

# SUBSÍDIOS À GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NA BORDA NORDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO PARNAÍBA

Robério Boto de Aguiar<sup>1</sup>; Liano Silva Veríssimo<sup>2</sup> & Sônia Maria Silva Vasconcelos<sup>3</sup>

**Resumo** – Este estudo é parte integrante dos programas executados pelo Serviço Geológico do Brasil, através da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial (DHT). Tem o objetivo de gerar e disponibilizar informações e conhecimento sobre a ocorrência, potencialidade, circulação e utilização das águas subterrâneas na porção oriental da Bacia Sedimentar do Parnaíba, especificamente, na zona de afloramento do aquífero Serra Grande. Os estudos iniciaram pelo levantamento do conhecimento existente, passando pela caracterização geológica e geométrica do reservatório e culminaram na caracterização hidrogeológica propriamente dita. Espera-se, ao final dos estudos, que essas informações sirvam para fomentar o uso adequado dos recursos hídricos e, conseqüentemente, o desenvolvimento socioeconômico sustentável da região, melhorando as condições de vida da população.

**Palavras – Chave** – Hidrogeologia; Bacia do Parnaíba; Serra da Ibiapaba.

## SUBSIDIES ON UNDERGROUND WATER RESOURCES MANAGEMENT IN NORTHEASTERN EDGE OF PARNAIBA'S SEDIMENTARY BASIN

**Abstract** – This project has taken part of the programs implemented by the Brazilian Geological Service, through the Hydrology and Land Management Department (DHT) and it has been included in the Growth Acceleration Program (PAC) from the Federal Government. It aims to generate and provide informations and knowledgement about the occurrence, potentiality, circulation and use of the groundwater in the eastern side of the Sedimentary Basin Parnaiba, specifically in the Aquifer Serra Grande outcrop area. The study has started by the surveying knowledgement existent, through geometric and geological characterization of the reservoir and it has resulted in hydrogeological characterization as itself. It'll expect at the end of the researches that these informations will be usefull to provide the proper use of the water resources and, consequently, the sustainable socioeconomic development of the region, improving the living conditions for the population.

**Keywords** – Hydrogeology; Parnaiba Basin; Serra Grande

---

<sup>1,2</sup> Serviço Geológico do Brasil – Residência de Fortaleza. Av. Antônio Sales, 1418, Bairro Joaquim Távora, Cep: 60.135-101, Fortaleza – CE.

E-mail 1: roberio.boto@ cprm.gov.br

E-mail 2: liano.verissimo@cprm.gov.br

<sup>3</sup> Universidade Federal do Ceará. Campus Universitário do Pici, Departamento de Geologia, Blocos 912/913, Cep: 60,450-000, Fortaleza – CE.

E-mail 3: smaria@ufc.br

## 1. INTRODUÇÃO

Em muitas regiões da Terra as águas subterrâneas são fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico, o que as transformam num bem estratégico a ser racionalmente explorado, de modo a assegurar sua disponibilidade para as populações futuras. No Nordeste semiárido do Brasil, carente de águas superficiais, verifica-se que a utilização dos recursos hídricos subterrâneos vem sendo feita normalmente sem o desenvolvimento de estudos específicos ou mesmo básicos, o que impossibilita a elaboração de programas gerenciais de natureza conservativa.

A Bacia Sedimentar do Parnaíba está situada na região nordeste ocidental do território brasileiro, ocupando uma área de aproximadamente 600.000 km<sup>2</sup>, abrangendo, parcialmente, os estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia. Trata-se de bacia intracratônica e sua evolução propiciou a deposição cíclica de sequências arenosas e siltico-argilosas, resultando na formação de sistemas aquíferos, separados por espessas camadas semipermeáveis que se comportam como aquíferos. Dessa forma, esses processos deposicionais deram origem a três sistemas aquíferos principais, conhecidos como Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí, de idade Paleozóica, entre os quais se intercalam os aquíferos Pimenteiras e Longá.

O aquífero Serra Grande representa a sequência basal da bacia, cuja área de exposição e recarga se caracteriza por uma estreita faixa de direção N-S. Trata-se de unidade geológica predominantemente clástica, com espessuras anômalas e muito variáveis, tanto em sua faixa aflorante como em subsuperfície, em função de movimentações tectônicas que ocorreram durante sua sedimentação, especialmente na borda da bacia. Essas feições estruturais de natureza grabenforme são muito importantes no armazenamento de água subterrânea e, se bem conhecidas e adequadamente exploradas, podem suprir satisfatoriamente as diversas demandas hídricas.

Como a principal alimentação do aquífero Serra Grande é feita através da infiltração direta dos volumes precipitados e como já existem relatos da intensa exploração desse manancial em alguns setores da bacia, torna-se necessário e urgente o desenvolvimento de estudos, nas suas áreas de recarga, visando definir as medidas que precisam ser implementadas para o gerenciamento sustentável do aquífero, de modo a garantir o atendimento das demandas, atual e futura, das populações abastecidas por este manancial.

Portanto, esse trabalho tem como principal objetivo reconhecer o potencial hídrico subterrâneo do aquífero Serra Grande na borda nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Os estudos serão direcionados no sentido de se obter uma avaliação mais realista das reservas hídricas subterrâneas exploráveis, contemplando-se seu múltiplo uso, de forma sustentável visando sua preservação. Com isso, espera-se obter os subsídios necessários para os órgãos gestores elaborarem os planos de monitoramento e gestão desse importante aquífero.

## 2. A ÁREA DA PESQUISA

A área de estudo situa-se na borda leste da Bacia Sedimentar do Parnaíba, popularmente conhecida com Serra da Ibiapaba, parte leste do Estado do Piauí e oeste do Estado do Ceará, onde afloram os sedimentos do Grupo Serra Grande (Figura 1). Essa área possui 13.437 km<sup>2</sup>, abrangendo totalmente, ou em parte, 27 municípios localizados nos estados do Ceará e Piauí e onde vivem cerca de 710.000 habitantes, sendo que 80% desses residem em território cearense.

Segundo classificação de Köppen, o clima na região da Ibiapaba é tropical chuvoso de monção, com a temperatura oscilando entre 19°C e 30°C. As chuvas nas chapadas são mais regulares, com índices superiores a 1.000 mm e média de 700 mm/ano, com período chuvoso concentrando-se entre os meses de janeiro a maio, e o período seco de julho a novembro.

O conhecimento estratigráfico dessa bacia resulta dos vários estudos realizados a partir do início do século passado, complementados por trabalhos desenvolvidos pela Petrobras através da perfuração de 36 poços e 8000 km de linhas sísmicas de reflexão para a pesquisa de petróleo.

O Grupo Serra Grande é constituído, da base para o topo, pelas formações Ipu, Tianguá e Jaicós. A Formação Ipu é composta de arenitos, conglomerados, arenitos conglomeráticos e diamictitos. A unidade Tianguá é formada por folhelhos, siltitos e arenitos finos. A Formação Jaicós é constituída por arenito médio, grosseiro a conglomerático, com estratificação cruzada, mal selecionado e friável.

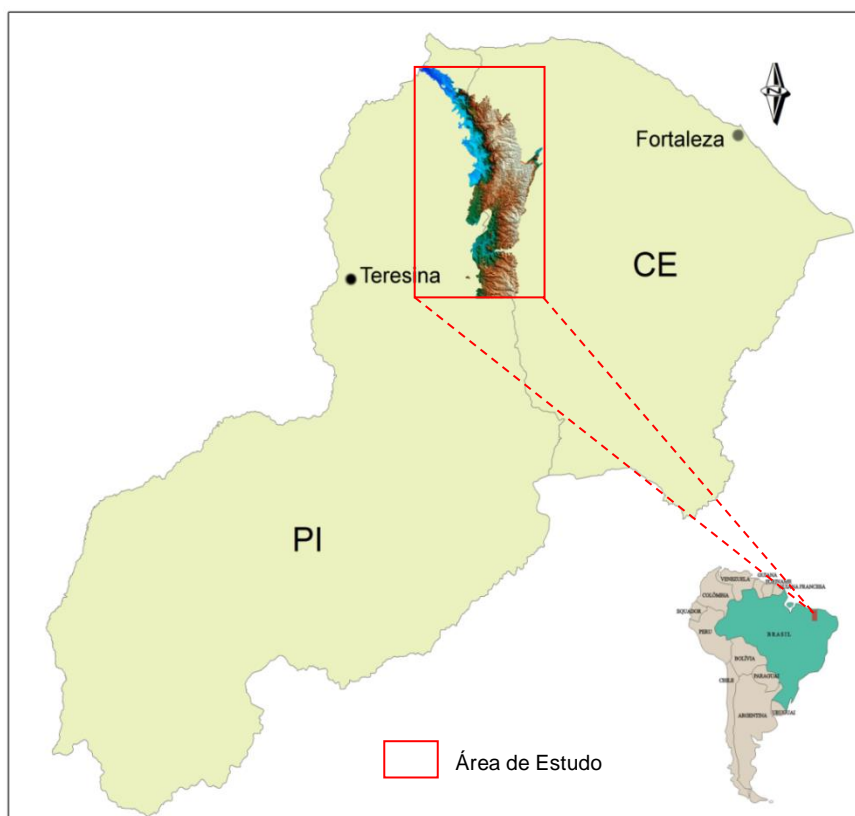


Figura 1. Localização da área de trabalho

### 3. METODOLOGIA DE TRABALHO

As atividades básicas propostas para este tipo de pesquisa estão relacionados na Figura 2. Essas atividades iniciam pelo levantamento do conhecimento existente, passam pela caracterização geológica e geométrica do reservatório, assim como, pela caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica, e culmina com a proposição de elementos de suporte à gestão das águas subterrâneas na borda nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba.

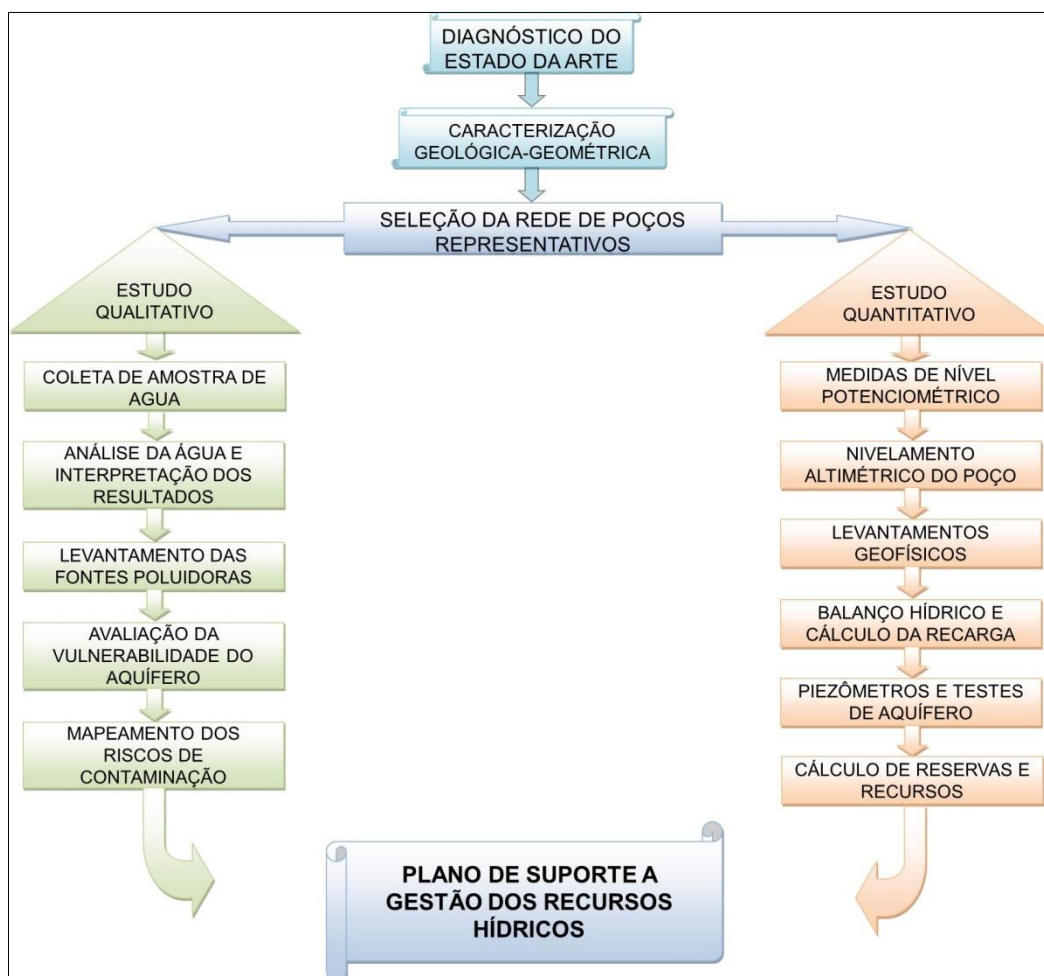


Figura 2. Fluxograma das atividades básicas realizadas no estudo.

### 4. LEVANTAMENTO DE DADOS PRELIMINARES

A fase inicial do trabalho foi a execução de um exaustivo levantamento bibliográfico e de dados existentes. Foram resgatados os trabalhos realizados anteriormente na Bacia do Parnaíba, priorizando os estudos hidrogeológicos sem, no entanto, descartar as áreas correlatas (Geologia, Geofísica etc.). Esses trabalhos foram organizados, analisados e as informações pertinentes devidamente registradas, o que permitiu o planejamento detalhado e facilitou a execução das etapas seguintes.

## 5. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMÉTRICA

Inicialmente, foram analisadas e interpretadas as imagens de satélite e fotos aéreas da área selecionada, para determinação de toda a rede de drenagem, contatos geológicos, estruturas, ocupação do solo etc. Foram realizadas também etapas de campo para confirmar as interpretações feitas a partir das imagens e fotos aéreas e dirimir dúvidas quanto a lito-estratigrafia.

Considerando-se os objetivos de gerar informações sobre indicadores tectônicos que possam afetar as características hidrogeológicas do aquífero Serra Grande na borda nordeste da Bacia do Parnaíba, constatou-se que sucessivas atividades tectônicas geraram estruturas que, localmente, condicionaram os sentidos de acamamentos e do fluxo de água subterrânea para os quadrantes leste e nordeste, contrário ao fluxo regional para oeste. Tais estruturas caracterizam-se em escala de afloramento por juntas ou falhas cisalhantes e normais, com rejeitos centimétricos a métricos que, na escala regional, relacionam-se aos lineamentos estruturais. Em geral, os sistemas cisalhantes são mais frequentes do que os falhamentos normais.

As interpretações dos condicionantes hidrogeológicos da borda nordeste da Bacia do Parnaíba baseiam-se inteiramente na avaliação lito-estrutural, de campo e de processamento digital. Para auxiliar na caracterização geológica e geométrica dessa área, realizou-se também o levantamento geofísico terrestre, pelo método eletrorresistivo e gravimétrico, além da reinterpretação dos dados geofísicos levantados em estudos anteriores.

Foram realizadas oitenta sondagens elétricas verticais (SEV's), com arranjo Schlumberger, onde o espaçamento máximo dos eletrodos de corrente (AB/2) variou de 400 a 3000 m, investigando-se profundidades de 180 a 750 m. No entanto, a grande maioria das SEV's investigaram profundidades entre 400 a 600 m, bem superiores às profundidades dos poços perfurados na região. A partir das interpretações das SEV's, constatou-se que ocorrem dois aquíferos no Grupo Serra Grande, que se pode denominar de "Superior e Inferior", os quais estão separados por uma camada resistiva, que se constitui, em alguns locais, em barreira hidrogeológica. O aquífero Superior, muito comum na faixa leste, é raso e pouco espesso (entre 10 e 20 m). Uma avaliação subestimada das SEV's indica que as espessuras saturadas mais frequentes estão entre 100 e 400 m.

No levantamento gravimétrico foram adquiridas quinhentas estações gravimétricas, com espaçamento médio entre as estações de cinco e sete quilômetros, em circuitos fechados, cujos pontos de partida e chegada diários correspondem às estações gravimétricas base ou de primeira ordem. Concomitantemente, foi realizado o levantamento planialtimétrico de 496 estações através do método do GPS Diferencial (DGPS – *Differential Global Positioning System*).

Os resultados obtidos através do processamento dos dados gravimétricos mostram diversas anomalias positivas e negativas, relacionadas a sistemas de *grabens* e *horts* e associadas ao Lineamento Transbrasiliano (LTB), que divide a área em dois domínios crustais da Província Borborema. Esses baixos gravimétricos (*grabens*), alguns com profundidades superiores a 2 km, refletem uma maior espessura do pacote sedimentar Serra Grande, conseqüentemente, maior potencial hidrogeológico para o aquífero Inferior. As espessuras sugeridas para o Grupo Serra Grande (e eventualmente outros litotipos precedentes) podem variar entre 350 a 2600 m.

## 6. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Para o desenvolvimento dos estudos hidrogeológicos foi selecionada uma rede de poços representativos para a área de estudo. Essa seleção teve por base os poços tubulares existentes no Sistema de Informações de Água Subterrânea (SIAGAS), gerenciado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

De acordo com o banco de dados do SIAGAS, estão cadastrados na área delimitada para o estudo 1.486 pontos d'água, sendo, 1.400 poços tubulares, 45 poços amazonas (escavados/rasos) e 41 fontes naturais (Figura 3).

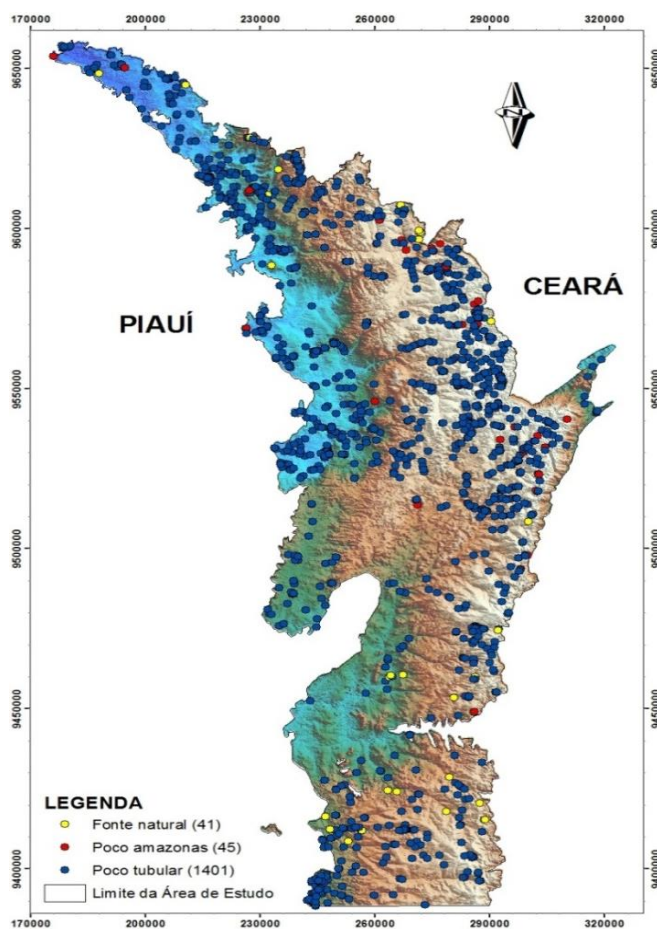


Figura 3. Localização e natureza dos pontos d'água, conforme o SIAGAS.

Após as etapas de campo e análise dos dados dos pontos d'água visitados, foi feita a seleção final dos poços representativos do sistema aquífero. De um universo de 1400 poços tubulares cadastrados na área, foram selecionados 178 para compor a Rede de Poços Representativos (RPR). A partir dessa RPR, foram selecionados os pontos para a medição sazonal do nível potenciométrico e da qualidade das águas.

Para elaborar os mapas potenciométricos do aquífero, através dos quais é possível visualizar as direções preferenciais do fluxo subterrâneo, foi necessário estabelecer as altitudes das bocas dos poços monitorados. Para isso, foi realizado o levantamento geodésico, através da metodologia de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), utilizando-se receptores GPS geodésicos de dupla frequência.

Como resultado das etapas anteriores, ou seja, seleção da rede de poços representativos, medição periódica dos níveis d'água e nivelamento altimétricos dos mesmos, procedeu-se a elaboração dos mapas potenciométricos, com o objetivo de obter a distribuição espacial e temporal das cargas hidráulicas do sistema aquífero e obter os dados básicos sobre os movimento e comportamento da água subterrânea. Tanto se pode realizar uma interpretação qualitativa, como também, quantitativa, seja por métodos simples ou através do estudo de uma mesma superfície em épocas diferentes.

A Figura 4 mostra as superfícies potenciométricas do aquífero Serra Grande, livre, referente às medidas de nível d'água realizadas em: a) 99 poços no mês de novembro de 2009; b) 122 poços no mês de maio de 2010 e; c) 90 poços no mês de abril de 2011.

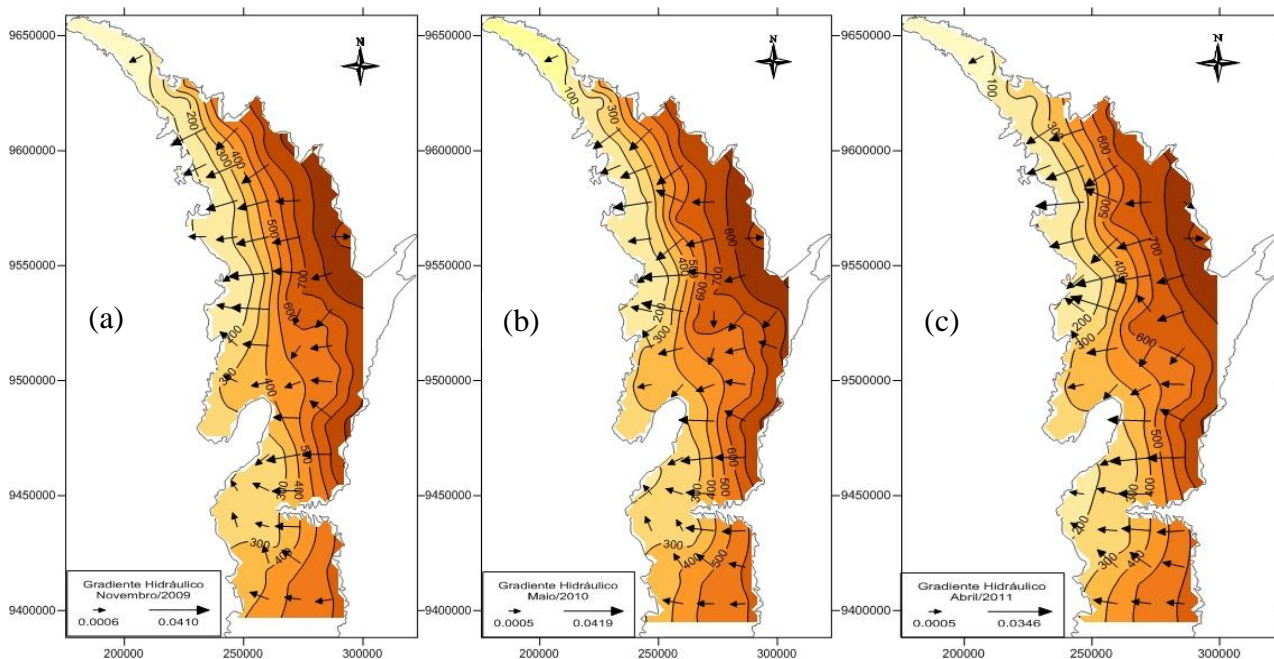


Figura 4. Mapas potenciométricos do aquífero livre Serra Grande referentes às medidas efetuadas em (a) novembro/09, (b) maio/10 e (c) abril/11.



Analisando os mapas potenciométricos, observa-se que há uma predominância do fluxo de água subterrânea de leste para oeste, até alcançar as depressões dos vales dos principais rios que drenam esta porção da bacia e que, conseqüentemente, vão desaguar no rio Parnaíba. A exceção ocorre numa pequena porção nordeste da área, onde o fluxo de água subterrânea está para leste.

### 6.1. Balanço Hídrico e Cálculo da Recarga

O balanço hídrico aqui apresentado tem por objetivo fornecer uma estimativa da água de precipitação disponível para a recarga subterrânea, que constitui a reserva renovável e, em certas circunstâncias, pode ser considerada como recurso explorável. Esta parcela do balanço hídrico é aqui denominada de infiltração efetiva ( $I_e$ ) e é calculada por diferença através da avaliação dos demais elementos do balanço hídrico a partir de dados de médias de totais mensais de precipitação e médias mensais de precipitação de séries históricas destes dados.

Para a elaboração do balanço hídrico da porção nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba foram coletados dados pluviométricos de 26 postos existentes na área e no seu entorno (Figura 5a), através do banco de dados do Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH), disponibilizado no *site* da Agência Nacional de Águas (ANA, 2014). Ao analisar esses dados, optou-se por suprimir da série os anos que apresentavam falhas.

A partir dos dados pluviométricos consistidos, foi obtida a infiltração efetiva para cada um destes postos, calculando-se a evapotranspiração potencial (ETP) mensal pela fórmula de Thornthwaite, em seguida a evapotranspiração real (ETR) mensal e a infiltração efetiva ( $I_e$ ), admitido que a retenção da água de precipitação no solo é de 100 mm.

A infiltração efetiva calculada corresponde à disponibilidade da água de precipitação para a recarga subterrânea. Mesmo partindo da hipótese de que o sistema aquífero é homogêneo, no que se refere à porosidade efetiva e condutividade hidráulica, sabe-se que a recarga assimilada por este sistema é variável em função da posição, tendo em vista que a “transmissividade” e a carga hidráulica assumem valores diferenciados para locais distintos. Desta forma, a estimativa de recarga exige a consideração de hipóteses simplificadoras, sem as quais seria impossível chegar-se a qualquer avaliação quantitativa da recarga direta para toda a área de estudo. Considerando as restrições impostas a cálculos desta natureza, acreditamos que este método estabelece uma ordem de grandeza a respeito da recarga do sistema de aquíferos livres.

Através dos valores de infiltração efetiva calculada foi gerada uma malha de interpolação quadrada com 1,5 km de lado, utilizando-se o procedimento de *krigagem*, com modelo de variograma linear. Desta forma foi possível traçar um mapa de isolinhas de infiltração efetiva revelando sua variação espacial (Figura 5b).



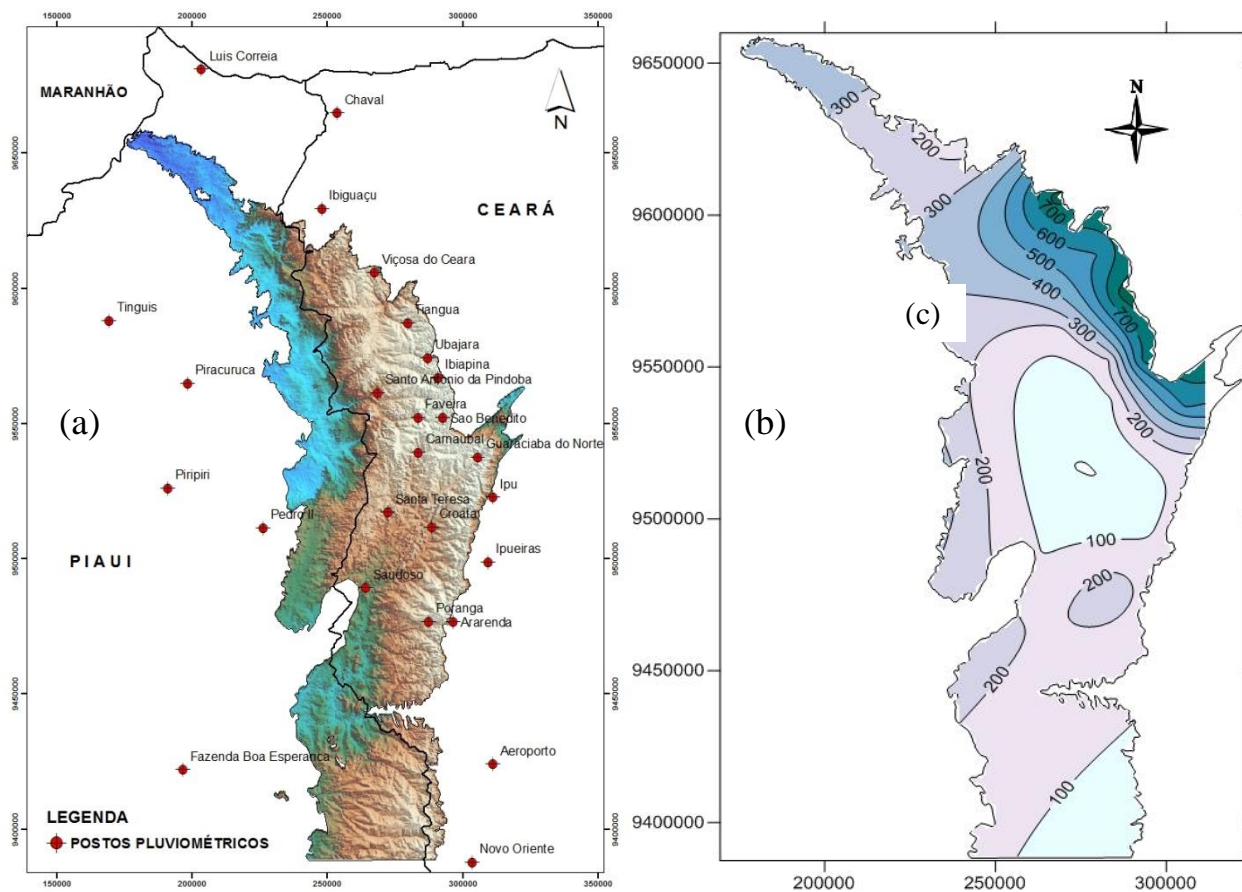


Figura 5. Localização dos postos pluviométricos (a) e Mapa de isovalores de infiltração efetiva na área de estudo (b).

Na tentativa de estimar a quantidade de água disponível para recarga subterrânea na área de estudo, para efeito de cálculo, foram consideradas quatro classes correspondentes à infiltração efetiva: i) inferior a 200 mm; ii) entre 200 e 400 mm; iii) de 400 a 600 mm; e iv) superior a 600 mm. Para a primeira área foi considerada uma infiltração efetiva de 100 mm numa extensão de 7.052,8 km<sup>2</sup>, para a segunda área com 3.747,3 km<sup>2</sup> foi considerado o valor de 300 mm, para a terceira o valor de 500 mm numa área de 1.018,1 km<sup>2</sup>, e por ultimo, 700 mm para uma área de 715,3 km<sup>2</sup>, conforme mostra a Tabela 1.

Portanto, se considerarmos que a área de estudo na bacia tem 12.533,5 km<sup>2</sup>, teremos uma disponibilidade anual de água para recarga de 2,8 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.

Tabela 1. Estimativa da recarga subterrânea. I<sub>e</sub> (mm) = Infiltração efetiva em milímetros.

Setor	I <sub>e</sub> (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Recarga (x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ano)
I <sub>e</sub> < 200 mm	100	7.052,8	705.280
200 < I <sub>e</sub> < 400 mm	300	3.747,3	1.124.190
400 < I <sub>e</sub> < 600 mm	500	1.018,1	509.050
I <sub>e</sub> > 600 mm	700	715,3	500.710
<b>Total</b>		<b>12.533,5</b>	<b>2.839.230</b>

## 6.2. Determinação dos Parâmetros Hidráulicos

Neste estudo, devido à impossibilidade de realização de testes de aquíferos na formação produtora e a disponibilidade de alguns dados de testes de vazão, foram utilizadas apenas estas informações para determinação dos parâmetros do aquífero Serra Grande.

Na maioria dos poços perfurados para água subterrânea é efetuado simplesmente um teste de vazão devido a dois fatores. O primeiro, e principal deles, é que a quase totalidade dos poços visa o abastecimento e não o estudo hidrogeológico da área onde foi construído. O segundo fator, é o custo mais elevado que um teste de aquífero acarreta, o que inibe a sua realização (VIDAL, 2003).

Segundo Kruseman & Ridder (1979), apesar de não serem os mais precisos, os dados levantados num teste de vazão também podem ser utilizados para a determinação das características hidrodinâmicas de um aquífero, assumindo-se o próprio poço bombeado como ponto de observação.

De modo a se melhor interpretar os resultados obtidos nos referidos testes e se determinar valores consistentes para os parâmetros hidráulicos do Serra Grande, foram utilizadas duas metodologias diferentes e os valores obtidos no final foram comparados de modo a estabelecer uma correlação entre os resultados.

Na primeira, a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos da unidade hidroestratigráfica foi feita a partir da interpretação dos resultados obtidos em testes de bombeamento executados em poços produtores da área estudada, com auxílio de um aplicativo matemático. As informações levantadas foram interpretadas pelo programa *AquiferTest*, que possibilita a inserção dos dados de forma rápida e permite a interpretação do teste por diferentes métodos, dentre os quais Theis, Cooper & Jacob e Hantush.

Na segunda análise, os dados de capacidade específica (Q/s) dos poços foram utilizados para determinação dos valores de transmissividade e condutividade hidráulica da área estudada, através de uma equação analítica conforme a metodologia apresentada por Iritani, Hassuda, *et al.* (2000).

Os valores obtidos para os parâmetros hidráulicos do aquífero, pelas duas metodologias, foram então correlacionados, de modo linear e logarítmico, para se verificar as possíveis discrepâncias entre os dois métodos, e comparados com os valores apresentados em outros estudos para a mesma região.

Estas análises permitiram também estabelecer uma equação relacionando os valores de capacidade específica dos poços com os valores de transmissividade obtidos na interpretação dos testes, o que possibilitou um maior número de dados para elaboração do mapa de isotransmissividade da área estudada.

### 6.3. Avaliação das Reservas e Disponibilidades

Os volumes hídricos armazenados nos sistemas aquíferos representam as reservas e podem ser avaliadas segundo o ponto de vista natural ou utilitário. Tradicionalmente essas reservas são classificadas como renováveis (reguladoras) e não renováveis (permanentes). As reservas totais são obtidas pela somatória das reservas renováveis e permanentes.

Conforme Costa (1998), a disponibilidade hídrica subterrânea pode ser: Virtual, representada pela parcela máxima que pode ser aproveitada anualmente da potencialidade, correspondendo à vazão anual que pode ser extraída do aquífero ou do sistema aquífero, sem que se produza um efeito indesejável de qualquer ordem; Efetiva, é o volume anual passível de exploração através das obras de captação existentes, com base na vazão máxima de exploração - ou vazão ótima - e num regime de bombeamento de 24 horas diárias, em todos os dias do ano e; Atual, é o volume anual atualmente explorado nas obras existentes.

Existem várias maneiras de se realizar o cálculo das reservas de um aquífero, sendo as mais comuns:

1º) Cálculo da Vazão de Escoamento Natural (VEN), que sob condições de equilíbrio natural representa a recarga anual efetiva do aquífero, expressa por:  $VEN = T i L$ , onde  $T$  = transmissividade hidráulica ( $L^2T^{-1}$ ),  $i$  = gradiente hidráulico e  $L$  = comprimento da frente de escoamento (L).

Este método é recomendado e empregado no dimensionamento das reservas das águas subterrâneas com a utilização de mapas potenciométricos que permitem o cálculo do gradiente hidráulico local, direção do fluxo subterrâneo e do comprimento da frente de escoamento. O valor da transmissividade é obtido de testes de bombeamento.

2º) Hidrograma de Escoamento Superficial, com cálculos a partir das curvas de recessão, no trecho correspondente à restituição do excesso infiltrado no meio poroso. A restituição das reservas hídricas somente inicia-se quando toda a água superficial é escoada, ou seja, no período de estiagem (COSTA, 1997).

3º) Método Volumétrico, tendo-se por base a flutuação ( $\Delta h$ ) dos níveis d'água nos aquíferos livres, sendo expressa por  $Rr = A \cdot \Delta h \cdot \eta e$ , onde  $A$  = área de ocorrência do aquífero ( $L^2$ ),  $\Delta h$  = variação do nível d'água (L) e  $\eta e$  = porosidade efetiva (adimensional) para aquíferos livres ou  $S$  = Coeficiente de armazenamento para aquíferos confinados a semi-confinados. Este será o método utilizado na área em estudo.

Os valores encontrados para as reservas e disponibilidades hídricas subterrâneas da área estudada estão sendo reavaliados em função de novos dados incorporados recentemente ao projeto. Sendo assim, esses valores serão apresentados posteriormente na durante o Congresso.

## **7. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA**

O uso extensivo de água subterrânea está condicionado à sua quantidade e à sua qualidade. Estas duas condições são importantes para o consumo humano e para o uso em geral, principalmente na agricultura. Segundo estudos da Organização das Nações Unidas – ONU calcula-se que 80% das doenças dos países em desenvolvimento são veiculadas através de água contaminada. Daí ser extremamente importante o conhecimento da qualidade das águas de uma região através de análises físico-químicas e/ou bacteriológicas, que se constitui num mecanismo para caracterizá-las quanto à composição química, potabilidade e direcionamento dos usos.

O crescente conhecimento das reservas hídricas e da interação da água com o meio fez com que fossem identificados parâmetros que devem ser levados em conta quando se propõe um uso para ela, o mais nobre sendo o consumo humano. É por isso que órgãos públicos, que trabalham na área de saúde, sentiram a necessidade de produzir normas que servem como orientação e proteção ao consumidor.

Estas normas, dentre as quais se destaca a Portaria de nº 518, de 25 de março de 2004, do Ministério da Saúde, indicam limites para uma gama de substâncias e elementos dissolvidos nas águas. Embora muitos desses elementos sejam necessários para a vida, algumas vezes eles estão presentes em concentrações elevadas, necessitando da estipulação de limites máximos. A presença de elementos nocivos à saúde pode tornar o uso da água proibitivo. Além das substâncias químicas, as normas também contemplam certas formas microbiológicas - as bactérias e os fungos.

Este capítulo trata da caracterização hidrogeoquímica e risco de contaminação das águas subterrâneas na borda nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba e tem o objetivo de conhecer as principais características qualitativas das águas do aquífero Serra Grande e detectar possíveis contaminações por agrotóxicos, metais pesados etc.

### **7.1. Seleção dos Pontos de Amostragem**

A escolha dos pontos de amostragem teve como critério uma distribuição espacial uniforme de poços em sete municípios, levando-se em consideração a proximidade com áreas de intensas atividades agrícolas e, principalmente, águas de poços destinadas ao abastecimento público. Com essa visão foram selecionados 39 poços e três barragens (Boi Morto, Carnaubal e Sítio Fitoterápico) nos seguintes municípios: Carnaubal (um poço e uma barragem), Guaraciaba do Norte (cinco poços), Ibiapina (seis poços), São Benedito (oito poços), Tianguá (dez poços), Ubajara (seis poços e uma barragem) e Viçosa do Ceará (três poços e uma barragem).

## 7.2. Resultados Hidroquímicos e Classificação das Águas

As águas foram coletadas diretamente dos poços e na parte corrente das barragens, visando a análise dos íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), além dos compostos nitrogenados, amônia ( $\text{NH}_3$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), dureza, sólidos totais dissolvidos (STD), ferro total, pH e condutividade elétrica (CE). As águas coletadas foram armazenadas em garrafas plásticas de 0,5 litros, lavadas com a água do próprio poço, e armazenadas em refrigeração. A coleta das amostras ocorreu em março de 2011.

Os valores da condutividade elétrica das águas dos poços tubulares indicaram que 34 estão abaixo de  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ , dentro dos padrões admissíveis para água potável. O valor médio foi de  $278 \mu\text{S}/\text{cm}$ , variando entre 64 e  $1.164 \mu\text{S}/\text{cm}$ . As águas das barragens apresentaram valores dentro dos padrões admissíveis para água potável; entre 67 e  $114 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Nos sistemas de abastecimento público de água, segundo a Portaria N<sup>o</sup>. 518, o pH deve permanecer entre 6,5 e 9,5. As águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais, paredes de concreto e superfícies de cimento-amianto, enquanto que águas de alto pH tendem a formar incrustações. Nas águas coletadas nos poços, os valores de pH oscilaram entre 3,42 a 6,75 com valor médio de 4,8. As águas das barragens apresentaram valores próximos aos dos padrões recomendados, variando entre 6,2 a 6,8 e valor médio de 6,5.

Os valores de STD das águas dos poços variaram de 49 a 591 mg/L, com valor médio de 176 mg/L. Todos estão inseridos nos padrões aceitos para água potável que é de até 500 mg/L, podendo ser usada na indústria, irrigação e consumo humano. Nas amostras coletadas nas barragens os valores variaram entre 59 e 79 mg/L, tipicamente águas doces, dentro dos padrões aceitos para água potável.

Os valores da dureza das águas dos poços mostraram que 31 amostras são do tipo “branda”, outras sete do tipo “pouco dura” e uma do tipo “dura”. O valor médio das amostras de água foi de  $39,30 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ . Baseado nos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde ( $500 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ ), todas as amostras são consideradas sem restrição para o consumo.

Foram identificado teores de ferro (Fe) acima do valor máximo permitido - VMP pela OMS ( $0,3 \text{ mg}/\text{L}$ ) em sete poços, porém o valor médio foi de  $0,2 \text{ mg}/\text{L}$ . Nas três amostras coletadas nas barragens os valores variaram entre 0,6 a  $1,5 \text{ mg}/\text{L}$ .

De acordo com a Resolução n<sup>o</sup> 396 do CONAMA (2008), não existem restrições quanto às concentrações de cálcio, magnésio, potássio, bicarbonato, cloreto e sulfato. As águas coletadas na área de pesquisa apresentaram concentrações de cátions e ânions dentro dos limites permitidos, com exceção de um poço no município de Ubajara com valor de cloreto de  $362 \text{ mg}/\text{L}$ .

Ainda de acordo com a Resolução nº 396 do CONAMA, de 03/04/2008, a restrição quanto a concentração de nitrato como VMP é de 10 mg N-NO<sup>3</sup>/L. A Portaria nº 518, do Ministério da Saúde, menciona 1,5 mg NH<sup>3</sup>/L como VMP de amônia para consumo humano. Nas águas dos poços amostrados o teor de amônia (NH<sup>3</sup>) variou de 0,02 a 0,24 mg/L, com média de 0,03 mg/L, apresentando concentrações muito abaixo dos valores do VMP. As concentrações de nitrato ficaram no intervalo de 0,39 a 15 mg/L, com 87,2% abaixo de 10 mg/L (VMP) e média de 4,66 mg/L. Nas três amostras de barragem os valores apresentaram concentrações muito abaixo dos valores do VMP.

Para a classificação iônica das águas utilizou-se o diagrama de Piper, onde foram identificadas as diferentes classes e tipos de águas existentes na área. Foi observada a seguinte relação iônica entre ânions e cátions: rNa<sup>+</sup> > rMg<sup>++</sup> > rCa<sup>++</sup> e rCl<sup>-</sup> > rHCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > rSO<sub>4</sub><sup>++</sup>. Quanto aos cátions das águas dos poços, uma amostra é cálcica, duas são magnésiana, nove são mistas e 27 são sódicas. Com relação aos ânions, 38 amostras são águas do tipo cloretada e uma bicarbonatada. No geral, as águas dos poços são do tipo cloretadas sódicas ou cloretadas mistas. Já as águas coletadas das barragens são todas cloretadas mistas.

O enquadramento das águas subterrâneas foi feito com base na Resolução nº 396 do CONAMA (2008), que utiliza para classificar as águas os conceitos de Valor de Referência de Qualidade (VRQ) e Valor Máximo Permitido (VMP). Foram consideradas águas da Classe 1, as que têm todos os parâmetros com valores abaixo do VMP; da Classe 2, com um parâmetro acima do VMP e; da Classe 3, com dois ou três parâmetros acima do VMP. Os resultados mostram que 29 amostras pertencem a Classe 1, onze são da Classe 2 e apenas uma da Classe 3.

Para a identificação quanto ao uso da água na agricultura, as amostras coletadas em 39 poços profundos foram plotadas no diagrama do *United States Salinity Laboratory Staff* – USSL. Oito amostras de água são do tipo C0-S1 e treze do tipo C1-S1, totalizando 21 amostra de água com baixo risco de salinidade, com valores do SAR entre 0,40 a 2,70, podendo ser usada para irrigação em muitos tipos de lavouras e diferentes tipos de solos. Temos a seguir, dezesseis amostras do tipo C2-S1, enquadradas como de médio risco de salinidade e baixo risco de sódio, com valores do SAR entre 0,86 e 4,71. São águas que podem ser utilizadas para irrigação, em grande parte dos tipos de solos e em plantas com uma tolerância salina. Finalmente temos duas amostras, uma do tipo C2-S2 de médio risco de salinidade e médio risco de sódio, com valor do SAR igual a 6,97 e outra do tipo C3-S1 de alto risco de salinidade e baixo risco de sódio, com valor do SAR igual a 3,49.

O limite de potabilidade das águas subterrâneas para consumo animal se baseia nos valores de resíduo seco. Esses limites variam para diferentes tipos de animais, oscilando de 2.860 a 10.000 mg/L para aves e carneiros, respectivamente. Os resultados indicaram que 100% das águas atendem perfeitamente aos padrões, não existindo restrições para o consumo animal.

### 7.3. Agrotóxicos

Agrotóxicos ou pesticidas são de um modo geral, substâncias orgânicas sintéticas, extremamente tóxicas, usadas para destruir, repelir ou controlar insetos e ervas daninhas indesejáveis à economia agrícola (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991). Podem ser classificados em inseticidas, algicidas, fungicidas, herbicidas, nematocidas, dentre outros.

Foram realizadas duas amostragem de água, nos 39 poços e três barragens, para a determinação de resíduos de 185 compostos orgânicos sintéticos. As amostras foram armazenadas em garrafas de vidro escuro (Âmbar) de 5 litros, conservadas no gelo em caixas de isopor, e transportadas até o Laboratório de Análises de Resíduos de Agrotóxicos – LABTOX, do Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP, em Recife - Pernambuco. A metodologia utilizada foi a *Standard methods for the examination of Water and wastewater, 18th Edition* – 1992; o Limite de Quantificação do Método: 0,03 Ng/L para organohalogenados e 0,1 Ng/L para organofosforados e outras creditações: REBLAS, ANALI-021 e MAPA, Portaria 136 de 06/08/1998.

Na primeira coleta nenhum agrotóxico foi quantificado nas amostras de água. Na segunda foi identificado no poço 04 na localidade de Jurema, município de Ibiapina, o composto *Imidacloprid*, com concentração de 0,08 µg/L.

A não detecção de resíduo não significa que essas águas não tiveram resíduos de agrotóxicos porque a coleta de água pode ter acontecido após um intervalo de tempo de várias meias-vidas. Estes resultados são decorrentes de dois aspectos; o uso de agrotóxico não é contínuo e os agrotóxicos têm, em geral, meia-vida curta.

## 8. VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO

### 8.1. Classes de Vulnerabilidade do Aquífero

Para avaliação da vulnerabilidade do aquífero Serra Grande, utilizou-se os critérios propostos por Foster (1987), apud Foster & Hirata (1993), o método GOD - acrônimo derivado de *Grounwater Occurrence and Depth* - adaptado às condições da área de estudo. Esse método engloba sucessivamente três fatores a serem determinados em fases distintas: a) ocorrência da água subterrânea (condição do aquífero), representado numa escala de 0,0 até 1,0; b) substrato litológico (características em termos litológicos e grau de consolidação dos estratos acima da zona não saturada), representado numa escala de 0,3 a 1,0 e; c) profundidade, em metros, da água subterrânea (topo do aquífero confinado), numa escala de 0,4 a 1,0. O produto destes três parâmetros é o índice de vulnerabilidade, expresso numa escala de 0 a 1,0, conforme mostra a Figura 6.



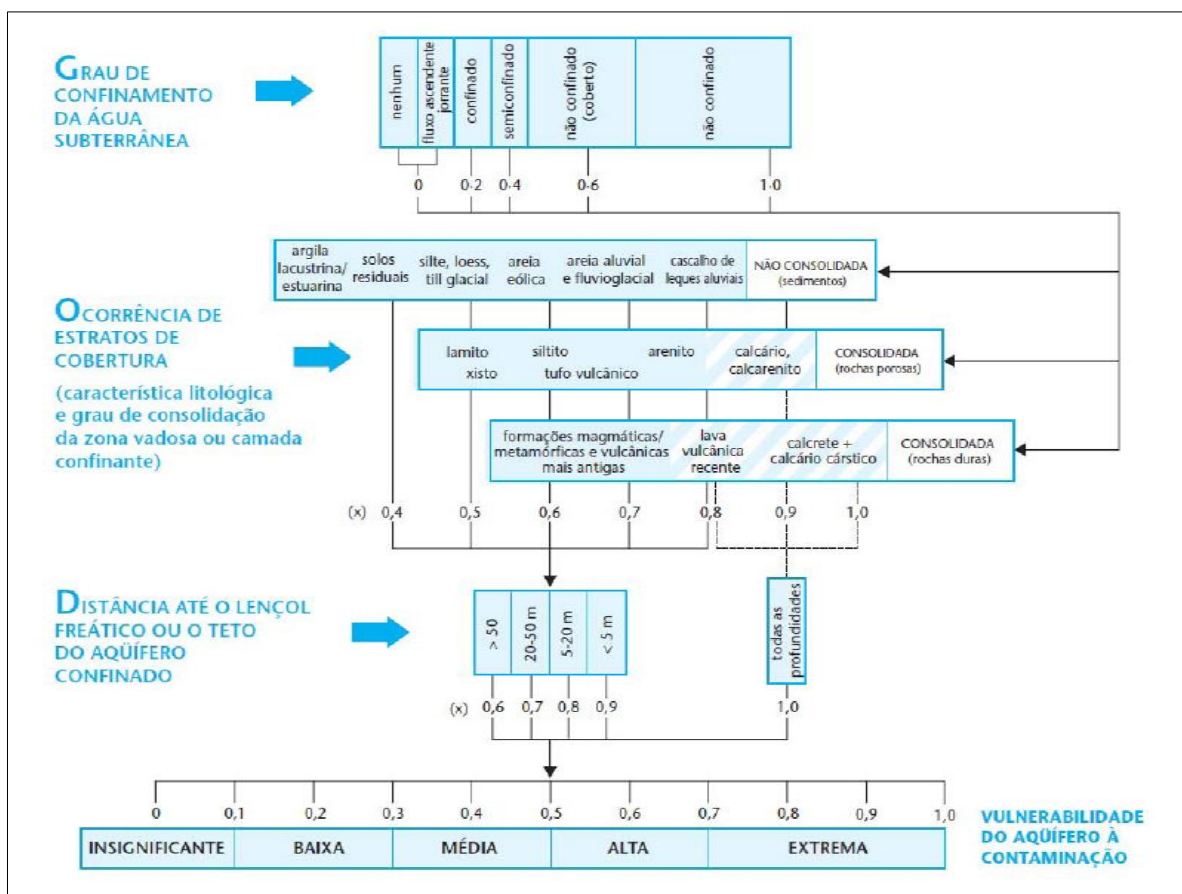


Figura 6. Diagrama para avaliação do índice GOD de vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação (Foster *et al.* 2006).

Na determinação das classes de vulnerabilidade foram utilizadas as informações de nível estático de cinquenta poços tubulares cadastrados na área e do mapa geológico.

Para o grau de confinamento da água subterrânea (condição do aquífero), foi atribuído índice igual a 0,8. Para a característica litológica e grau de consolidação da camada (substrato litológico), foi atribuído aos arenitos do Grupo Serra Grande índice igual a 0,75. No parâmetro da profundidade da água subterrânea os poços mais rasos (22%), com nível estático menor do que 5,0 m receberam índice 0,9; nível estático maior ou igual a 5,0 m e menor do que 20,0 m (54%) índice 0,8 e para poços com nível estático maior ou igual a 20,0 m e menor do que 50,0 m (24%) índice igual a 0,7.

Com o cruzamento dessas informações, obteve-se a Tabela 2, onde estão os índices de vulnerabilidade pontual e os valores atribuídos a cada um dos fatores que compõem tais índices.

Tabela 2. Índice de vulnerabilidade dos aquíferos e sua classificação.

Formação Geológica	Condição do aquífero	Substrato litológico	Profundidade da água subterrânea (m)	Nível Estático (m)	Nº de poços	Índice de Vulnerabilidade	Classe
Serra Grande	0,8	0,75	0,9	< 5	11	0,54	Alta
			0,8	5 – 20	27	0,48	Média
			0,7	20 – 50	12	0,42	Média

Fonte HIRATA *et al.*, 1997 – modificado

Utilizando-se os índices encontrados na Tabela 02, foram definidos duas classes de vulnerabilidade natural: Média e Alta. As zonas com médio índice de vulnerabilidade ocorrem por toda a área de estudo, compreendendo 39 poços. Nessa zona as águas dos aquíferos estão expostas a uma susceptibilidade relativa à contaminação, podendo sofrer alterações quando atingidas por contaminantes. As áreas com alto índice de vulnerabilidade estão identificadas por onze poços e ocorrem na parte noroeste e sudeste da área, além de poços isoladas na parte central. Nessa zona as águas do aquífero são mais suscetíveis aos contaminantes.

## 8.2. Fontes Potenciais de Poluição

As fontes potenciais de poluição para as águas subterrâneas são consideradas todas aquelas que, em função de suas características físico-químicas e de localização quanto aos sistemas aquíferos, poderão vir a representar uma fonte poluente comprovada, ou efetiva. Elas podem ser pontuais ou difusas. As fontes pontuais são aquelas originadas das atividades concentradas em uma pequena superfície e de fácil identificação (postos de combustíveis, lixões, lagoas de estabilização e cemitérios). As fontes difusas são aquelas dispersas numa grande área, de difícil localização e controle (ausência de saneamento, águas superficiais poluídas e atividades agrícolas).

Na área de estudo foram definidas algumas atividades que podem vir a alterar as qualidades das águas subterrâneas e superficiais, originadas pela ação, ou não, do homem.

**Postos de Serviços (Tanques de Armazenamento Subterrâneo)** – Segundo Oliveira (1992) *apud* Cavalcante (1998), as experiências em diferentes países têm mostrado que os tanques subterrâneos, sem proteção catódica e que armazenam hidrocarbonetos, apresentam vazamentos aos vinte anos de vida útil. De acordo com o levantamento de campo existem 58 postos de serviços de abastecimento, armazenando aproximadamente quatro milhões de litros de combustível, com predominância de óleo diesel, seguido da gasolina e do álcool. A presença dos postos de combustíveis, principalmente nos centros urbanos, representa um elevado índice de risco de geração de carga poluidora às águas subterrâneas.

**Disposição dos Resíduos Sólidos (Lixo)** - A disposição dos resíduos sólidos gerados pela atividade antrópica, tanto pode gerar fonte de energia quanto substâncias prejudiciais à saúde e poluição dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. O lixo é formado de uma massa heterogênea, variando em função da comunidade que o produz. Os tipos são: doméstico, comercial, público e hospitalar, na área. O principal poluidor produzido pelo lixo é o chorume. É um líquido escuro gerado pela degradação dos resíduos em aterros sanitários ou lixões, originado da umidade natural do lixo, da água de constituição da matéria orgânica e das bactérias em decomposição.

A disposição dos resíduos sólidos nos municípios que compõem a área de estudo ocorre em terrenos baldios e em áreas marginais das sedes municipais. Foram identificados oito grandes pontos de lixão, distribuídos em sete municípios. Segundo Hirata et al. (1997), em estudos de poluição das águas subterrâneas já realizados, a experiência tem mostrado que todos os lixões pesquisados provocam algum tipo de poluição das águas subterrâneas. Assim é de se esperar que esses lixões poderão estar alterando a qualidade da águas. Na caracterização dessa carga poluidora no subsolo deve ser avaliada a quantidade do lixiviado, sua composição (origem), o local de despejo, a topografia da área, a precipitação e o escoamento superficial.

**Lagoas de Estabilização** - As lagoas de estabilização são reservatórios superficiais que servem para receber e armazenar temporariamente os resíduos líquidos constituídos de esgotos domésticos e industriais. Os resíduos químicos são tratados e permanecem durante um período que varia entre um e cem dias. Posteriormente esses resíduos são lançados nos riachos ou rios, deixados para infiltração no solo ou evaporação na atmosfera. A maioria das lagoas tem uma base constituída de materiais naturais, impermeabilizantes, entretanto essas condições permitem infiltração equivalente a 10 – 20 mm/d, sendo as lagoas as mais frequentes causas de contaminação das águas subterrâneas (MILLER & SCALF, 1974 *apud* FOSTER & HIRATA, 1993). Na área de trabalho existem três lagoas de estabilização, localizadas nas cidades de Tianguá, Viçosa do Ceará e Guaraciaba. Os efluentes são lançados nos riachos próximos que drenam os municípios.

**Cemitérios** - Segundo Pacheco et al. (1988), o risco potencial de contaminação das águas subterrâneas por microrganismos que proliferam durante a decomposição dos cadáveres e elementos químicos diversos, constitui-se em um dos impactos ambientais mais importantes, e cita ainda, que os mais suscetíveis a transmitir doenças via meio hídrico são *Clostridium* (tétano, gangrena gasosa, toxi-infecção alimentar), *Mycobacterium* (tuberculose), as enterobactérias *Salmonella typhi* (febre tifóide), *Salmonella paratyphi* (febre paratifóide), *Shigella* (disenteria bacilar) e o vírus da hepatite. Na área de estudo, existem nove cemitérios, situados sobre a unidade hidroestratigráfica localizadas nas cidades de Carnaubal, São Benedito, Ibiapina, Ubajara, Tianguá, Viçosa do Ceará e Guaraciaba.

## 9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nas informações anteriores, apresenta-se a seguir as principais :

1. Apesar dos vários trabalhos técnico-científicos já realizados na Bacia Sedimentar do Parnaíba, as características e potencialidades do aquífero Serra Grande são pouco conhecidas e a maioria desses estudos se concentra na região centro-sul do estado do Piauí, no Vale do Gurguéia;

2. Sucessivas atividades tectônicas geraram estruturas que condicionaram os sentidos de acamamentos e do fluxo de água. Tais estruturas caracterizam-se por juntas ou falhas cisalhantes e normais, que se relacionam ao Lineamento Transbrasiliano.
3. As Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) indicam a ocorrência, em alguns locais, de uma camada resistiva separando o aquífero Serra Grande em dois: o Superior e o Inferior. Porém, a forte atuação tectônica na área, sugere que esses aquíferos estejam interconectados;
4. O levantamento gravimétrico mostra diversos sistemas de *grabens* e *horts*, associados ao Lineamento Transbrasiliano (LTB), onde alguns *grabens* possuem profundidades superiores a 2 km, refletindo maior espessura do pacote sedimentar Serra Grande, conseqüentemente, maior potencial hidrogeológico. As espessuras sugeridas para o Grupo Serra Grande podem variar de 350 a 2600 m;
5. Por acreditar que esses aquíferos (Serra Grande Superior – SGS e Inferior - SGI) estão interconectados através de falhas e fraturas, os mapas potenciométricos foram elaborados considerando o aquífero Serra Grande como único e livre. O fluxo de água subterrânea vai predominantemente de leste para oeste, em direção ao rio Parnaíba;
6. Através do balanço hídrico foi estimada a quantidade de água de precipitação disponível para a recarga subterrânea, que constitui a reserva renovável. Esta parcela do balanço hídrico é aqui denominada de infiltração efetiva ( $I_e$ ). Se considerarmos que a área de estudo tem 12.533,5 km<sup>2</sup>, teremos uma disponibilidade anual de água para recarga de  $2,8 \times 10^9$  m<sup>3</sup>;
7. De acordo com a legislação vigente, as águas apresentam concentrações de cátions e ânions dentro dos limites permitidos;
8. Quanto à classificação iônica, a maioria das águas dos poços é do tipo cloretada sódica ou cloretada mista. Já as águas das barragens são todas cloretadas mistas.
9. Apesar de a área pesquisada ser predominantemente agrícola, não foi detectado resíduo desses componentes, com exceção de um poço que apresentou uma concentração de 0,08 µg/L do composto *Imidacloprid*. Este resultado é decorrente de dois aspectos: o uso de agrotóxico não é contínuo e os agrotóxicos têm, em geral, meia-vida curta;
10. Foram definidas duas zonas de vulnerabilidade natural do aquífero: Média e Alta. Nas zonas com médio índice de vulnerabilidade as águas do aquífero estão expostas a uma susceptibilidade relativa à contaminação, podendo sofrer alterações quando atingidas por contaminantes. As áreas com alto índice de vulnerabilidade as águas do aquífero são mais suscetíveis aos contaminantes;

Com a finalidade de aumentar o conhecimento sobre o aquífero Serra Grande, recomendamos:

1. Implantação de uma rede de monitoramento de água subterrâneas através da medição contínua dos níveis potenciométricos e qualidade das águas, assim como, das vazões dos rios que drenam a área de pesquisa para determinar a quantidade de água que sai da bacia por escoamento superficial;

2. Realização de análise de resíduos de agrotóxicos em solos da região, visando a detecção desses componentes;
3. Aplicação de técnicas geofísicas eletromagnéticas com maior poder de investigação vertical e maior resolução, através das técnicas de CSAMT (fonte controlada) e MT (magnetotelúrico) visando apontar e dimensionar os melhores locais para perfuração de poços. Também fica recomendado a execução de poços estratigráficos para avaliações geológicas detalhadas e pesquisas hidrogeológicas de potencial aquífero.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- ANA. HidroWeb. **Agência Nacional de Águas**, 2014. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 2013.
- CASTANY, G. **Prospección y explotación de las aguas subterráneas**. Barcelona: Omega, 1975.
- CAVALCANTE, I. N. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada de recursos hídricos na região metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 1998.
- COSTA, W. D. **Avaliação das reservas, potencialidades e disponibilidade de aquífero**. Anais do 10 Congresso Brasileiro de Águas Subterráneas. São Paulo: ABAS. 1998. p. Trabalho 50, p 11.
- FOSTER, S. et al. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Servmar (Serviços Técnicos Ambientais). São Paulo, p. 114p. 2006.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. C. A. Determinação do risco de contaminação das águas subterráneas: Um método baseado em dados existentes. **Boletim 10**, São Paulo, 1993. 90p.
- IRITANI, M. A. et al. **Avaliação dos valores de transmissividade do aquífero sedimentar no município de Caçapava (SP), com base na capacidade específica**. I Congresso Mundial Integrado de Águas Subterráneas. Fortaleza: ABAS. 2000. p. 21.
- LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. **Geophysics**, p. 1682 - 1690, 1995.
- MARINHO, J. M. L. **Inversões de sondagens de eletrorresistividade com aplicação ao estudo de aquíferos clásticos na região Acaraú-Itarema, Ceará**. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 1997.
- PACHECO, A.; MENDES, J. M. B.; HASSUDA, S. **O problema geoambiental da localização de cemitérios em meio urbano**. 5 Congresso Brasileiro de Águas Subterráneas. São Paulo: ABAS. 1988. p. 207 - 215.
- RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água - Tecnologia atualizada**. 3a. Reimpressão - 2000. ed. [S.l.]: Edgard Blucher Ltda, 1991.
- VIDAL, C. L. R. **Disponibilidade e gerenciamento sustentável do aquífero Serra Grande no município de Picos - Piauí**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 171. 2003.
- VILELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Editora McGraw Hill, 1975.
- ZOHDY, A. A. R. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. **Geophysics**, p. 245 - 253, 1989.