

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DE BACIAS SEDIMENTARES DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO

Robério Bôto de Aguiar¹, Liano Silva Veríssimo¹, Fernando Antônio Carneiro Feitosa¹; Jaime Quintas dos Santos Colares¹; Franklin de Moraes²; Manoel Júlio da T. G. Galvão²; Waldir Duarte Costa Filho²; Leanise Teixeira Oliveira³ e José Cláudio Viegas³

Resumo – Este projeto é resultante do Convênio CPRM/FINEP firmado com o objetivo de levantar, gerar e disponibilizar informações e conhecimentos sobre a ocorrência, potencialidades, circulação e utilização das águas subterrâneas em bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste. Será desenvolvido através de uma rede cooperativa de pesquisa com a participação de algumas Universidades Federais da região. Das dezoito bacias sedimentares incluídas no Polígono das Secas, seis foram selecionadas para execução dos estudos hidrogeológicos. As ações iniciam pelo levantamento do conhecimento existente, passam pela caracterização geológica e geométrica do reservatório, pela caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica e culminam com a proposição de elementos de suporte a gestão das águas subterrâneas.

Abstract – This project is resultant of Accord CPRM/FINEP firmed with the objective of raising, generating and to disponibilizar information and knowledge on the occurrence, potentialities, circulation and use of underground waters in sedimentary basins of the northeast half-barren region. It will be developed through a cooperative net of research with the participation of some Federal Universities of the region. Of the eighteen enclosed sedimentary basins in the Polygon of the Droughts, six had been selected for execution of the hidrogeológicos studies. The actions initiate for the survey of the existing knowledge, pass for the geologic and geometric characterization of the reservoir, for the hidrogeológica and hidrogeoquímica characterization and culminate with the proposal of support elements the management of underground waters.

Palavras-Chave – Hidrogeologia; Bacia Sedimentar; Nordeste.

¹Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Av. Antonio Sales, 1418, Dionisio Torres, Fortaleza-Ce. Tel. (085) 3246-1242, Fax (085) 3246-1686. boto@fo.cprm.gov.br; liano@fo.cprm.gov.br; ffeitosa@fo.cprm.gov.br; jaime@fo.cprm.gov.br

²Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Av. Sul, 2291, Afogados, Recife-Pe. Tel. (081) 3428-0623, Fax (081) 3428-1511. franklin@re.cprm.gov.br; mjtgg@re.cprm.gov.br; waldir@re.cprm.gov.br;

³Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Av. Ulises Guimarães, 2862, Sussuarana, Salvador-Ba. Tel. (071) 3230-9977, Fax (071) 3271-4005. leanize@sa.cprm.gov.br; jcviegas@sa.cprm.gov.br.

1 – INTRODUÇÃO

No Nordeste semi-árido do Brasil, carente de águas superficiais, verifica-se que a utilização dos recursos hídricos subterrâneos vem sendo feita normalmente sem o desenvolvimento de estudos hidrológicos e hidrogeológicos específicos ou mesmo básicos, o que impossibilita a elaboração de programas gerenciais de natureza conservativa.

Nessa região, embora os poços sejam perfurados desde o início do século passado, somente a partir de 1960, com a criação da Sudene, a hidrogeologia no Brasil começou a ser tratada como ciência. Na época, a Sudene promoveu um reconhecimento hidrogeológico pioneiro da sua região de atuação, materializado no *Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste*, cujas informações ainda são referência até hoje. Esses estudos, que abriram as portas para uma visualização da potencialidade hidrogeológica da região, foram paralisados no início da década de 70 em função da desmobilização da Sudene como órgão executor.

Mesmo assim, a utilização dos recursos hídricos subterrâneos aumentou vertiginosamente, principalmente nos locais de maior potencialidade e em função da necessidade de uma fonte de água para a região, imposta pelas suas condições climáticas. O reflexo disso é a contribuição da água subterrânea em parcelas significativas, tanto para o abastecimento público como para usos diversos, inclusive irrigação. Esse aumento do uso, em grande parte, não foi conduzido através de planejamentos calcados no conhecimento, sendo o resultado de consecutivos programas emergenciais de combate aos efeitos da seca e de esforços isolados de companhias de saneamento e da iniciativa privada. Tratando-se de uma região semi-árida, a água subterrânea torna-se um recurso estratégico para o desenvolvimento e nesse sentido a região ressentiu-se desses 25 anos de estagnação do conhecimento hidrogeológico regional causada pela paralisação das atividades executadas pela Sudene.

Nesse cenário, o Ministério da Ciência e Tecnologia, por intermédio da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, responsável pelo Fundo Setorial de Recursos Hídricos, implantou a linha de pesquisa de água subterrânea “*Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro*”, objetivando resgatar a importância do conhecimento hidrogeológico como propulsor do desenvolvimento sócio-econômico regional.

Cabe ressaltar que essa linha de pesquisa vem ao encontro do **Programa de Água Subterrânea para a Região Nordeste**, elaborado e em desenvolvimento pelo Serviço Geológico do Brasil/CPRM. Diante desse fato, a CPRM firmou convênio com a FINEP para executar, através de uma Rede Cooperativa de Pesquisa com Universidades Federais, este estudo hidrogeológico em bacias sedimentares da região semi-árida, que, além de totalmente alinhada com a sua missão, constitui uma ação já planejada para a região.

2 – OBJETIVOS E FINALIDADES

Este trabalho tem o objetivo de levantar, gerar e disponibilizar informações e conhecimentos sobre a ocorrência, potencialidades, circulação e utilização das águas subterrâneas em bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste. Com isso elevar a disponibilidade hídrica de fontes de água para abastecimento humano e atividades produtivas, de forma a fomentar o desenvolvimento sócio-econômico sustentável da região e melhorar as condições de vida da população existente nestes locais.

3 – JUSTIFICATIVAS

A região Nordeste do Brasil tem uma área de 1.561.000 km², dos quais cerca de 1.237.000 km² correspondem ao denominado Polígono das Secas, instituído pela Lei 1.348 de 10.02.1957. A população desta região é da ordem de 45 milhões de habitantes, 61% dos quais residentes em áreas urbanas. O Polígono das Secas é caracterizado por uma escassez dos recursos hídricos de superfície, resultante das baixas precipitações pluviométricas, que além de concentradas em uma única e geralmente curta estação úmida, apresentam irregularidades interanuais, responsáveis por secas periódicas de efeitos muitas vezes catastróficos. Dessa forma, a água no Nordeste é um recurso estratégico e um fator vital para o seu desenvolvimento sócio-econômico, que ainda está à espera de uma política de decisões mais consistentes e contínuas, que possa aumentar sua oferta, garantir a qualidade e permitir a formação de uma infra-estrutura que ajude o nordestino a conviver com os efeitos danosos das secas.

A região do Polígono das Secas tem o seu subsolo constituído predominantemente (cerca de 70%) por rochas ígneas e metamórficas, genericamente chamadas de cristalinas. A pequena disponibilidade de água superficial aliada a baixa e irregular pluviosidade explica a grande dependência dos habitantes e dos rebanhos da região em relação à água subterrânea, mesmo sendo essa, na maior parte, uma alternativa tênue pela reduzida vocação hidrogeológica das rochas cristalinas. Ao contrário dessas rochas, as bacias sedimentares existentes são responsáveis pelos maiores volumes de água subterrânea do semi-árido, que muitas vezes são utilizados de forma incipiente, principalmente nas zonas rurais. Abstraindo-se o abastecimento público de alguns centros urbanos, a utilização da água desses mananciais ainda pode ser considerada como insignificante. Essa precária utilização de um recurso tão necessário para o Nordeste passa pelo fato de não existir um conhecimento preciso de sua potencialidade, o que impede o planejamento de sua utilização para o desenvolvimento da região.

Além de fundamentais para o desenvolvimento sócio-econômico da região, acredita-se que as informações a serem levantadas e disponibilizadas são indispensáveis na medida em que estas bacias podem funcionar como reservatórios de água doce, encravados nas rochas cristalinas. Isso beneficiaria tanto a população residente sobre a sua área de ocorrência quanto em seu entorno, através de sistemas de adução de pequeno porte e baixo custo construtivo.

4 – ASPECTOS DA HIDROGEOLOGIA DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO

4.1 – Províncias Hidrogeológicas do Nordeste

Na região Nordeste do Brasil, em função de características geológicas e similaridades na ocorrência de água subterrânea, podem ser individualizadas quatro províncias hidrogeológicas (Figura 1): Escudo Oriental Nordeste, São Francisco, Parnaíba e Costeira. Ressalva-se que esta classificação foi adotada quando da elaboração do Mapa Hidrogeológico do Brasil na escala 1:5.000.000 (CPRM/DNPM, 1981) e hoje, em função do avanço do conhecimento geológico, tende a sofrer pequenas alterações. A CPRM vem estudando uma nova sugestão de domínios hidrogeológicos a ser apresentada quando do lançamento do Mapa Hidrogeológico do Brasil ao milionésimo, atualmente em elaboração.

- **Província do Escudo Oriental Nordeste** – é constituída predominantemente de rochas cristalinas e apresenta, em geral, um potencial hidrogeológico muito fraco. Essa deficiência está relacionada diretamente com as condições de ocorrência e circulação das águas subterrâneas, que é agravada em função das características do clima semi-árido que provoca taxas elevadas de salinidade nas águas. Dentro desse universo de rochas cristalinas ocorrem pequenas ilhas de rochas sedimentares, denominadas de bacias interiores. Tendo em vista as condições favoráveis de ocorrência de água subterrânea, essas bacias tornam-se importantes referências no aspecto recursos hídricos.
- **Província do São Francisco** - predominam aquíferos restritos às zonas fraturadas em quartzitos, metagrauvas, metaconglomerados, calcários e dolomitos, com potencialidade de baixa a média. Os aquíferos tornam-se mais amplos quando ocorrem associados com rochas porosas do manto de intemperismo ou, em caso dos calcários e dolomitos, onde a dissolução cárstica atuou amplamente. Outro sistema enquadrado neste domínio são as coberturas de extensão regional formadas por sedimentos mesozóicos, entre as quais se destaca a Bacia do Urucua. Atualmente essa bacia vem revelando um excelente potencial de água subterrânea, com características muito distintas do restante das coberturas (Areado e Mata da Corda) e devendo, posteriormente, ser enquadrada num domínio diferenciado.

- **Província do Parnaíba** – é representada pela bacia sedimentar do Parnaíba e constitui o maior potencial de água subterrânea do Nordeste. As formações geológicas apresentam-se conforme uma série alternada de camadas permeáveis e menos permeáveis, dando origem a sistemas aquíferos regionais, em condições hidráulicas livres e confinadas (às vezes surgentes). Os principais sistemas aquíferos, ordenados conforme sua importância de produção, são: Cabeças, Serra Grande e Poti-Piauí. Outros aquíferos menos produtivos correspondem às Formações Motuca, Corda e Itapecuru.
- **Província Costeira** - corresponde a extensa faixa litorânea do país, estendendo-se desde o Amapá até Rio Grande do Sul, sendo formada de nove subprovíncias, das quais sete ocorrem na região Nordeste: Barreirinhas, Ceará e Piauí; Potiguar; Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte; Alagoas e Sergipe; Tucano, Recôncavo e Jatobá, e Litoral da Bahia. Em alguns trechos a província apresenta-se com penetrações para o interior, como se observa nas áreas das subprovíncias Potiguar e Recôncavo-Tucano-Jatobá. Os aquíferos mais promissores e bem distribuídos correspondem aos clásticos inconsolidados e fracamente consolidados de idade cenozóica, que apresentam bons índices de produtividade média, sendo aproveitados em diversas áreas, principalmente para o abastecimento populacional.



Figura 1 – Províncias Hidrogeológicas do Nordeste

4.2 – Bacias Sedimentares do Nordeste

Das 26 bacias sedimentares localizadas na região nordeste do Brasil, conforme mostra a figura 2, observa-se que dezoito (em negrito) estão inseridas no Polígono das Secas, área prioritária para a execução dos projetos da linha de pesquisa apresentada pelo Ministério de Ciências e Tecnologia – MCT. Embora fora do Polígono das Secas, a Bacia Sedimentar do Urucuia foi contemplada em função de sua importância para a região.

Mesmo essas bacias estando numa região hidricamente crítica, existem alguns fatores que contribuem para que os estudos não sejam realizados em todas elas. Para isso, tem se a necessidade de selecionar as áreas mais prioritárias para implementação das ações previstas no Projeto.

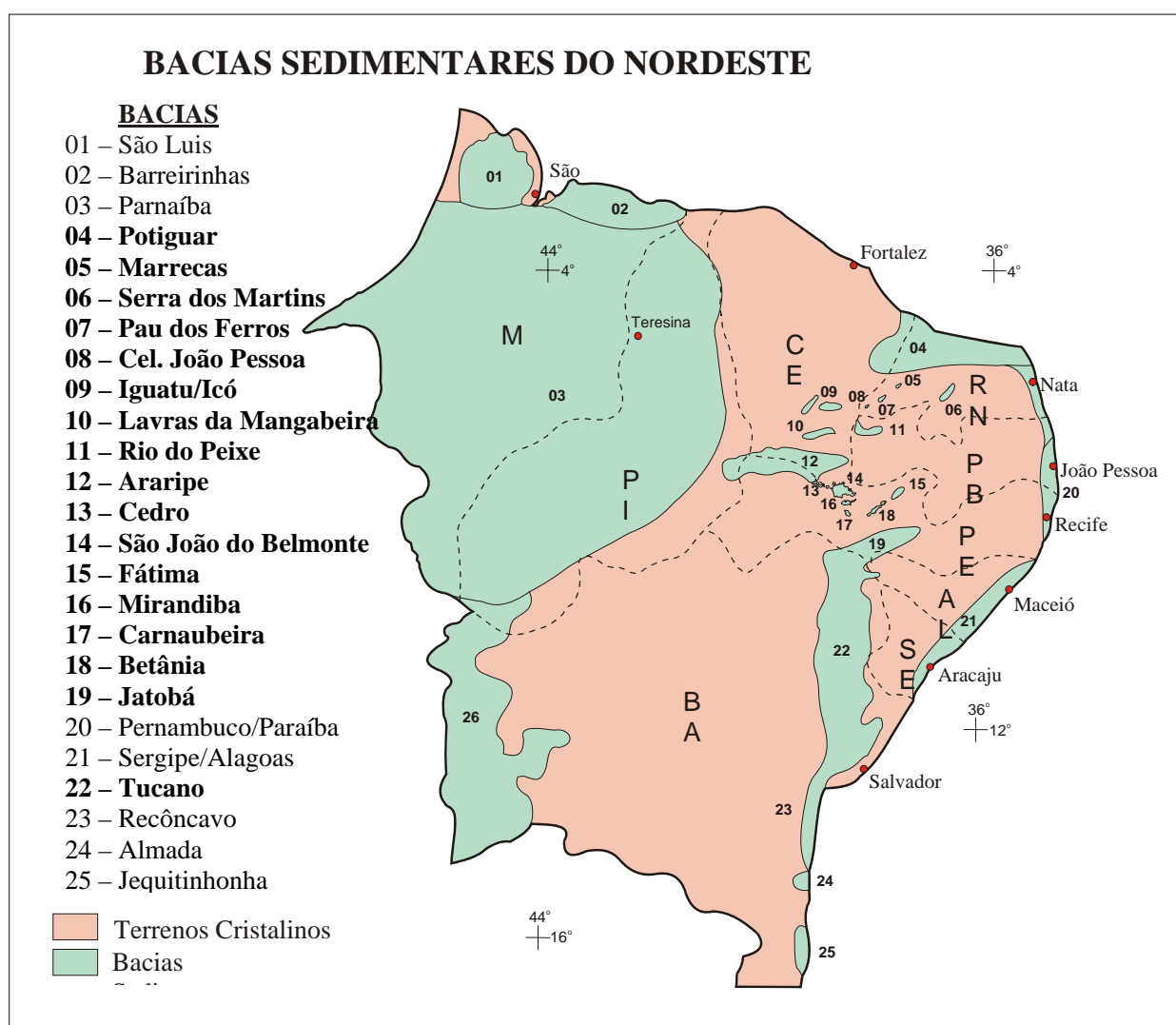


Figura 2 – Bacias Sedimentares do Nordeste Brasileiro

5 – REDE COOPERATIVA DE PESQUISA

O Projeto *Estudos Hidrogeológicos de Pequenas Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro*, proposto pela CPRM dentro da linha de pesquisa aberta pelo MCT, será desenvolvido numa Rede Cooperativa de Pesquisa com a participação das seguintes instituições:

UFC – Universidade Federal do Ceará

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UFCEG – Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFBA – Universidade Federal da Bahia

A CPRM participará como uma espécie de “âncora”, atuando em todas as áreas selecionadas para o trabalho e assumindo, em grande parte, a responsabilidade de execução das tarefas básicas de coletas de dados. Embora assumindo esta postura, a CPRM também participará de todas as fases de geração de conhecimento, através de interpretações realizadas com os dados coletados, trabalhando, neste caso, em íntima associação com as Universidades.

6 – SELEÇÃO DAS ÁREAS DE TRABALHO

Inicialmente, a CPRM, através das Unidades Regionais de Fortaleza, Recife e Salvador, realizou o levantamento sobre a situação de cada bacia inserida no projeto. A partir desse levantamento, a CPRM e as Universidades (Rede Cooperativa) selecionaram as áreas (bacias sedimentares) onde serão realizados os estudos e definiu uma metodologia a ser adotada para execução das atividades. Os critérios de seleção adotados levaram em consideração os seguintes fatores:

- a) Baixo nível de conhecimento da potencialidade hídrica subterrânea da bacia;
- b) Baixa disponibilidade de Recursos Hídricos Superficiais no local;
- c) Alto consumo de Água Subterrânea;
- d) Alto índice de captação sem mecanismos de gestão;
- e) Não existência de estudos em desenvolvimento ou a iniciar (item excludente).

No quadro 1 são apresentadas as bacias a serem estudadas, as instituições participantes e os critérios de escolha para cada uma delas.

Quadro 1 – Bacias selecionadas para a realização dos estudos propostos

Atores	Bacia/Foco do Trabalho		Crítérios
CPRM/UFC	A	Lavras da Mangabeira/Estudo de Reconhecimento	a; b; e
	B	Araripe/Aquífero Missão Velha e Rio da Batateira	b; c; d
CPRM/UFRN	C	Apodi/Área de recarga do Aquífero Açú	a; c; d; e
CPRM/UFCE	D	Rio do Peixe/Aquífero Antenor Navarro	a; c; d; e
CPRM/UFPE	E	Jatobá/Caracterização global da porção oriental	a; e
CPRM/UFBA	F	Urucua/Sub-bacias dos rios Arrojado e Formoso	a; e

Na bacia de Lavras da Mangabeira o trabalho será realizado em nível de reconhecimento, tendo a finalidade de caracterizá-la quanto ao seu potencial hidrogeológico. No Araripe a abordagem será focada no detalhamento da caracterização hidrogeológica do aquífero Missão Velha/Rio da Batateira em sua porção oriental, priorizando a elaboração da potenciometria regional. Na bacia do Apodi o foco do trabalho ficará centrado na área de recarga do Aquífero Açú entre os rios do Carmo e Mulungu, dando continuidade ao estudo já desenvolvido pela SRH/RN na área compreendida entre o limite do estado do Rio Grande do Norte, a oeste, e o Rio do Carmo, a leste. Na bacia do Rio do Peixe os trabalhos visam a caracterização hidrogeológica detalhada do aquífero Antenor Navarro em toda a extensão da bacia. Na bacia de Jatobá o foco será uma caracterização hidrogeológica geral da bacia em sua porção oriental, delimitada pelos meridianos 37° 50' e 37° 10' e pelos paralelos 8° 20' e 9° 00'. Na bacia do Urucua, dada a sua extensão geográfica, foi selecionada uma área piloto para desenvolvimento das ações, representada pelas sub-bacias hidrográficas dos Rios Arrojado e Formoso.

7 – DESCRIÇÃO METODOLÓGICA DAS AÇÕES PREVISTAS

7.1 – Levantamento do Estado da Arte da Hidrogeologia

A fase inicial do trabalho será, necessariamente, a execução de um exaustivo levantamento bibliográfico e de dados existentes. Deverão ser resgatados (cópias) todos os trabalhos realizados anteriormente nas bacias selecionadas. Serão priorizados estudos hidrogeológicos sem, no entanto, descartar as áreas correlatas (Geologia, Geofísica etc). Esses trabalhos serão organizados, analisados e as informações pertinentes serão devidamente registradas, de modo a se gerar, tanto a história bibliográfica como a síntese do conhecimento existente em cada bacia, o que permitirá o planejamento detalhado e facilitará a execução das etapas seguintes previstas no presente estudo. Esta ação deverá ser executada pela equipe técnica da CPRM conforme planejamento elaborado preliminarmente com a participação das universidades.

Paralelamente será desenvolvido um sistema de informações que será alimentado à medida que sejam disponibilizados dados de cada bacia estudada, em função do levantamento e análise feita no item anterior. Este arquivo será alimentado durante todo o projeto e representará o estado da arte do conhecimento de cada bacia estudada. Esta ação também deverá ser executada pela equipe técnica da CPRM conforme planejamento elaborado preliminarmente com a participação das universidades.

Com base nas informações levantadas e sintetizadas, será elaborado um relatório preliminar onde constará uma síntese do conhecimento existente em cada bacia, o qual servirá de base para a orientação e planejamento de todas as atividades futuras. A elaboração deste relatório passará necessariamente por novas interpretações com base na correlação de todas as informações julgadas consistentes e deverá contar efetivamente com a participação das universidades. Nesse sentido, a rede cooperativa de pesquisa deverá ser um mecanismo fundamental na medida em que permitirá a utilização das excelências para cada área específica analisada.

7.2 – Caracterização Geológica e Geométrica das Bacias

7.2.1 – Revisão Geológica

Deverão ser analisadas cuidadosamente e interpretadas as imagens de satélite e fotos aéreas das áreas referentes às bacias selecionadas, disponíveis ou adquiridas, para determinação de toda a rede de drenagem superficial, espelhos d'água, contatos geológicos, geomorfologia, estruturas, ocupação do solo etc. Esta etapa deverá ser amparada pelo conhecimento já existente de cada bacia e, ao final, será confeccionado um mapa-base (*overlay*) de todas as informações disponibilizadas, que funcionará como suporte para os trabalhos de campo.

Serão realizadas etapas de campo para confirmar as interpretações feitas a partir das imagens e fotos aéreas e dirimir dúvidas quanto a litologia e estratigrafia. De uma forma genérica deverão ser feitas observações englobando os aspectos geomorfológico, litológico e estrutural.

7.2.2 – Caracterização Geométrica por Processos Geofísicos

A metodologia de levantamento geofísico consiste na aplicação das ciências físicas ao estudo da parte mais superficial da crosta terrestre, utilizando as propriedades físico-químicas das camadas do subsolo, ou as características relacionadas com alguma dessas propriedades. Resumidamente, esse tipo de prospecção consiste em levantar os valores de uma determinada propriedade numa região de interesse e em analisar as discrepâncias ou anomalias em relação ao valor normal encontrado. Dois métodos clássicos utilizados em estudos de água subterrânea são: gravimetria e eletrorresistividade.

O método gravimétrico tem aplicações importantes nos estudos das bacias sedimentares para a exploração de água subterrânea e na compreensão da estrutura da crosta de grandes segmentos litosféricos. A importância da gravimetria na pesquisa de água subterrânea é comparável ao seu uso na prospecção de petróleo. A identificação de falhas verticais e de espessamentos sedimentares é um processo rotineiro e de fácil compreensão na aplicação do método, embora muitas vezes envolvendo ambigüidades. A identificação de depressões tectônicas em bacias sedimentares tem uma importância fundamental na delimitação de aquíferos porosos, e conseqüentemente, na sua modelagem e na locação de poços. O entendimento e a quantificação tridimensional de uma bacia constituem valiosas informações na hora de efetuar modelagens e avaliar reservas disponíveis.

O método de eletrorresistividade através da aplicação de sondagens elétricas verticais (prospecção vertical) e de caminhamentos elétricos (prospecção horizontal) é utilizado de forma muito intensa na pesquisa de água subterrânea, desde os primórdios da hidrogeologia no Brasil. Através desta metodologia é possível conseguir informações básicas sobre a separação de formações arenosas de formações argilosas, variações de espessura, descontinuidades laterais, profundidade e feições do embasamento cristalino, variações de transmissividade e da qualidade da água, entre outras.

Nesse trabalho, por conta da relação custo-benefício, serão realizados levantamentos geofísicos apenas em áreas onde as informações básicas sejam incipientes ou quando seja necessário um esclarecimento de cunho geológico julgado imprescindível para o desenvolvimento das atividades planejadas. Deverão ser utilizados métodos gravimétricos e/ou eletrorresistividade, tendo-se como premissa básica à necessidade do conhecimento da morfologia do embasamento cristalino, da existência de descontinuidades laterais e das variações de espessura das camadas do subsolo.

O processamento dos dados e interpretação dos resultados deverão ser realizados pelas empresas ou instituições contratadas ou conveniadas para a execução dos levantamentos geofísicos. Os dados brutos serão disponibilizados juntamente com os dados processados e interpretações realizadas para análise tanto da CPRM como das universidades integrantes da rede.

7.3 – Caracterização Hidrogeológica

7.3.1 – Seleção da rede de poços para monitoramento

Para o desenvolvimento dos estudos hidrogeológicos propostos neste documento será selecionada uma rede de pontos d'água representativa para cada área, considerando o foco do estudo. A maior parte destes pontos é representada por poços tubulares e na seleção devem ser considerados os seguintes critérios:

- a) Existência de dados construtivos e litológicos dos poços e;
- b) Captação apenas do nível aquífero considerado como foco do estudo. Poços captando diversos níveis ou Formações Aquíferas não são representativos.

Essa seleção terá por base os poços existentes no sistema SIAGAS/CPRM, que será complementado com informações obtidas em cadastros de órgãos públicos e/ou empresas privadas. O cadastro resultante será analisado para definir uma rede de pontos padrão a serem visitadas em campo.

Após a visita de campo, será feita uma última análise e a seleção final dos poços mais representativos de cada sistema aquífero foco do estudo. Serão buscadas as informações complementares (fichas dos poços) referente aos novos poços cadastrados em campo. A seleção dos pontos será feita de forma integrada pela CPRM e universidades.

A partir da rede de pontos d'água serão selecionados pontos chaves para a implantação de monitoramento potenciométrico e qualitativo. Serão medidos sistematicamente com periodicidade trimestral os níveis d'água dos poços e recolhidas amostras para a realização de análises físico-químicas e isotópicas. A seleção dos pontos será feita de forma integrada pela CPRM e universidades.

Após a análise da distribuição da rede pluviométrica existente serão escolhidos pontos para a implantação de pluviógrafos (com *data-log*) e infiltrômetros. Estes equipamentos deverão ser instalados prioritariamente em pontos já pertencentes à rede hidrometeorológica operada pela CPRM, de forma a minimizar os custos de monitoramento (fica integrado a atividade de operação da rede) e garantir a preservação dos equipamentos, que ficarão sob a responsabilidade do observador hidrológico que já presta serviços à CPRM. Caso não seja possível coincidir o ponto de implantação dos equipamentos com um ponto da rede, deve-se verificar a possibilidade de inclusão deste novo ponto à rede hidrometeorológica.

7.3.2 – Nivelamento Altimétrico dos Pontos D'água Selecionados

Tendo por objetivo a elaboração da potenciometria do(s) aquífero(s) em foco, os poços integrantes da rede de pontos d'água serão nivelados altimetricamente. Devido à exatidão necessária para se estabelecer à superfície potenciométrica dos sistemas aquíferos, nesse nivelamento será empregado o sistema geodésico de posicionamento global, utilizando-se a ferramenta denominada de GPS Geodésico, capaz de fornecer dados consistentes com precisão centimétrica. No momento da medida da cota do poço também será medido o nível d'água. O trabalho será executado por técnicos da Divisão de Cartografia da CPRM e contará com uma consultoria especializada para orientação e avaliação de qualidade dos dados coletados.

7.3.3 – Elaboração de Mapas Potenciométricos

Serão elaborados mapas potenciométricos referentes aos aquíferos estudados, através dos quais será possível visualizar as direções preferenciais do fluxo subterrâneo, divisores de fluxo, zonas submetidas a superexploração, exutórios etc. Será feito um acompanhamento trimestral da potencimetria, que permitirá verificar possíveis respostas a recarga no período chuvoso e ao aumento da exploração que ocorre geralmente no período de estiagem. Os resultados subsidiarão a calibração dos modelos que serão utilizados como ferramentas de gestão.

7.3.4 – Balanço Hídrico

Nos estudos de sistemas hidrológicos e hidrogeológicos de uma determinada área é fundamental o conhecimento do ciclo hidrológico e a elaboração do balanço hídrico da região. A avaliação quantitativa do ciclo hidrológico é feita através da *equação geral do balanço hídrico*, que obedece ao princípio da conservação da massa ou da continuidade, segundo o qual, num sistema qualquer, a diferença entre as entradas e as saídas é igual à variação do armazenamento dentro do próprio sistema. Por isso, a quantificação dos componentes do ciclo hidrológico, denominada de balanço hídrico, requer o estabelecimento de uma unidade de área onde seja possível considerar a precipitação pluviométrica como a única entrada de água. De modo a atender essa exigência, nos estudos hidrogeológicos adota-se como área de trabalho a bacia hidrográfica, delimitada por seus divisores de água superficial, que além de atender essa exigência, permite a quantificação do volume de saída. Assim, para elaboração do balanço hídrico das bacias selecionadas, que permitirá inferir os valores e, possivelmente, os mecanismos de recarga de cada uma delas, deverão ser coletados, selecionados e analisados os dados climatológicos disponíveis (pluviométricos, fluviométricos, de evapotranspiração etc.), das áreas de interesse desse trabalho. Inicialmente será calculado um balanço preliminar, com os dados disponíveis, feitos ajustes ao balanço, à medida que forem sendo coletados dados adicionais e aumentado o conhecimento sobre a bacia, até se chegar ao fechamento do balanço ao final do projeto.

7.3.5 – Construção de Piezômetros

Serão perfurados piezômetros, próximos a poços produtores pré-selecionados para a realização de testes de aquíferos, os quais servirão como base para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos. Estes poços terão unicamente o objetivo de servirem como poços de observação e serão perfurados em 6”, sendo telados e revestidos em 2”. Os piezômetros

perfurados serão os pioneiros de uma rede de monitoramento de água subterrânea a ser implantada nacionalmente pelo Serviço Geológico do Brasil. A priori, considera-se, em função da escala de trabalho, que os aquíferos estudados tenham um comportamento homogêneo e isotrópico, sendo previsto a construção de apenas um piezômetro para cada poço produtor (poço onde será feito o bombeamento). Um arranjo diferente (mais de um piezômetro) ou piezômetros multi-níveis poderão ser construídos para casos específicos a serem definidos quando do planejamento do teste a ser realizado de forma integrada pelas equipes técnicas da CPRM e universidades.

7.3.6 – Testes de Aquífero e Determinação de Parâmetros Hidrodinâmicos

Após a perfuração e a completação de um poço produtor de água subterrânea, deve ser sempre executado um teste de bombeamento para possibilitar um maior conhecimento das condições hidrodinâmicas do aquífero a ser explorado ou simplesmente definir a capacidade produtiva do próprio poço.

Considerando que são objetivos desse estudo a quantificação das reservas e a elaboração de modelos computacionais de fluxo dos aquíferos estudados em cada bacia, está programada a execução de testes de aquífero para subsidiar a avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos, sem os quais não se poderia executar as atividades mencionadas. Ressalta-se que na quase totalidade dos poços perfurada para água subterrânea não é executado teste de aquífero, mas apenas um simples teste de vazão que tem como objetivo o dimensionamento de um equipamento de bombeamento. Deste modo, são muito raras informações consistentes quanto a parâmetros hidrodinâmicos. Os testes deverão ter duração de 48 horas de bombeamento, onde será feito o acompanhamento no tempo da evolução do nível dinâmico, e 24 horas de registro da recuperação (retorno do nível à condição de equilíbrio original).

7.3.7 – Elaboração de Modelos – Conceituais e Computacionais

A junção da caracterização geométrica, litológica e hidrogeológica das bacias estudadas permitirá a elaboração de modelos conceituais tridimensionais de fluxo para os aquíferos em foco. Com o auxílio de *softwares* específicos e com base nos modelos conceituais, serão desenvolvidos modelos computacionais, os quais serão calibrados e validados, utilizando-se a potenciometria determinada inicialmente e suas variações no tempo, e feitas simulações de exploração para diversos cenários e usos. A gestão do aquífero é de fundamental importância para assegurar uma sustentabilidade de um programa de abastecimento e/ou de irrigação que

possa vir a ser implantado nas regiões. Para tanto, os modelos funcionam como ferramentas que podem subsidiar planos de gestão que definam os procedimentos necessários a uma exploração racional dos recursos subterrâneos disponíveis.

7.3.8 – Avaliação de Reservas, Recursos, Potencialidades e Disponibilidades

A partir de todos os dados levantados e utilizando os modelos desenvolvidos como apoio, serão avaliadas reservas, recursos, potencialidades e disponibilidades dos sistemas aquíferos. Este é um tema que apresenta muitas controvérsias e pontos de vista distintos entre os pesquisadores da área. O Serviço Geológico do Brasil deverá adotar os conceitos propostos em seu livro “*Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*” (Feitosa, F.A.C et al., Coord, 3ª Ed.), atualmente no prelo, que teve, na concepção do texto referente a este tema, a participação de profissionais considerados referência na hidrogeologia brasileira.

7.4 – Caracterização Hidroquímica e Isotópica

7.4.1 – Análises Hidroquímicas

Serão realizados estudos hidrogeoquímicos e de qualidade da água, verificando-se além de sua classificação para os diversos usos, a sua interação e modificações sofridas ao longo do fluxo desde a zona de recarga até o ponto da captação e zonas de exutórios naturais. Os estudos serão desenvolvidos basicamente pelas universidades e a CPRM participará apoiando as coletas de campo, custeando parte das análises realizadas e a título de treinamento nas fases interpretativas. Alguns parâmetros deverão ser analisados *in loco* como o *pH*, a condutividade elétrica e a temperatura, através de equipamentos portáteis.

Serão feitas coletas trimestrais de água para análise, em pontos representativos da rede selecionada. As amostras serão coletadas, armazenadas e transportadas segundo os procedimentos padrões aplicados para cada tipo de análise. Estes procedimentos serão acordados previamente pelas equipes técnicas participantes do projeto.

As amostras coletadas serão enviadas aos laboratórios pré-selecionados para a realização das análises. A quantidade e os elementos detectados nas análises serão definidos previamente, para cada área e amostra, pela equipe técnica da CPRM e Universidade, em função do tipo de resposta e do foco desejado. Na medida do possível, deve-se utilizar os laboratórios existentes nas próprias universidades participantes da rede cooperativa.

Os resultados das análises serão disponibilizados para os interessados integrantes da rede de pesquisa. As interpretações serão realizadas pelas universidades, e a CPRM participará a título de treinamento.

7.4.2 – Análises Isotópicas

Os estudos isotópicos na hidrogeologia têm a finalidade básica de obter informações sobre o tempo de residência da água no aquífero, interações entre água subterrânea e superficial, informações sobre mecanismos de recarga e interações entre aquíferos (drenanças verticais). Em geral, os estudos isotópicos são aplicados na tentativa de dirimir dúvidas existentes e não esclarecidas pelos métodos convencionais de pesquisa. As conclusões resultantes devem subsidiar a elaboração de modelos conceituais mais próximos da realidade, o que permite a elaboração de modelos computacionais mais consistentes.

No projeto está previsto a realização de análises para O^{18} , D e C^{14} . A coleta de amostra deverá ser feita paralelamente a segunda campanha de coleta para as análises físico-químicas. Em função da análise dos resultados obtidos na primeira campanha de coleta de água e de informações referentes ao fluxo, zonas de recarga e exutórios naturais, serão selecionados os pontos em zonas onde existem dúvidas, para serem realizadas as análises isotópicas. As amostras serão coletadas, armazenadas e transportadas segundo os procedimentos padrões aplicados para cada tipo de análise. Estes procedimentos serão acordados previamente pelas equipes participantes da rede cooperativa.

As amostras coletadas serão enviadas aos laboratórios pré-selecionados para a realização das análises. O tipo de análise será definido previamente, para cada área e amostra, em função do tipo de resposta e do foco desejado. Na medida do possível, deve-se buscar a utilização de laboratórios existentes nas próprias universidades envolvidas.

Os resultados das análises serão disponibilizados para os interessados integrantes da rede de pesquisa. As interpretações serão realizadas pelas universidades, e a CPRM participará a título de treinamento.

7.5 – Suporte ao Planejamento e a Gestão das Águas Subterrâneas

Esta atividade visa proporcionar aos órgãos gestores dos recursos hídricos algumas ferramentas auxiliares para o gerenciamento da água subterrânea. A gestão do aquífero é de fundamental importância para assegurar uma sustentabilidade de um programa de abastecimento e/ou irrigação que possa vir a ser implantado na região estudada. Para tanto, os modelos funcionam como ferramentas que podem subsidiar planos de gestão que definam os procedimentos necessários a uma exploração racional dos recursos hídricos disponíveis. Com isso serão realizadas simulações de exploração para diversos cenários e usos. O resultado final das simulações permitirá, utilizando-se como base a política estadual de recursos hídricos, estabelecer um modelo de gestão que terá como base o zoneamento explorável do aquífero.

7.6 – Elaboração de Bases de Dados em SIG

A exemplo da proposta contida nos objetivos do plano de trabalho do SIG Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2003), este projeto, contempla a estruturação de um Sistema de Informações Geográficas – SIG, para cada área estudada, planejado e conduzido segundo os parâmetros especificados abaixo.

- **Base de Dados** - Criação de uma base de dados que será o repositório de todas os dados e informações geográficas nos formatos vetor, raster, grades e atributos alfanuméricos disponíveis. Essa base de dados deve ser obrigatoriamente estruturada levando-se em conta o caráter multi-institucional do Projeto com diferentes plataformas de *softwares* e *hardwares*. É a principal e mais onerosa fase do projeto envolvendo atividades de inserção de novos dados levantados, digitalização de mapas, consistência de dados e correções de erros, obtenção e conversão de dados eletrônicos em diferentes formatos e sistemas de coordenadas etc.
- **Análises Espaciais** - As equipes executoras do projeto deverão dominar as ferramentas de visualização e consultas por atributos e localização disponíveis no SIG. O êxito desse projeto não pode prescindir de significativo investimento na qualificação de pessoas nessa área da tecnologia da informação, capacitando-as para utilizar as ferramentas de geoprocessamento em análises espaciais complexas e funções de modelamentos. Uma vez que os dados estejam organizados no ambiente SIG as operações envolvendo modelos probabilísticos processam-se rapidamente, o que permite várias simulações e aperfeiçoamentos contínuos.

8. PRODUTOS E RESULTADOS ESPERADOS

De forma preliminar, os produtos previstos para serem elaborados durante o desenvolvimento do projeto estão especificados abaixo. Salienta-se, entretanto, que outros produtos poderão ser elaborados, em função de adaptações ou inclusões de ações na metodologia proposta.

1) Relatórios

- a) Síntese dos conhecimentos existentes com análise da bibliografia
- b) Síntese final dos resultados alcançados (para cada área de estudo)

2) Mapas (SIG)

- a) Geológico com texto explicativo;
- b) Geofísico com texto explicativo;
- c) Potenciométrico (acompanhamento trimestral);
- d) Zoneamento Hidroquímico;
- e) Vulnerabilidade de Aquíferos;

- f) Hidrogeológico;
- g) Temáticos de apoio (pontos d'água, drenagem, isópacas etc.).

3) Banco de Dados (SIG)

- a) Geologia
- b) Geofísica
- c) Poços
- d) Hidroquímica
- e) Dados Isotópicos
- f) Dados Hidroclimatológicos - Balanço Hídrico
- g) Metadados

4) Modelos

- a) Modelos Conceituais Tridimensionais dos Aquíferos Estudados
- b) Modelos Computacionais (utilizando os softwares existentes)
- c) Previsão de Cenários Futuros de Exploração

Os resultados finais do projeto, nas formas de mapas, relatórios, gráficos, ilustrações, textos explicativos etc., serão divulgados em meio digital (CD-ROM multimídia), em forma de impressos e pela Internet. Os modelos computacionais, os quais só serão elaborados pela CPRM, com orientação das universidades participantes da rede, como treinamento, serão considerados preliminares e só serão divulgados, caso sejam julgados consistentes e houver possibilidades de validação. Espera-se que os resultados produzidos com o projeto aumentem significativamente o conhecimento hidrogeológico dos aquíferos e/ou bacias estudadas, subsidiando a implantação, pelos órgãos gestores estaduais, de efetivos mecanismos de gestão que permitam disciplinar a exploração da água subterrânea, otimizando e elevando a disponibilidade hídrica para as populações locais.