, controlada por fatores como qualidade da água de recarga, tipo de aquífero, litologias percoladas, tempo de residência, acrescentando-se, no caso de aquíferos costeiros, os efeitos relacionados à intrusão da cunha salina. Além disso, pelas características hidrogeológicas (áquifero livre, poroso, zona vadosa normalmente pobre em argilo-minerais e matéria orgânica, nível freático raso, entre outras), tornam os aquíferos costeiros

vulneráveis à contaminação, de modo que o gerenciamento inadequado das ações antrópicas coloca em risco a qualidade da água neles armazenadas.

O quadro geral da qualidade da água para fins de abastecimento público foi feito a partir dos resultados de análises físico-químicas e bacteriológicas de 12 amostras de água coletadas em poços-ponteiras utilizados no abastecimento de residências. Esses pontos estão distribuídos por toda a ilha, de modo a caracterizar a influência de distintos ambientes na hidroquímica do aquífero. As análises foram feitas no LPH-Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (Departamento de Geologia/UFPR), com a determinação da concentração dos principais cátions e ânions. Os parâmetros pH, condutividade elétrica e temperatura foram medidos no momento da coleta das amostras. O resultado dessas análises estão apresentados na Tabela 1.

A mineralização da água é controlada pelas espécies iônicas Na^+ , Cl^- e SO_4^{2-} , características das águas subterrâneas em ambiente costeiro. Essas espécies apresentam boa correlação linear positiva entre si, indicando origem comum e associada à água do mar, já que são espécies aí predominantes. A soma desses três íons corresponde a mais de 50% do conteúdo iônico das amostras AM1, AM2, AM3, AM4, AM5, AM6, AM7, AM9 e AM12. Esse percentual aumenta à medida que a localização dos pontos de coleta se aproxima das margens da ilha. As amostras coletadas na porção SW da ilha (AM8, AM10, AM11 e AM12), apresentam os valores de relação iônica $\text{rHCO}_3^-/\text{rCl}^-$ e $(\text{rCa}^{+2} + \text{rMg}^{+2})/\text{rCl}^-$ mais elevados que o das outras amostras. Outro aspecto diferencial dessas amostras (AM8, AM10, AM11 e AM12), é o fato das concentrações dos íons Cl^- , SO_4^{2-} e Na^+ , estarem abaixo dos valores obtidos para os mesmos íons nas demais amostras. Esses dados caracterizam águas menos sujeitas a influências das águas marinhas, seja sob a forma de aerosóis ou contaminação por cunha salina. Deve-se levar em conta, também, que esses poços estão localizados em partes elevadas da ilha (paleodunas), consequentemente mais expostas aos processos de lixiviação pelas águas de chuva e, um pouco mais afastados do Canal da Catinga que está ligado diretamente à Baía de Paranaguá. Os gráficos das Figuras 7 e 8 ilustram os aspectos mencionados.

Na classificação iônica nas amostras analisadas, ocorrem com maior freqüência, pelo lado dos ânions, águas do tipo $\text{rCl}^- > \text{rHCO}_3^- > \text{rSO}_4^{2-}$ seguida pelo tipo $\text{rCl}^- > \text{rSO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ e, considerando os cátions, predominam os tipos $\text{rNa}^+ > \text{rCa}^{+2} > \text{rK}^+ > \text{rMg}^{+2}$ e $\text{rNa}^+ > \text{rCa}^{+2} > \text{rMg}^{+2} > \text{rK}^+$. A Tabela 3 apresenta as relações iônicas

das amostras coletadas.

No diagrama de Piper (Figura 9), observa-se, principalmente no campo dos cátions, uma linha de tendência indicando uma evolução da composição química, passando de águas com maior influência (AM1) para águas com menor influência (AM11) de água salgada. A amostra AM1, coletada no extremo da ilha, nas proximidades da confluência do rio Itiberê com o canal da Catinga, apresenta os teores mais elevados de STD , Cl^- , Na^+ e SO_4^{2-} , indicando uma salinização do aquífero por efeito da dispersão hidrodinâmica das águas salgadas. Segundo a classificação geoquímica de Piper as águas são do tipo cloretada-sódica. No entanto, em função da distância entre os pontos de coleta e as margens da ilha, outras espécies iônicas contribuem para uma diferenciação dos tipos geoquímicos das amostras coletadas, conforme mostrado anteriormente.

Figura 7 - Concentrações dos principais íons (em meq/L), nas amostras de água coletadas nos poços domésticos.

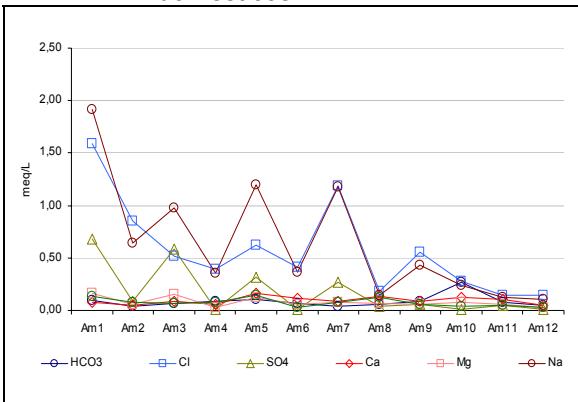


Figura 8 - Variação das relações iônicas entre as amostras de água dos poços e do rio Itiberê

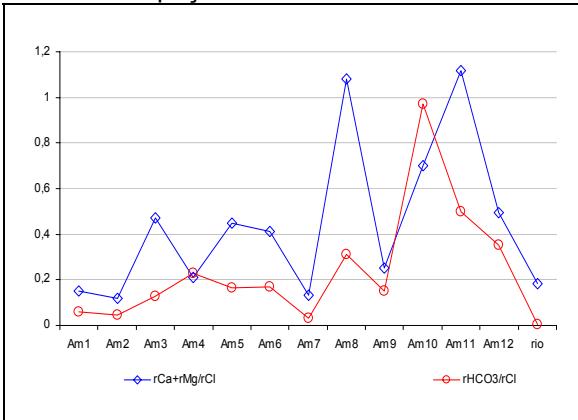


Figura 9 - Diagrama de Piper das amostras de água coletadas na Ilha dos Valadares

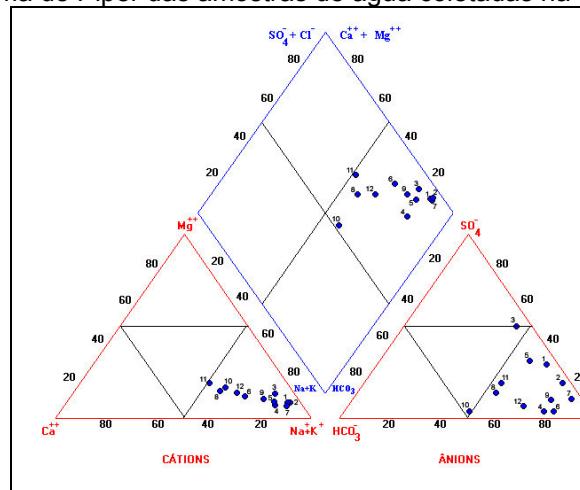


Tabela 1 - Resultados das análises físico-químicas das amostras coletadas nos poços domésticos na Ilha dos Valadares e no rio Itiberê

Parâmetro	Amostra													rio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Temperatura ¹	22.8	23.9	24.4	24.6	25.1	26.2	27.8	24.4	24.5	27.1	23.7	23.4		28.0
Condutividade ²	249 ²	105 ²	144 ²	77 ²	202 ²	70 ²	165 ²	70 ²	72 ²	57 ²	47 ²	25 ²		41 ⁶
PH	5.26	5.11	5.55	5.30	3.76	4.42	4.47	4.50	4.11	5.36	5.09	4.65		7.50
N-Kjendal Total	1.56	0.25	0.33	0.85	0.14	0.07	0.35	1.17	0.45	0.48	0.11	<0.01		0.60
N-Amoniacal	1.48	<LD	0.04	0.64	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	0.05	0.20	<0.01	<0.01		0.60
N-Orgânico	0.08	0.25	0.29	0.21	0.14	0.07	0.32	1.17	0.40	0.28	0.11	<0.01		<0.01
Alcalin. Total ³	4.8	1.9	3.30	4.50	5.10	3.50	2.00	2.80	4.20	13.40	3.60	2.60		95.3
Dureza Total	12.11	5.16	13.32	4.09	13.93	8.59	7.82	9.72	6.99	9.64	8.06	3.64		3894
SDT ⁴	182	82	110	58	151	50	125	52	54	42	33	19		23477
SiO ₂	12.52	11.2	8.16	13.04	6.40	4.44	10.48	5.81	9.00	10.23	5.19	8.77		1.50
HCO ₃ ⁻	5.86	2.32	4.03	5.49	6.22	4.27	2.44	3.42	5.12	16.30	4.39	3.17		116
Cl ⁻	56.5	30.2	18.5	13.9	21.9	14.7	42.1	6.4	19.7	9.7	5.1	5.2		15229
F ⁻	0.13	0.03	<0.01	0.10	<0.01	<0.01	0.06	0.08	0.05	0.09	<0.01	<0.01		1.78
PO ₄ ⁻³	0.19	0.06	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.38	0.04	<0.03	<0.03	0.06		0.14
SO ₄ ⁻²	32.5	4.2	28.0	0.5	15.0	0.5	13.0	2.0	2.9	0.5	2.3	0.5		1732
NO ₃ ⁻	0.02	0.97	0.02	0.02	32.70	7.65	1.41	7.47	0.62	0.04	7.96	2.05		0.04
NO ₂ ⁻	<LD ⁵		<LD ⁵											
Ca ⁺⁺	1.59	0.88	1.82	1.06	3.17	2.27	1.68	2.64	1.66	2.41	2.04	0.93		345
Mg ⁺⁺	1.98	0.72	1.89	0.35	1.46	0.71	0.88	0.76	0.69	0.88	0.72	0.32		738
Na ⁺	44.0	14.7	22.5	8.1	27.5	8.4	27.0	3.2	9.8	5.4	2.8	2.5		8100
K ⁺	5.25	3.15	2.60	3.10	5.65	1.05	2.85	5.00	2.40	1.65	1.95	1.05		162
Fe Total	6.51	0.24	1.09	0.71	0.01	0.15	0.14	0.25	2.30	0.74	0.01	0.18		0.33
Colif. Totais	Pres.	Aus.	Pres.		--									
Colif. Fecais	Pres.	Aus.	Aus.	Pres.	Pres.	Pres.	Pres.	Aus.	Aus.	Pres.	Pres.	Pres.		--

¹ Temperatura em °C² Condutividade (poços domésticos) em $\mu\text{S}/\text{cm}$ ³ Alcalinidade total em mg/L de CaCO₃⁴ Sólidos Dissolvidos Totais⁵ LD = 0,006⁶ Condutividade (rio Itiberê) em mS/cm

Tabela 2 - Composição iônica dominante das amostras de água dos poços domésticos

Amostras	Composição iônica dominante	
	ânions	Cátions
Am 3	rSO ₄ ⁻² > rCl > rHCO ₃ ⁻	rNa ⁺ > rMg ⁺² > rCa ⁺² > rK ⁺
Am 4	rCl ⁻ > rHCO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²	rNa ⁺ > rK ⁺ > rCa ⁺² > rMg ⁺²
Am 8		
Am 9	rCl ⁻ > rHCO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²	rNa ⁺ > rCa ⁺² > rK ⁺ > rMg ⁺²
Am 12		
Am 6		
Am 10	rCl ⁻ > rHCO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²	rNa ⁺ > rCa ⁺² > rMg ⁺² > rK ⁺
Am 11		
Am 7		
Am 5	rCl ⁻ > rSO ₄ ⁻² > HCO ₃ ⁻	rNa ⁺ > rCa ⁺² > rK ⁺ > rMg ⁺²
Am 1	rCl ⁻ > rSO ₄ ⁻² > HCO ₃ ⁻	rNa ⁺ > rMg ⁺² > rK ⁺ > Ca ⁺²
Am 2	rCl ⁻ > rSO ₄ ⁻² > HCO ₃ ⁻	rNa ⁺ > rK ⁺ > rMg ⁺² > Ca ⁺²

As amostras de água apresentam caráter ácido, com pH variando de 3,76 a 5,5, provavelmente em consequência da matéria orgânica presente nos horizontes mais superficiais do pacote arenoso. O teor de sólidos dissolvidos totais, considerando o ambiente estuarino, é relativamente baixo, variando de 19 a 182 mg/L.

O NO₃⁻², e o Fe_{total} são as substâncias iônicas indesejáveis presentes na água subterrânea. Embora sem atingir o limite de potabilidade estabelecido, o NO₃⁻² apresenta concentrações elevadas nas amostras AM5 e AM10, atribuindo-se sua origem à ação antrópica. O Fe_{total} excede o valor máximo permitível (0,3 mg/L), nas amostras AM1, AM3, AM4, AM9 e AM10. A cor apresentada pelas referidas amostras relaciona-se à presença dessa substância.

O soterramento de antigos mangues pelo avanço da linha de costa, deu origem a níveis ricos em matéria orgânica. Em alguns poços, a água extraída apresenta forte odor de gás sulfídrico resultante da redução de sulfatos nesses ambientes potencialmente redutores.

Apenas a amostra AM2 não apresentou contaminação bacteriológica por coliformes. Em todas as demais amostras foi detectada a presença de coliformes totais e, nas amostras AM1, AM4, AM5, AM6, AM7, AM11 e AM12, a presença de coliformes fecais. A causa dessa contaminação é a construção de poços próximos às fossas, revelando a necessidade de um

programa de orientação e de saneamento para que não se comprometa a utilização do aquífero para fins de abastecimento público.

As águas superficiais que circundam a ilha apresentam composição química distinta das águas coletadas nos poços domésticos. Na amostra de água coletada no rio Itiberê foram determinadas concentrações elevadas de SDT (23,5 g/L), Na⁺ (8,1 g/L), SO₄⁻² (17,3 g/L) e Cl⁻ (15,2 g/L). Medidas de condutividade elétrica feitas em vários pontos dos rios Itiberê e dos Correias variaram desde 30 a 101 mS/cm. Embora o teor de SDT esteja abaixo da concentração média da água do mar (em torno de 35 g/L), esses valores indicam águas muito salinizadas, resultante da mistura de água doce continental com água marinha.

Mesmo considerando a conexão hidráulica entre o aquífero e os rios que circundam a ilha, as interferências negativas das águas superficiais na qualidade da água do aquífero são ainda desprezíveis.

4.3 Exploração do aquífero

Atualmente exploração do aquífero é feita através de poços com 2,54 cm de diâmetro revestidos com tubos de PVC, equipados com bombas manuais. São poços de baixa vazão com profundidades que não ultrapassam 6 m e, na maioria dos casos, construídos de forma rudimentar pelo próprio morador. Estima-se que existam mais de 1500 poços na Ilha, utilizados na captação de água para abastecimento das

residências. Nenhum dos poços visitados tinha qualquer tipo de proteção sanitária verificando-se, também, que na escolha do local para a construção do poço não se levou em consideração as distâncias mínimas de fossas ou locais de lançamento de águas servidas. O parcelamento desordenado do terreno em lotes de tamanho pouco maior que as dimensões das residências, concentração populacional elevada, topografia relativamente plana da ilha e a permeabilidade do terreno são fatores que contribuem para a degradação da qualidade da água subterrânea na ilha.

Como os volumes extraídos do aquífero são relativamente baixos e o regime de bombeamento é descontinuado, não é de se esperar alterações significativas na superfície potenciométrica induzidas por esse tipo de exploração do aquífero.

4.4 Seleção de áreas favoráveis e tipo de captação

A locação do sistema de captação do aquífero baseou-se em três pontos fundamentais:

- áreas com baixa densidade populacional;
- existência de paleodunas e;
- maior distância dos rios que circundam a ilha, principalmente, do canal da Cotinga.

A maior causa da degradação da qualidade da água subterrânea está relacionada ao processo desordenado de ocupação da ilha que, por não ter sistema de saneamento básico, a disposição dos efluentes líquidos é feita diretamente no terreno. Acredita-se, desta forma, que zonas ainda não ocupadas por moradias sejam os locais com menor risco à contaminação.

Os poços perfurados nas paleodunas e afastados do canal da Cotinga têm características hidroquímicas distintas daqueles locados em outros pontos da ilha. Essas características devidas, provavelmente ao ambiente sub-aéreo de deposição desses sedimentos e lixiviação mais intensa por estarem em posição topográfica mais elevada.

Foram ainda, considerados fatores de infra-estrutura, tais como, energia elétrica, vias de acesso, redes de adução e reservatório entre outros.

A construção de poços tubulares profundos na ilha é inviável, uma vez que a travessia de todo equipamento de perfuração utilizado nos métodos convencionais (caminhões-sonda, material de apoio, etc) e mesmo o trânsito de veículos pesados na ilha é praticamente impossível. Ainda que essa operação fosse viável, o bombeamento do aquífero através de um poço profundo poderia colocar em risco o frágil equilíbrio entre as zonas

saturadas com água doce e água salgada, levando à salinização do aquífero e, consequentemente, a sua inutilização para fins de abastecimento.

Em aquíferos como o da Ilha dos Valadares, o sistema de captação indicado deverá ser constituído por várias unidades de captação, extraíndo pouco volume de água de modo a causar o mínimo rebaixamento da água subterrânea, para que as variações na superfície potenciométrica do aquífero não favoreçam o avanço da cunha salina.

Dois tipos de captação poderiam ser empregados para tal finalidade: poços rasos de grande diâmetro (poços-cacimba) ou baterias de poços-ponteira. Optou-se pela construção de baterias de poços, pela facilidade e rapidez na construção desse tipo de captação e, principalmente, porque que essa modalidade já havia sido utilizada com sucesso em Paranaguá.

Na área selecionada para a implantação do sistema, situada na metade da porção SW da ilha, foram construídas seis baterias de poços, constituídas por quatro poços ponteiras cada uma, com as seguintes características construtivas:

PERFURAÇÃO

Método de perfuração: Jato de água.

Profundidade do furo: 12 m

Diâmetro do furo: 7,62 mm (3")

Poços/bateria 4

Revestimento

Extensão: 9 m

Intervalo: 0 a 9 m

Diâmetro: 3,81 mm (1.1/2")

Material: PVC Soldável

FILTRO

Extensão: 3 m

Intervalo: 9 a 12 m

Diâmetro: 5,08 mm (2")

Tipo: Espiralado

Abertura: 2 mm

Material: Aço inoxidável

Pré-filtro: Não utilizado

O método de perfuração e a uniformidade do material atravessado não permitiram a elaboração de um perfil litológico detalhado para cada poço.

Cada bateria é composta por 4 poços interligados por tubos de PVC soldável de 5,08 mm (2") (Figura 10) e um piezômetro para observação do nível da água (Figura 11). Cada bateria foi equipada com uma bomba de succão centrífuga auto-escorvante, com capacidade de bombeamento de 12 m³/h. Os filtros espiralados foram envolvidos com manta de bidim para evitar a passagem de areia para dentro do poço.

As baterias foram ligadas à rede de distribuição de água pela Companhia Águas de Paranaguá, empresa de abastecimento público que atende o município de Paranaguá.

Figura 10 - Bateria de poços completa



Figura 11 - Piezômetro para observação do nível da água.



4.5 Ensaios de bombeamento

Os ensaios de bombeamento foram realizados pela equipe de geólogos da SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Os resultados do primeiro ensaio foram descartados porque não houve o cuidado de lançar a água bombeada a uma distância que fosse suficiente para impedir a recirculação da água, gerando, consequentemente, uma superestimativa dos parâmetros hidráulicos do aquífero. No segundo ensaio, a água bombeada foi lançada em uma

área com declive em direção ao rio dos Correas, através de uma tubulação com aproximadamente 100 m de comprimento.

Os ensaios foram realizados bombeando-se um único poço por bateria, escolhendo-se aquele mais próximo do piezômetro. A duração do ensaio foi de 24 horas, com bombeamento contínuo a uma taxa de 5,4 m³/h (vazão máxima da bomba utilizada). Os níveis dinâmicos foram medidos no piezômetro e, nos outros poços da mesma bateria, usados como poços de observação. Tais medidas foram tomadas sem levar em conta os efeitos das marés no aquífero, considerados desprezíveis na área das baterias.

Os dados de rebaixamento x tempo foram analisados pelo método de Jacob utilizando-se o programa *GWW – Groundwater Software for Windows* e forneceram os seguintes valores em cada bateria (Tabela 3):

Algumas observações devem ser feitas com relação aos ensaios de bombeamento:

Devido a dificuldade de realizar o ensaio nesse tipo de captação, o bombeamento foi feito em apenas um dos poços de cada bateria, de modo que o efeito do bombeamento simultâneo deles não é precisamente conhecido.

Os parâmetros hidráulicos determinados e apresentados na Tabela 4 são específicos do poço bombeado, que foi considerado como representativo da bateria onde ele está localizado, extrapolando-se os valores para os três outros poços.

Como os poços não são totalmente penetrantes, considerou-se a zona filtrante (3 m), como sendo a espessura saturada, o que causa uma discrepância entre os valores reais e os calculados.

Embora os resultados dos ensaios realizados devam ser aceitos com ressalvas, admite-se que os valores encontrados não devam diferir significativamente dos valores reais e servem como indicativo do elevado potencial hidrogeológico da área.

Presume-se também que seja possível obter uma produção da ordem de 15 m³/h por bateria, com rebaixamentos inferiores a 1 m.

Tabela 3 – Parâmetros hidráulicos médios do aquífero da Ilha dos Valadares na área das baterias

Parâmetro	Bateria						Média
	1	2	3	4	5	6	
Transmissividade (m ² /s)	2,30 x10 ⁻²	2,26 x10 ⁻²	2,35 x10 ⁻²	2,22 x10 ⁻²	2,24 x10 ⁻²	2,28 x10 ⁻²	2,27 x10 ⁻²
Cond. Hidráulica (m/s)	7,67 x10 ⁻³	7,52 x10 ⁻³	7,83 x10 ⁻³	7,41 x10 ⁻³	7,47 x10 ⁻³	7,59 x10 ⁻³	7,58 x10 ⁻³
Vazão específica (m ³ /h/m)	5,57	5,05	5,81	4,95	4,70	5,29	5,23
Porosidade efetiva	1,94x10 ⁻¹	1,9 x10 ⁻¹	1,97 x10 ⁻¹	1,87 x10 ⁻¹	1,89 x10 ⁻¹	1,92 x10 ⁻¹	1,92 x10 ⁻¹

4.6 Qualidade da água captada nas baterias

As análises das amostras de água das baterias foram feitas no LPH-Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (Departamento de Geologia/UFPR), com a determinação da concentração dos principais cátions e ânions. Os parâmetros pH, condutividade elétrica e temperatura foram medidos no momento da coleta das amostras. Com exceção dos

parâmetros pH que aparece em todas as análises, abaixo do valor mínimo (6,5), estabelecido Portaria MS-1469 (BRASIL, 2001) e do teor de Fe total que na amostra da Bateria 3 apresenta valor acima do máximo (0,3 mg/L), estabelecido na mesma Portaria. Os resultados dessas análises estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados das análises físico-químicas das amostras coletadas nas baterias de poços.

Parâmetro	Bateria					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura ¹	22.8	23.9	24.4	24.6	25.1	26.2
Condutividade ²	44	45	46	72	42	46
pH	5,05	6,01	5,08	5,25	5,56	5,81
N-Kjendal Total	0,22	0,13	0,06	0,08	0,10	0,11
N-Amoniacal	0,14	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
N-Orgânico	0,08	0,05	0,06	0,08	0,10	0,11
Alcalinidade Total ³	3,37	5,05	1,23	2,52	3,37	5,05
Dureza Total	7,41	7,19	4,36	9,37	4,51	6,00
SDT ⁴	32	34	35	53	32	34
SiO ₂	6,18	5,42	5,61	5,57	6,43	5,11
HCO ₃ ⁻	2,76	4,14	1,01	2,06	2,76	4,14
Cl ⁻	6,13	5,64	4,00	13,97	4,66	5,15
F ⁻	0,120	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01
PO ₄ ⁻³	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
SO ₄ ⁻²	2,1	2,8	3,6	4,1	2,1	2,6
NO ₃ ⁻	4,21	3,23	0,72	5,36	3,23	3,45
NO ₂ ⁻	<LD ⁵					
Ca ⁺²	1,2	1,6	0,4	1,2	0,8	1,2
Mg ⁺²	0,97	0,24	1,02	1,82	0,48	0,42
Na ⁺	2,35	2,72	2,91	7,81	2,13	2,75
K ⁺	2,31	1,84	1,04	2,27	2,06	1,97
Fe Total	0,02	0,03	0,90	0,10	0,05	0,30
Colif. Totais	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.
Colif. Fecais	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.

As amostras de água apresentam caráter fracamente ácido, com pH variando de 5,05 a 6,01. O teor de sólidos dissolvidos totais é baixo. Com exceção da amostra da bateria 4 que tem conteúdo de sólidos dissolvidos de 53 mg/L, as demais, variam de 32 a 35 mg/L.

A mineralização da água é controlada predominantemente pelas espécies iônicas Na⁺ e

Cl⁻. Na classificação iônica das amostras analisadas, ocorrem com maior freqüência, pelo lado dos ânions, águas do tipo rCl⁻ > rHCO₃⁻ > rSO₄⁻² seguida pelo tipo rCl⁻ > rSO₄⁻² > HCO₃⁻ e, considerando os cátions, não aparecem composições predominantes. A Tabela 5 apresenta as relações iônicas das amostras coletadas.

Tabela 5 - Composição iônica dominante das amostras de água das baterias de poços

Bateria	Composição iônica dominante	
	ânions	Cátions
1	rCl > rHCO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²	rNa ⁺ > rMg ⁺² > rCa ⁺² > rK ⁺
2	rCl > rHCO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²	rNa ⁺ > rCa ⁺² > rK ⁺ > rMg ⁺²
3	rCl > rSO ₄ ⁻² > rHCO ₃ ⁻	rNa ⁺ > rMg ⁺² > rK ⁺ > rCa ⁺²
4	rCl > rSO ₄ ⁻² > rHCO ₃ ⁻	rNa ⁺ > rMg ⁺² > rCa ⁺² > rK ⁺
5	rCl > rHCO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²	rNa ⁺ > rCa ⁺² > rK ⁺ > rMg ⁺²
6	rCl > rHCO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²	rNa ⁺ > rCa ⁺² > rK ⁺ > rMg ⁺²

O gráfico da Figura 12 mostra que os valores das relações iônicas $r\text{HCO}_3^-/\text{rCl}^-$ e $(r\text{Ca}^{+2} + r\text{Mg}^{+2})/\text{rCl}^-$ são mais elevados nas amostras coletadas nas baterias do que na amostra de água do rio. Comparando-se o conteúdo iônico das águas das baterias (Figura 13), percebe-se que a bateria 4 apresenta indícios de salinização. Essa mesma característica pode ser observada na Figura 12, pela diminuição dos valores de ambas as relações iônicas na amostra coletada nessa bateria.

Figura 12 - Variação das relações iônicas entre as amostras de água das baterias de poços e do rio Itiberê

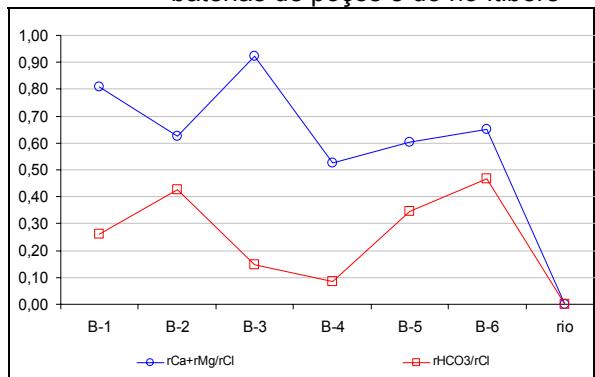
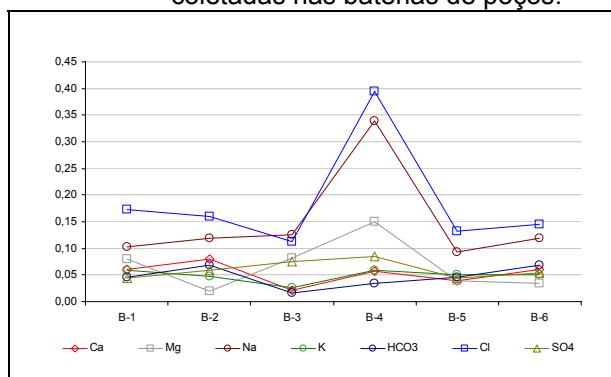


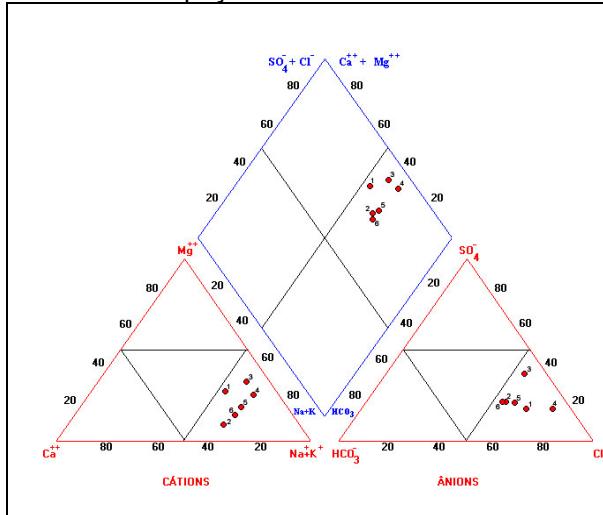
Figura 13- Concentrações dos principais íons (em meq/L), nas amostras de água coletadas nas baterias de poços.



As amostras de água coletadas nas baterias de poços são classificadas como cloretadas-sódicas como mostra o diagrama de Piper da Figura 14.

A água captada no aquífero da Ilha dos Valadares pode ser considerada como apta para consumo humano. A empresa Águas de Paranaguá construiu um reservatório, para armazenamento da água captada pelas baterias, com capacidade de 20 m³ e dotado com injetores de cloro e flúor, para tratamento simplificado e distribuição para a rede de abastecimento da ilha.

Figura - 14 Diagrama de Piper das amostras de água coletadas nas baterias de poços na Ilha de Valadares.



4.7 Potencial hídrico

Considerando a área da parte permanentemente emersa da ilha ($A \approx 3 \times 10^6 \text{ m}^2$), e tomando-se o valor da porosidade efetiva (η_e), pode-se estimar o volume armazenado por metro de espessura saturada (h) no aquífero:

$$V = A \cdot \eta_e \cdot h$$

$$V \approx 3 \times 10^6 \times 0,192 \times 1$$

$$V \approx 5,8 \times 10^5 \text{ m}^3$$

A recarga anual (R_a) do aquífero é calculada da seguinte forma:

$$R_a = P \cdot A \cdot I$$

$$R_a \approx 2 \times 3 \times 10^6 \times 0,2$$

$$R_a \approx 12 \times 10^5 \text{ m}^3$$

Onde: P é a precipitação anual média na planície costeira do Estado do Paraná (2000 mm); A é a área da ilha ($\approx 3 \times 10^6 \text{ m}^2$) e I é uma estimativa da taxa de infiltração (20%). O valor de I, embora inferido, pode ser considerado subestimado, tanto pela inexistência de drenagens superficiais como pelo baixo índice de impermeabilização do terreno. Mesmo vista com precaução, a taxa anual de recarga é suficiente para manter a exploração sustentável do aquífero.

Deve-se, entretanto, observar que as disponibilidades hídricas do aquífero estão no limite de capacidade já que, no Estado do Paraná, a base de cálculo para a implantação de sistemas de abastecimento em áreas rurais é de 150 L/habitante e, sendo a população da Ilha dos Valadares superior a 20.000 habitantes, haveria a necessidade de uma produção anual de mais de $11 \times 10^5 \text{ m}^3$ de água para atender a demanda atual.

O bombeamento das 6 baterias a uma taxa de 15 m³/h, em regime de bombeamento de 20 h/dia, resulta na extração anual de aproximadamente 6,5 x 10⁵ m³, ocasionando um déficit em torno de 5 x 10⁵ m³ a ser suprido por água aduzida do continente ou pelos poços domésticos.

7. CONCLUSÕES

O sistema aquífero da Ilha dos Valadares é um aquífero livre, constituído por sedimentos quartzosos, bem selecionados, de granulometria fina a muito fina. A uniformidade litológica da seqüência arenosa que forma o arcabouço do aquífero conferem a ele, características hidrogeológicas homogêneas e isotrópicas.

Aquífero é limitado por fronteiras móveis, definidas pela superfície potenciométrica e pela interface água doce – água salgada e por uma fronteira fixa, representada pelo embasamento cristalino sobre o qual se assenta o aquífero.

A influência das oscilações dos níveis dos rios Itiberê e dos Correias e do canal da Catinga, devido ao regime de marés oceânicas, se manifestam com maior intensidade nos poços situados nas partes mais baixas da ilha e próximas das margens, principalmente, do canal da Catinga.

Pela aplicação do modelo de Ghyben-Herzberg aos dados potenciométricos, verifica-se que nas partes mais elevadas e centrais da ilha, a posição da interface água doce-água salgada estaria situada abaixo da do topo do embasamento cristalino.

Na parte mais estreita da ilha (em torno de 350 m), é possível que as intrusões de água salgada provocadas pelos rios Itiberê e dos Correias estejam próximas uma da outra de modo que, nesse local, a zona saturada com água doce apresente a forma aproximada de uma lente em equilíbrio com a água salgada subjacente. Esse local é inadequado para a implantação de obras de captação do aquífero.

A recarga do aquífero ocorre, essencialmente, pela infiltração das precipitações pluviométricas e a descarga ocorre através dos poços domésticos e, principalmente, ao longo das margens da ilha, diretamente para os corpos de água circundantes.

A superfície potenciométrica acompanha aproximadamente a forma do terreno, com divisor de águas alinhado com o eixo maior da ilha. As linhas de fluxo são divergentes e direcionadas para as drenagens que circundam a ilha.

As variações naturais do nível da água subterrânea são decorrentes da propagação das ondas de maré pelo interior do aquífero, além das oscilações causadas pelos processos naturais de recarga e descarga. As influências

antrópicas devido a bombeamentos ou canais de drenagens são, até o momento, irrelevantes.

De modo geral, a mineralização da água é controlada pelas espécies iônicas Na⁺, Cl⁻ e SO₄²⁻, características das águas subterrâneas em ambiente costeiro. A soma desses três íons corresponde a mais de 50% da composição iônica média das águas do aquífero. Esse percentual aumenta à medida que a localização dos pontos de coleta se aproxima das margens da ilha.

Os poços localizados em partes elevadas da ilha, consequentemente mais expostas aos processos de lixiviação pelas águas de chuva e afastados das margens da ilha, apresentam menor conteúdo de sólidos dissolvidos totais, do que os situados próximos das margens indicando uma salinização do aquífero por efeito da dispersão hidrodinâmica das águas estuarinas.

A classe dominante das águas é a cloretada-sódica, segundo a classificação geoquímica de Piper. Entre as substâncias indesejáveis, podem ser citadas o NO₃⁻², coliformes totais e fecais, indicativos de contaminação por efluentes domésticos.

As águas superficiais que circundam a ilha apresentam composição diferenciada em relação às águas do aquífero da ilha. Embora muito elevado, o teor de sólidos totais dissolvidos está abaixo da concentração média da água do mar, indicando uma mistura de água doce continental com água marinha.

Os poços utilizados pelos moradores são construídos de forma inadequada, sem qualquer tipo de proteção sanitária e situados próximos às fossas ou locais de lançamento de águas servidas.

O processo desordenado de ocupação urbana da ilha, com o parcelamento do terreno em lotes pouco maiores que as dimensões das residências, concentração populacional elevada, sistema de saneamento básico inexistente e a disposição dos efluentes líquidos diretamente no terreno, somados à permeabilidade do solo, são os principais fatores de degradação da qualidade da água subterrânea na ilha.

O sistema de captação proposto e implantado na ilha mostrou ser prático, econômico, de construção rápida e capaz de produzir 12 m³/h por bateria de poços, com rebaixamentos inferiores a 1 m.

A locação das baterias, nas partes altas e centrais da ilha e afastadas das áreas densamente povoadas, permitiu a captação de água de qualidade adequada aos padrões de potabilidade vigentes. As águas captadas nas baterias são cloretadas-sódicas

O valor calculado para a recarga do aquífero é de 12 x 10⁵ m³/ano. A demanda anual

da ilha, considerando as bases de cálculo para área rural adotadas no Estado do Paraná é de pouco mais de $11 \times 10^5 \text{ m}^3$, a pequena diferença entre a recarga e a demanda anuais mostra que a disponibilidade hídrica do aquífero está no limite de capacidade.

A locação de sistemas de captação do aquífero na Ilha dos Valadares deverá ser guiada por três critérios fundamentais: áreas com baixa densidade populacional; existência de paleodunas e; maior distância dos rios que circundam a ilha, principalmente, do canal da Catinga.

Por questão de infra-estrutura e pelo risco de romper o frágil equilíbrio entre as zonas saturadas com água doce e água salgada, levando à salinização do aquífero, não se recomenda a construção de poços tubulares profundos na Ilha dos Valadares. O sistema de

captação indicado deve ser constituído por várias unidades de captação - poços rasos de grande diâmetro (poços-cacimba) ou baterias de poços-ponteira – com extração de pequenos volumes, de modo a causar mínimo rebaixamento no nível potenciométrico.

Os resultados obtidos no estudo do aquífero freático da Ilha dos Valadares, pela similaridade das características hidrogeológicas, poderão ser extrapolados para outras regiões do litoral do Estado do Paraná. Isto evidencia a importância dos recursos hídricos armazenados no aquífero sedimentar como uma reserva estratégica viável, tanto sob o aspecto quantitativo quanto qualitativo que, se submetido a um regime de exploração racional, poderá atender, de forma rápida e econômica, a demanda de água dos moradores da planície costeira paranaense.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 1.469 de 29 de dezembro de 2000. Estabelece normas e o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Diário Oficial da União, 02/jan/2001, Seção I, p. 19-23.

Agradecimentos

À Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP pela concessão de recursos financeiros através do Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – PADCT (Convênio Nº 64.99.0447.00).

Aos geólogos Álvaro Moretti Lisboa, Everton Costa, Jurandir Bos e Mário Kondo, da SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, pelo apoio e sugestões recebidas.