



Projeto de Cooperação Técnica PCT BRA/IICA/14/001 de “Implementação de Estratégias e Ações de Prevenção, Controle e Combate Desertificação Face aos Cenários de Mudanças climáticas e à Convenção das nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD)”.

Produto 1. Relatório Técnico contendo proposta de documento referente às diretrizes e ações do componente Sistemas de Dessalinização do Programa Água Doce, para atualização do Documento Base do PAD, especificamente no que se refere à inclusão das noções básicas de hidrogeologia e procedimentos técnicos e gerenciais de campo no que tange aos estudos, captação e uso da água subterrânea para a implantação de sistemas de dessalinização, contendo contextualização, metodologia, revisão bibliográfica, projetos, custos atualizados, anexos, informações atualizadas, fotos, diagramas, tabelas, planilhas, gráficos e ilustrações atualizadas.

**CARLOS ALBERTO MARTINS**

**NATAL, AGOSTO DE 2016.**

Produto 1. Relatório Técnico contendo proposta de documento referente às diretrizes e ações do componente Sistemas de Dessalinização do Programa Água Doce, para atualização do Documento Base do PAD, especificamente no que se refere à inclusão das noções básicas de hidrogeologia e procedimentos técnicos e gerenciais de campo no que tange aos estudos, captação e uso da água subterrânea para a implantação de sistemas de dessalinização, contendo contextualização, metodologia, revisão bibliográfica, projetos, custos atualizados, anexos, informações atualizadas, fotos, diagramas, tabelas, planilhas, gráficos e ilustrações atualizadas.

**Natal, Agosto de 2016.**

<b>Identificação</b>			
Consultor (a) /Autor (a): Carlos Alberto Martins			
Número do Contrato: 116182			
Nome do Projeto			
Projeto de Cooperação Técnica PCT BRA/IICA/14/001 de “Implementação de Estratégias e Ações de Prevenção, Controle e Combate Desertificação Face aos Cenários de Mudanças Climáticas e à Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD)”.			
Oficial/Coordenadora Técnica Responsável: Romélia Moreira de Souza			
Data: 29/07/2016 Local: Brasília			
<b>Classificação</b>			
Temas Prioritários do IICA			
Agroenergia e Biocombustíveis		Sanidade Agropecuária	
Biotecnologia e Biossegurança		Tecnologia e Inovação	
Comércio e Agronegócio		Agroindústria Rural	
Desenvolvimento Rural		Recursos Naturais	X
Políticas e Comércio		Comunicação e Gestão do Conhecimento	
Agricultura Orgânica		Outros:	
Modernização Institucional			
<b>Palavras-Chave:</b>			
Hidrogeologia, poços, sistemas de dessalinização			

## Resumo

**Título do Produto:**

Relatório Técnico contendo proposta de documento referente às diretrizes e ações do componente Sistemas de Dessalinização do Programa Água Doce, para atualização do Documento Base do PAD, especificamente no que se refere à inclusão de noções básicas de hidrogeologia e procedimentos técnicos e gerenciais de campo no que tange aos estudos, captação e uso de água subterrânea para a implantação de sistema de dessalinização, contendo contextualização, metodologia, revisão bibliográfica, projetos, custos atualizados, anexos, informações atualizadas, fotos, diagramas, tabelas, planilhas, gráficos e ilustrações atualizadas.

**Subtítulo do Produto:**

Atualização do Documento Base do Programa Água Doce, visando maior eficácia na implantação de sistemas de dessalinização pela adoção de conhecimentos hidrogeológicos e procedimentos técnicos aplicados na captação da água subterrânea.

**Resumo do Produto:**

Análise do Documento Base referente ao componente Sistema de Dessalinização e uma proposta de atualização para o melhor aproveitamento da água subterrânea na instalação do sistema de dessalinização.

**Qual Objetivo Primário do Produto?**

Apoiar as ações do Programa Água Doce referente à metodologia, desenvolvimento e aplicação de conhecimentos hidrogeológicos na implantação de sistemas de dessalinização.

**Que Problemas o Produto deve Resolver?**

A correta aplicação do conhecimento hidrogeológico para o aproveitamento adequado da fonte hídrica (poço) na aplicação dos usos múltiplos, incluído processo de dessalinização, fornecendo aos usuários, técnicos e consultores a base técnica requerida ao melhor aproveitamento da água subterrânea.

**Como se Logrou Resolver os Problemas e Atingir os Objetivos?**

Através da consulta bibliográfica especializada e experiência profissional do consultor.

**Quais Resultados mais Relevantes?**

Inserção de conhecimentos técnicos da área da hidrogeologia no Documento Base do PAD, dando condições ao aproveitamento adequado da água subterrânea no dimensionamento dos sistemas de dessalinização a serem implantados.

**O Que se Deve Fazer com o Produto para Potencializar o seu Uso?**

Disponibilizar o produto através da divulgação via internet, análise e a discussão no ambiente técnico do Programa Água Doce com consultores, técnicos e usuários.

**LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

FIGURA 1	-	Mapa Semiárido brasileiro, Documento Base, PAD, 2012	10
FIGURA 2	-	Mapa de Províncias Hidrogeológicas do Brasil .....	26
FIGURA 3	-	Diagrama Circular - Balanço Iônico, (Custódio & Llamas).	44
FIGURA 4	-	Diagrama Circular - Balanço Iônico (Logan) .....	44
FIGURA 5	-	Diagrama de Piper .....	45
FIGURA 6	-	Diagrama USSSL (United States Salinity Laboratory) .....	45

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 01	-	Teste de Bombeamento do Poço em Floresta I – Afonso Bezerra/RN .....	35
TABELA 02	-	Análise Físico-Química da água do poço Floresta I - Afonso Bezerra/RN .....	43

**LISTA DE GRÁFICOS**

GRÁFICO 01 - Curva Vazão específica (q) x Tempo de Bombeamento (t) do poço de Floresta I – Afonso Bezerra/RN .....	36
--	----

**SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1 Histórico	10
1.2 O Programa Água Doce	12
<b>2. CONTEXTUALIZAÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>3. OBJETIVO</b>	<b>14</b>
<b>4. METODOLOGIA</b>	<b>14</b>
<b>5. ATUALIZAÇÃO DO DOCUMENTO BASE – 2012</b>	<b>15</b>
5.1 ITEM 2 - SEMIÁRIDO BRASILEIRO	15
5.2 ITEM 4 – O PROGRAMA ÁGUA DOCE	16
5.3 ITEM 6 – SUSTENTABILIDADE	17
5.4 ITEM 7 – DESSALINIZAÇÃO	19
<b>6. CONCLUSÃO</b>	<b>46</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Histórico

O semiárido brasileiro englobando 10 estados da federação, 1133 municípios e uma área com 969.589,4 de km<sup>2</sup> (Nova Delimitação do Semiárido Brasileiro - MI) se caracteriza por uma precipitação igual ou inferior 800 mm, que se distribui heterogeneamente no espaço e no tempo, se concentrando em alguns meses do ano.



Figura 1 - Mapa do Semiárido brasileiro, Documento Base, PAD, 2012.

Historicamente essa característica básica praticamente impôs um modelo de gerenciamento dos recursos hídricos calcado inicialmente na exploração da água superficial, pelo acúmulo das águas pluviais em açudes. Foi a época da construção dos grandes açudes na maior parte dos estados do Nordeste.

A exploração de água subterrânea por poços teve seu início nos anos 10 do século 20, com a atuação da Inspetoria de Obras Contra as Secas - IOCS, transformada em 1919 em Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas – IFOCS e, a partir de 1945, em Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS. Durante a primeira metade do século passado foi o DNOCS que promoveu a oferta de água subterrânea às comunidades rurais através da perfuração e instalação de poços tubulares profundos, como já fazia na oferta de água superficial através da construção de grandes açudes.

A partir dos anos 50 do século passado, com a criação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE foram desenvolvidos os estudos que envolviam os mapeamentos geológicos regionais e os consequentes estudos dos aquíferos existentes. Com a chegada dos anos 60, a criação das economias mistas estaduais e da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM deu condições à formação de equipes de perfuração de poços e a consequente captação de água subterrânea em larga escala, principalmente nas épocas de períodos longos sem chuva. O desenvolvimento da tecnologia de perfuração através da fabricação das perfuratrizes pneumáticas resultou numa produção de poços em terrenos cristalinos de grande monta, onde os poços que eram construídos em 1 mês, passaram a ser construídos em 1 dia.

Como sempre, o carro-pipa complementava, mesmo que precariamente, a oferta de água de boa qualidade a ser distribuída nas comunidades rurais. Neste caso, a boa qualidade pode ser traduzida tão somente na baixa salinidade da água ofertada. Na realidade, a água ofertada era afetada pela contaminação na captação, no transporte e distribuição da água oriunda, muitas vezes, de água superficial contaminada de açudes e lagoa sem um controle rígido que pudesse salvaguardar, em termos de saúde, essas populações.

Junto a esse quadro, as águas subterrâneas captadas por poços perfurados, na sua maior parte, em terrenos cristalinos e, em quantidade, secundariamente em terrenos calcários, sendo salobras e salgadas, serviam quase

que exclusivamente à dessedentação animal onde se destacam bovinos, caprinos e ovinos mais resistentes à alta salinidade da água.

A combinação desses fatores favoreceu a sobrevivência de populações em áreas inóspitas, deixando, no entanto, as populações rurais à mercê de políticas governamentais obreiras de oferta de água, onde a gestão e a manutenção e o funcionamento de equipamentos e obras hídricas não contavam, dependendo de programações esporádicas e/ou urgentes para a “recuperação” da infraestrutura hídrica instalada anteriormente à toque de caixa, num modelo que praticamente dominou todo século passado.

Atualmente, programas governamentais são colocadas em prática por estados e governo federal simultaneamente à histórica oferta de água de poços tubulares como construção de barragens submersas, cisternas e açudes que contribuem para o aumento da oferta de água às comunidades rurais.

## **1.2 O Programa Água Doce**

Com a formulação do PROGRAMA ÁGUA DOCE, em 2003, foi montado um programa atuante, que tem como premissa básica o “estabelecimento de uma política pública de acesso à água de boa qualidade para o consumo humano por meio do aproveitamento sustentável das águas subterrâneas, incorporando cuidados ambientais e sociais na gestão de sistemas de dessalinização” como bem atesta a introdução do seu DOCUMENTO BASE.

A absorção da sustentabilidade e gestão pelo programa faz a grande diferença com relação às históricas ações de oferta de água de programas governamentais onde as obras se destacavam e a manutenção simplesmente não existia.

Em cima desta ideia, o Programa Água Doce dispõe e coloca em prática um ROTEIRO que se inicia no diagnóstico social, ambiental e técnico da comunidade, passando pelo aproveitamento das águas salobras ou salgadas do poço, a implantação, a manutenção e o monitoramento do sistema de dessalinização instalado.

No entanto, esse roteiro não seria possível sem o aporte técnico oriundo das áreas de mobilização social, sustentabilidade ambiental e da engenharia, que,

além de acompanhar a atuação cotidiana do programa, elaboraram o conteúdo técnico do DOCUMENTO BASE nas suas versões de 2010 e 2012.

## **2. CONTEXTUALIZAÇÃO**

O Programa Água Doce têm como parâmetro técnico de orientação o DOCUMENTO BASE publicado em 2010 e revisado em 2012. É um texto dedicado à “consolidação do conjunto de informações e ações realizadas pelo programa desde 2003, disponibilizando para a sociedade e os gestores sua metodologia, princípios, diretrizes, objetivos contendo manuais técnicos do Programa com a metodologia detalhada e especificações técnicas”.

Desta forma respalda a orientação e capacitação dos técnicos responsáveis pela implantação do Programa Água Doce nos estados do semiárido brasileiro.

Sendo um programa de interação entre a teoria e a prática desenvolvida durante a sua aplicação, foi detectada a necessidade da atualização deste documento, considerando os resultados técnicos advindos de reuniões técnicas de acompanhamento do programa em campo e das necessidades expressas pelas comunidades selecionadas e respectivas orientações técnicas nas áreas de mobilização social, sustentabilidade ambiental, sistemas de dessalinização e obras civis.

Nesse sentido, foi constatada, no Documento Base, mais especificamente no Componente Sistema de Dessalinização, a falta das orientações técnicas com relação ao melhor aproveitamento da fonte hídrica existente (poço), quando da formulação do diagnóstico da comunidade.

Neste caso, a atualização se caracteriza pela inserção de procedimentos técnicos com base na hidrogeologia com ênfase na análise da própria fonte hídrica, considerada a interpretação dos dados obtidos em teste de bombeamento e análises físico-químicas, objetivando o aproveitamento da água subterrânea e o dimensionamento adequado do equipamento de captação para melhor desempenho do sistema de dessalinização a ser implantado.

### **3. OBJETIVO**

Dentre os produtos referidos no Termo de Referência, parte integrante do Contrato de Prestação de Serviços de Consultoria n.º 116182, o Produto 1 tem como objetivo a elaboração de Relatório Técnico contendo proposta de documento referente às diretrizes e ações do componente Sistema de Dessalinização do Programa Água Doce, para atualização do Documento Base do PAD, especificamente no que se refere à inclusão das noções básicas de hidrogeologia e procedimentos técnicos e gerenciais de campo no que tange aos estudos, captação e uso da água subterrânea para implantação de sistema de dessalinização, contendo contextualização, metodologia, revisão bibliográfica, projetos, custos atualizados, anexos, informações atualizadas, fotos, diagramas, tabelas, planilhas, gráficos e ilustrações atualizadas.

### **4. METODOLOGIA**

A metodologia aplicada ao Produto 1 teve assentamento na premissa básica de considerar a estrutura original do Documento Base do Programa Água Doce mantendo-a, ou seja, fazendo as modificações cabíveis, seja para atualizá-lo ou inserir, respeitando a itemização original.

Desta forma, as inserções farão referência sempre à página, ao item, subitem, página e parágrafo (quando for o caso,) do Documento Base de 2012, para melhor entendimento na composição final do documento atualizado, versão 2016.

Para tanto serão apresentadas, a partir do ITEM 5. ATUALIZAÇÃO DO DOCUMENTO BASE (2012), por item/subitem, parágrafo e página do documento, o TEXTO ORIGINAL, o TEXTO MODIFICADO E PROPOSTO e o TEXTO PROPOSTO PARA INCLUSÃO.

## 5. ATUALIZAÇÃO DO DOCUMENTO BASE – 2012

### 5.1 ITEM 2 - SEMIÁRIDO BRASILEIRO

SUBITEM – 2.3 – Características Fisiográficas e Escassez Hídrica

PAG. 43

PARÁGRAFO 2º

TEXTO ORIGINAL

Na figura 5 podemos observar que nas rochas cristalinas a produção das águas subterrâneas é muito baixa. Esse embasamento caracteriza-se por porosidade e permeabilidade primárias baixas, que proporcionam pequena capacidade de armazenamento de água subterrânea. São constituídas de rochas com minerais bem cristalizados, possuindo vastas áreas de imensos maciços de rochas aflorantes ou subaflorantes. Esse tipo de solo dificulta a infiltração da água que se acumula nas fraturas e fissuras da rocha formadas pelos movimentos tectônicos da terra. Como consequência, as águas subterrâneas possuem altos teores salinos, assimilando os sais constituintes dessas rochas, tornando-as impróprias para o consumo humano. Devido à qualidade da água não se adequar às condições de uso, muitos dos poços existentes no Semiárido encontram-se desativados. Outra característica são as baixas vazões, na ordem de 1 a 3 m<sup>3</sup>/h.

A associação de baixas precipitações, distribuição irregular das chuvas, delgado manto de intemperismo (solos), quando não ausente, cobertura vegetal esparsa, favorece o escoamento superficial em detrimento da infiltração o que resulta no baixo potencial hidrogeológico característico da região.

As águas provenientes do cristalino são predominantemente cloretadas sódicas<sup>9</sup>. Ressalta-se que o sódio é um desagregador do solo, o que favorece a desertificação.

Sais presentes em solução do solo

SUBITEM – 2.3 – Características Fisiográficas e Escassez Hídrica

PAG. 43

PARÁGRAFO 2º

TEXTO MODIFICADO E PROPOSTO

Na figura 5 podemos observar que nas rochas cristalinas a produção das águas subterrâneas é muito baixa. Esse embasamento caracteriza-se por rochas compactadas resultante do esfriamento da crosta terrestre, submetidas a esforços tectônicos ou cristalizadas por alta pressão e temperatura de rochas primariamente sedimentares, que resultam em rochas metamórficas, que produzem o aparecimento de fraturas e fissuras cujo conjunto resulta em porosidade baixa e pequena capacidade de armazenamento. O meio ambiente subterrâneo, neste caso, é denominado, por essa razão, de meio fissural. No geral, as vazões obtidas em poços tubulares têm médias baixas (1 a 3 m<sup>3</sup>/h), influenciadas por baixas precipitações pluviométricas e sua distribuição irregular, solos rasos ou ausentes que favorecem ao escoamento superficial das águas de chuva em detrimento da infiltração, o que resulta no baixo potencial hidrogeológico deste tipo de aquífero.

No caso da ocorrência de rochas sedimentares calcárias, o fenômeno da formação de cavernas por dissolução provocada pelo contato com as águas pluviais (ácidas), o meio ambiente subterrâneo é denominado de meio carstificado (cavernoso). Neste caso, as vazões têm uma grande variação que reflete capacidade de produção de até 400 m<sup>3</sup>/h (Apodi, RN).

Com relação à salinidade, os poços construídos em terrenos cristalinos apresentam águas salobras a salina inadequadas ao consumo humano (acima de 500 mg/L de sólidos totais dissolvidos) com baixo percentual de água de boa qualidade (10%). A salinidade da água é resultante de fatores tais como composição mineral da rocha dissolvida, tempo de trânsito da água nas fraturas/fissuras, qualidade química da água infiltrada e lixiviação (lavagem) de solos salinos.

Para as rochas sedimentares calcárias, a salinidade é resultante da dissolução das águas sobre a rocha que é composta predominantemente do cálcio e magnésio e chegam a ser, também, classificadas como salobras ou salgadas.

Sais presentes em solução do solo.

## **5.2 ITEM 4 – O PROGRAMA ÁGUA DOCE**

SUBITEM 4.2.2.1 – Fonte Hídrica

PAG 56

TEXTO PROPOSTO PARA INCLUSÃO

4.2.2.1 – Fonte Hídrica

Na implantação de sistemas de dessalinização, o Programa Água Doce tem como premissa a existência da fonte hídrica e que esta forneça à comunidade rural minimamente água salobra ou salgada. Dessa forma não é considerado razoável primeiro produzir a fonte hídrica para, depois de analisada a salinidade da água, fazer a instalação do sistema.

Assim, torna-se fundamental o conhecimento dos dados técnicos de características construtivas da fonte hídrica e respectivas características hidráulicas e hidroquímicas da água captada.

No semiárido brasileiro, com o predomínio das rochas cristalinas e também de grandes áreas sedimentares calcárias, o abastecimento das comunidades rurais é realizado por captação e distribuição da água subterrânea de poços tubulares com profundidade média 50/60 metros no cristalino, chegando a 400 metros no caso dos calcários.

A análise dos parâmetros construtivos (diâmetro e tipo do revestimento, profundidade, posição das secções filtrantes), de quantidade e qualidade da água, fornecerá os subsídios técnicos adequados à instalação da bomba – profundidade e vazão recomendada – e, em consequência, a definição dos usos possíveis em quantidade e qualidade.

Outros tipos de fontes hídricas que poderiam ser utilizadas no abastecimento das comunidades ou são raras – fontes propriamente ditas – ou de quantidade restritiva aos períodos chuvosos. Esse é o caso da captação da água superficial da enorme rede de açudes existente no semiárido. A qualidade restritiva pela alta salinidade resulta também em alto custo de implantação e manutenção do sistema de dessalinização.

### **5.3 ITEM 6 - SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL**

SUBITEM 6.4 Algumas Características Regionais dos Poços Profundos

PAG. 144

TEXTO PROPOSTO PARA SUBSTITUIÇÃO

A maioria dos poços localizados no Semiárido apresenta variações em capacidade de produção de água e respectiva quantidade de sais dissolvidos dependendo da região onde estão situados. As variações dos teores salinos limitam

a forma de uso destas águas. A Resolução 357/2005 do CONAMA estabelece que para as águas serem classificadas como ÁGUA DOCE a salinidade deve apresentar um teor máximo de 0,5g/L. As águas com teores acima deste valor e até 30g/L de sais estão classificadas como ÁGUAS SALOBRAS. Acima destes valores são consideradas ÁGUAS SALINAS.

Para atendimento doméstico e uso múltiplo da água subterrânea, de um total de 24.847 poços classificados, 20,20% representados pela cor verde podem ser classificados como água doce, 23,6% (cor amarela e laranja) como águas salobras e apenas 0,06% (cor vermelha) estão classificadas como salinas. Este quadro obviamente tende a mudar em função das reavaliações com base na geologia do Semiárido, onde poços que captam águas oriundas de rochas do embasamento cristalino ou de rochas sedimentares cálcicas magnesianas, tendem a apresentar teores maiores que 0,5g/L de sais totais (salobras) e que sua relação com os índices percentuais de poços com água doce sejam preponderantes.

Na região caracterizada por águas salobras (faixas verde e laranja), a utilização de dessalinizadores tem sido uma prática bastante difundida no sentido de melhorar a qualidade das águas subterrâneas. É um procedimento eficiente, porém gera um alto volume de rejeito salino que deve ser devidamente manejado.

Para atender a demanda para os sistemas alternativos de aproveitamento do concentrado, a capacidade de produção de água do poço deve ser no mínimo de 5.000 L/hora. A quantidade de tipos de sais presentes na água subterrânea também é fator limitante à instalação de dessalinizadores. Quanto maior a concentração maior o custo do equipamento e maior a exigência quanto ao destino a ser dado ao concentrado.

A falta de manutenção ou a forma inadequada desta manutenção e da destinação da água concentrada dos equipamentos, tem sido, historicamente, fatores que contribuem para o descrédito das comunidades com relação à real eficácia de seu uso.

Para suprir essa necessidade o Programa Água Doce inclui na sua pauta de atividades a manutenção e o monitoramento do sistema de dessalinização instalado, por um ano, considerando não somente o aspecto técnico mas também os aspectos sociais de operação, funcionamento do equipamento e a aceitação pela população comunitária.

## 5.4 - ITEM 7 – DESSALINIZAÇÃO

SUBITEM 7.1 Contextualização

PAG. 168

TEXTO MODIFICADO E PROPOSTO

Na região semiárida são constantes os períodos de seca, muitas vezes obrigando a população a migrar para outros centros, por absoluta falta de condições de sobrevivência. Para minimizar essa situação e melhor utilizar a água disponível, o Programa Água Doce propõe a instalação ou recuperação de equipamentos de dessalinização implantados nas comunidades rurais abastecidas por poços tubulares em aquíferos caracterizados por presença de água em meio fissural das rochas do cristalino, assim como em aquíferos sedimentares caracterizados por presença de água em cavernas (meio cárstico).

As rochas do cristalino apresentam geralmente águas salobras a salgadas (salinidade maior que 500 mg/L de sais totais) e vazões médias da ordem de 1.500 L/h. As rochas sedimentares carstificadas apresentam águas que variam de boa qualidade até salgadas com vazões que podem variar de 500 litros/hora até grandes vazões que podem chegar a 400.000 L/h.

A salinidade observada nas águas dos poços é resultante do tempo de trânsito da água no meio ambiente subterrâneo e dos mais diversos tipos de rocha, em sua composição mineral, ou seja, do tempo de contato água/formação geológica que favorece a dissolução dos componentes minerais que irão compor a sua qualidade e conseqüente uso.

Visando o aumento da disponibilidade e oferta hídrica de água de boa qualidade físico-química e bacteriológica, a partir das águas subterrâneas salinizadas em situações específicas e críticas, como o abastecimento de água nas comunidades rurais do semiárido brasileiro, a alternativa técnica científica e social mais viável identificada é a utilização do processo de dessalinização. Essas águas tratadas e com padrões de qualidade compatíveis com as normas nacionais serão utilizadas prioritariamente, para o consumo humano.

Nesse contexto, para garantir os benefícios, no que diz respeito ao bem-estar e a saúde da população considerada, há que se complementar esse procedimento com ações voltadas à capacitação de operadores dos sistemas

implantados/ recuperados e manutenção monitorada, objetivando a avaliação da aplicação das ações previstas e aplicadas e sua consequente manutenção.

#### SUBITEM 7.2 Metodologia

PAG 168

#### TEXTO MODIFICADO E PROPOSTO

A metodologia a ser utilizada no Componente de Dessalinização do Programa Água Doce se inicia no levantamento das condições de abastecimento pela fonte hídrica, no caso, o poço tubular com o conhecimento hidrogeológico local, detalhado no item anterior.

A definição de que tipo e com que capacidade de produção terá o dessalinizador é função da vazão recomendada de exploração do poço, que por sua vez depende da demanda total de água requerida para a satisfação dos usos múltiplos, assim como da qualidade físico-química da água bruta. Esses fatores ensejam o adequado dimensionamento do sistema de dessalinização, considerado o tipo e quantidade de vasos e membranas a ser utilizada.

O dimensionamento do sistema deve sempre ter como parâmetro a capacidade de processamento máximo do equipamento de dessalinização, considerados a necessidade de água de boa qualidade da comunidade e a economicidade na escolha no tipo de membrana, número e disposição dos vasos, ou seja, a melhor opção em termos de recuperação da água permeada em relação à vazão do concentrado.

A metodologia a ser seguida no Componente de Dessalinização deverá distinguir basicamente dois tipos de serviços que estão dentro de sua competência. O primeiro deles é a recuperação de sistemas de dessalinização instalados por programas governamentais anteriores e o segundo é a implantação de novos sistemas de dessalinização em comunidades rurais.

Tanto para a recuperação de sistemas instalados como para novas implantações de sistemas de dessalinização é necessário ter em mãos os dados referentes à:

1. População
2. Volume diário utilizado pela população nos usos do cotidiano.
3. Vazão máxima do poço que está ou vai se explorar.

4. Qualidade da água através de uma análise físico-química da água do poço.

Os dois primeiros itens estão relacionados diretamente às etapas desenvolvidas no levantamento do pré-diagnóstico, ocasião em que se buscou esses dados por entrevista ou reunião com a associação local.

A capacidade máxima de fornecimento de água pelo poço e a respectiva qualidade estão relacionadas aos dados obtidos no teste de bombeamento executado e na análise físico-química procedida por ocasião do término do referido teste.

Os quatro tipos de dados devem fazer parte do diagnóstico contratado e poderão ser obtidos com as equipes técnicas das coordenações estaduais do Programa Água Doce.

#### 7.3.1 Recuperação de Sistemas de Dessalinização

Definido pelo diagnóstico, a recuperação de sistemas de dessalinização conta com o levantamento prévio minucioso, tanto da situação em que se encontram as obras civis – opção de reforma ou nova construção – quanto da necessidade de complementação dessas obras para se adequar aos procedimentos do Programa Água Doce, que envolve a construção de reservatório de armazenamento do concentrado, além de caixas d'água específicas de distribuição da água bruta e da água do permeado do dessalinizador. Esses dados deverão estar ao encargo dos engenheiros civis que fazem parte do Componente Dessalinização.

No que se refere ao próprio equipamento é necessário a verificação do seu funcionamento, por intermédio da análise quanti-qualitativa do sistema de processamento, em relação, principalmente, se o mesmo foi especificado nas condições adequadas de exploração e qualidade da água bruta.

#### 7.3.2 Implantação de Novo Sistema de Dessalinização

A implantação de um novo sistema de dessalinização é mais simples e menos trabalhoso por partir do projeto executivo padrão de engenharia devidamente ajustado à realidade de cada comunidade, do dimensionamento da bomba do poço, da análise química correspondente para a satisfação dos usos múltiplos.

### 7.3.3 Manutenção dos Sistemas

A manutenção dos sistemas de dessalinização requer os dados técnicos finais referentes ao equipamento implantado com todas as especificações técnicas de peças ou conjunto de peças que integram o dessalinizador.

Como a manutenção dos equipamentos de dessalinização está garantida no primeiro ano de implantação ou recuperação dos sistemas, a empresa contratada deverá executar este serviço, devidamente acompanhada de técnicos da equipe técnica da coordenação estadual do Programa Água Doce. É importante que esta equipe defina, junto à empresa, a logística operacional, objetivando a eficiência e a economicidade na prestação e na fiscalização do serviço.

### 7.3.4 Monitoramento dos sistemas

Um dos diferenciais do Programa Água Doce é o serviço de monitoramento dos sistemas de dessalinização implantados. O componente de Dessalinização deve considerar tanto o monitoramento quantitativo e qualitativo da água do poço como da água de processamento do dessalinizador, ou seja, água do permeado e do concentrado produzidas.

A entrega do sistema de dessalinização deverá vir acompanhada dos dados de vazão e qualidade da água bruta do poço, dos dados técnicos do equipamento instalado, assim como das vazões e qualidade e a recuperação do dessalinizador, ou seja, a relação entre vazão do permeado e a vazão do concentrado. Este procedimento não se presta apenas à prestação de contas físicas pelo serviço executado pela empresa contratada, mas também conta como dados básicos referenciais para avaliar variações futuras da quantidade ou qualidade da água fornecida à população.

Um roteiro básico poderá ser montado pela coordenação estadual do programa para que se possa monitorar o nível estático da água subterrânea, a produção da água bruta do poço com respectiva condutividade e a vazões e condutividades do permeado, do concentrado e do concentrado armazenado no reservatório (tanque de concentrado).

Há que se planejar a frequência do monitoramento a fim de que não haja desperdício econômico com intervalos de medições e consequente aumento das

viagens ao campo. As observações constantes dos parâmetros obtidos poderá fazer variar esses intervalos de medição.

Os dados obtidos no ano de monitoramento deve ser acompanhado pela equipe técnica do estado que anualmente terá condições de fazer uma avaliação do funcionamento do sistema.

### 7.3.5 Treinamento e Capacitação Técnica

As experiências com a implementação do Programa Água Doce têm demonstrado a necessidade indispensável do fortalecimento da prévia capacitação de técnicos das equipes das coordenações estaduais e o treinamento e capacitação dos operadores dos sistemas de dessalinização.

Para tanto, há que se elaborar material didático específico, com relação à operação e manutenção dos equipamentos instalados, para diferentes níveis de conhecimento, objetivando a entrega de produtos simples e assimiláveis para os citados técnicos e operadores.

Com relação ao treinamento de operadores, seria ideal que a capacitação pudesse vir antes do treinamento para a operação e manutenção. No entanto, a prática está demonstrando que, por circunstâncias operacionais de instalação de um conjunto, geralmente grande, de sistemas de dessalinização, o treinamento se faz por ocasião da instalação do equipamento pelo técnico da empresa contratada. De forma esporádica e aleatória, este treinamento pode ser estendido aos técnicos das equipes estaduais do Programa Água Doce no reforço dos seus respectivos conhecimentos.

Dessa forma, a capacitação de operadores está se processando num conjunto representado por pessoas de 10 ou 15 sistemas de dessalinização – até 45 operadores – em salas de aula com exposições e palestras técnicas que tratam do equipamento e respectivo funcionamento, operação, manutenção e monitoramento.

### SUBITEM 7.2 Hidrogeologia

TEXTO PROPOSTO PARA INCLUSÃO (a ser inserido como item anterior à Metodologia)

O Programa Água Doce tem como finalidade, do ponto de vista físico, o abastecimento de água subterrânea de boa qualidade físico-química e bacteriológica para as comunidades rurais e sedes municipais que se encontram em colapso de fornecimento hídrico.

Nesse sentido é importante a inserção de conhecimento básico da área de hidrogeologia, principalmente no que se refere ao tratamento e análise dos dados da fonte hídrica de água subterrânea, no caso, o poço tubular e a sua potencialidade em termos de capacidade de fornecimento de água e respectiva qualidade. Esta potencialidade deve ser considerada para os usos que se faça necessária e que exceda o abastecimento da água de beber, a partir do processamento da água bruta do poço pelo dessalinizador.

### 7.2.1 Conceito

A hidrogeologia, como ramo da geologia que estuda a água subterrânea (Joseph Lucas 1877), é uma ciência ampla que se preocupa basicamente com comportamento hidráulico e hidroquímico das águas contidas nos aquíferos, ou seja, nas camadas geológicas que as armazenam, transportam e interagem com o meio ambiente subterrâneo.

Por sua vez os aquíferos podem acumular água em poros (aquífero poroso) como no caso das formações sedimentares arenosas, em cavernas (aquífero cárstico) no caso das formações sedimentares de calcários e em fraturas ou fissuras (aquífero fissural) como no caso do armazenamento que ocorrem nas rochas cristalinas de origem ígnea ou metamórfica, como granitos, e quartzitos.

Quanto às características hidroquímicas das águas subterrâneas, elas se estabelecem no contato água/rocha pela ação de fatores tais como composição mineral da rocha, composição da água de infiltração e tempo de trânsito da água armazenada. Assim, é de esperar que uma água armazenada em um arenito apresente boa qualidade química em quanto uma água armazenada numa rocha cálcica-magnésiana adquira uma salinidade alta, muitas vezes imprópria ao consumo humano.

### 7.2.2 Hidrogeologia do Semiárido

O semiárido brasileiro, considerada a sua área total, se estende desde o Piauí até o norte de Minas Gerais, englobando % (cinco) grandes regiões denominadas Províncias Hidrogeológicas, que possuem “características gerais semelhantes com relação às principais ocorrências de águas subterrâneas” (Tolman, 1937) e são denominadas Província Parnaíba, São Francisco e Escudo Oriental como se pode observar na Figura 2 - Mapa de Províncias Hidrogeológicas do Brasil a seguir.

A Província Parnaíba (4) é constituída de um pacote sedimentar de 2000 metros onde se destacam os aquíferos Cabeças, Serra Grande e Poti-Piauí de grandes potencialidades hidrogeológicas, mas de grande profundidade tornando complicada a captação da água.

Na sequência sedimentar da bacia sedimentar do Parnaíba, os aquíferos mais propícios à construção de poços para a captação da água subterrânea são os aquíferos arenosos Itapecuru, arenosos, com lente calco-arenitos Codó, Corda e Motuca com variação de profundidades situadas entre 100 e 400 metros e vazões médias de 20 m<sup>3</sup>/h, com águas de boa qualidade à exceção das águas do aquífero Codó, que em muitas ocasiões apresentam índices altos de dureza

Na Província Hidrogeológica São Francisco (5) predominam os domínios hidrogeológicos sedimentares dos calcários da Formação Bambuí e Chapada Diamantina com poços de profundidade média de 75 e 90 respectivamente e totais de sólidos dissolvidos variando entre 250 a 1.000 mg/L.



Figura 2 – Mapa de Províncias Hidrogeológicas – Fonte: CPRM, 2008.

A Província Escudo Oriental (6) predominam as rochas cristalinas compostas de gnaisses, granitos, quartzitos, xistos, migmatitos etc. cujas estruturas compactas de origem ígnea ou metamórfica apresentam fissuras ou diaclases de origem tectônica que se interconectam, caracterizando o meio aquífero de natureza fissural.

Na sua porção Nordeste, os poços têm média profundidade de 60 metros com vazões que variam entre 1 a 3 m<sup>3</sup>/h e qualidade química salobra ou salgada, onde os sólidos totais dissolvidos podem chegar a 35.000 mg/L. Nesta área está a maior ação do Programa Água Doce por ser a região de maior criticidade com relação ao atendimento das comunidades rurais com água de boa qualidade.

Na sua porção Sudeste, as condições climáticas menos adversas que na porção Nordeste propiciam a formação de manto de intemperismo, cujo aproveitamento resulta em vazões médias da ordem de 10 m<sup>3</sup>/h de água de melhor qualidade.

### 7.2.3 Procedimentos para a análise hidrogeológica local

Para a correta instalação de um sistema de dessalinização é fundamental o conhecimento do meio ambiente subterrâneo local em termos de comportamento hidráulico e hidroquímico do aquífero, a ser obtido na bibliografia e no campo.

#### 7.2.3.1 levantamentos de dados

A análise do meio ambiente subterrâneo começa na observação dos dados bibliográficos, ou seja, no cabedal de informações sobre regiões ou áreas selecionadas objetivando a implantação de sistemas de dessalinização. Trabalhos e estudos geológicos e hidrogeológicos são sempre fontes importantes de informações que complementam as informações obtidas em cadastros, banco de dados ou fichas de poços e que envolvem as características construtivas, hidráulicas e hidroquímicas da água subterrânea local.

É comum a ocorrência de vazios de conhecimentos hidrogeológicos locais. Muitas áreas, mesmo com a existência de poços, deixam muito a desejar com relação à informação de vazão e qualidade de água, por vezes não se sabendo sequer a origem do poço nem tampouco se o poço tem fichas de perfuração e/ou instalação do poço.

Quando localmente as informações geológicas e hidrogeologia não estão disponíveis ou não existam, é importante ampliar a área de estudo com vista ao suprimento deste conhecimento em nível regional, para se ter uma ideia sobre dados de potenciais hidrogeológicos de aquíferos e mais particularmente de poços, que possam contribuir, como complementação do conhecimento local a ser obtido posteriormente.

#### 7.2.3.2 Trabalho de Campo

A informação mais importante é a consulta à comunidade sobre a utilização que se faz da água do poço. Os usos com respectivos volumes de consumo diário são essenciais ao projeto técnico da implantação do sistema de dessalinização mais adequado às necessidades da população. Neste sentido, deve-se dar uma ordem de prioridade ao destino da água – além daquela processada pelo dessalinizador e para

o consumo animal, considerando que, nem sempre vai haver o suprimento de água bruta subterrânea ou concentrada do dessalinizador para os citados usos.

A análise do meio ambiente subterrâneo deverá ser complementada a partir da visita ao local selecionado por técnico que tenha a experiência em captação de água subterrânea para o levantamento das informações da geologia local assim como das informações dos poços existentes e suas características construtivas, hidráulicas e hidroquímicas básicas, ou seja, a quantidade e a qualidade de água disponível para a comunidade.

A escolha de um poço dentro de uma comunidade com vários poços tem que vir calçada nos dois itens primordiais para decisão posterior: o teste de bombeamento e a análise físico-química da água do poço.

É fundamental que esses dados sejam checados desde a pesquisa bibliográfica em banco de dado ou fichas de poços existentes até a execução do teste de bombeamento e coleta de água para a análise físico-química posterior.

#### a) Informações geográficas

Em muitas ocasiões, as informações geográficas disponíveis com relação às coordenadas do ponto ou pontos (poços) que se quer avaliar, não correspondem à verdade do campo. O prejuízo advindo da não observância para este importante detalhe é o mapeamento incorreto que pode resultar em erros inclusive de projetos técnicos em referência à locação das obras civis que compõem o sistema de dessalinização.

Atualmente o DATUM aceito para obter as coordenadas geográficas, decimais ou UTM é WGS-84 ou o SIRGAS 2000. O GPS deverá ser sempre calibrado em algum desses Datum. Tanto poços como as obras civis, caixa d'água, abrigo do dessalinizador e ponto de energia elétrica devem ter coordenadas.

Para o futuro projeto técnico de implantação do sistema é recomendável que as coordenadas obtidas sejam convertidas em UTM, quando se tem uma ideia de distâncias quando se usa o mapa em campo.

No levantamento de dados geográficos de campo é importante a seguinte observação: Como as comunidades rurais geralmente estão circunscritas em pequenas áreas de poucos quilômetros de raio, as coordenadas devem ser tomadas

consideradas a escala de metro e não de quilômetro. Isto auxilia a identificação do ponto de captação considerado em áreas de alta densidade de poços.

#### b) Informações geológicas

Essas informações dizem respeito à constituição das rochas com relação à sua formação, rochas cristalinas, metamórficas ou sedimentares, com respectiva composição mineral e estrutural de natureza fissural, cárstica ou porosa - apresentada pela formação geológica que está armazenando a água.

O meio fissural é representado pelas rochas cristalinas que sofreram tectonismo para a formação de fraturas ou fissuras que armazenam e servem de conduto à infiltração e a extração da água através do poço. O meio cárstico é representado pelas rochas de formação calcária que em contato com as águas de infiltração resultam na formação de cavernas, que podem armazenar grandes volumes de água. O meio poroso é representado pelas rochas sedimentares compostas de material de composição arenosa ou variações areno-siltosas e areno-argilosas.

È a natureza do aquífero e as informações do poço que definem que tipo de método deverá ser utilizado para o cálculo da potencialidade hidrogeológica do poço e conseqüentemente a sua capacidade máxima de produção.

#### c) Informações construtivas do poço

Na implantação do sistema de dessalinização, junto com as informações de caráter geológico, é necessário que o projeto de construção do poço seja conhecido. Como o Programa Água Doce tem ação em poços existentes previamente, o que ocorre com frequência é que não se dispõe do projeto construtivo do poço. Isto é decorrente de motivos que vão desde simples não existência de anotação de dados até, por ocasião da perfuração, falta de catalogação de dados nas fichas de características construtivas por parte de órgãos públicos federais e estaduais e empresas privadas que prestam serviços de perfuração e/ou instalação de poços.

De qualquer forma é fundamental que se tenha os dados de diâmetros de perfuração, diâmetros de revestimento, profundidade do poço e das entradas de água.

No caso de poços de cristalino essas entradas são detectadas e anotadas por ocasião da perfuração e que representam as fraturas que aportam água ao poço. Quando esse procedimento é obedecido, há a possibilidade de se executar a medição expedita da vazão por fratura, o que facilita os cálculos posteriores para determinação da profundidade em que se deve instalar a bomba submersível de exploração do poço.

No caso dos poços em meio carstificados – calcários – em geral revestidos com tubulação de pvc rígido, as entradas de águas são representadas pelas cavernas que podem ser fornecedoras de água do aquífero ao poço.

Quando se trata de poços que captam águas de meios porosos é fundamental ter a profundidade das secções filtrantes do poço para se evitar prováveis danos na bomba submersível devido a materiais finos ou ultrafinos que possam se desprender da formação geológica e serem carreados para o interior da tubulação de recalque da água subterrânea.

Na impossibilidade de se ter em mãos o projeto do poço com as suas características, esses dados devem ser anotados por ocasião dos testes de bombeamento e recuperação do poço. Para a medição da profundidade das entradas de água a tecnologia atual permite a realização de perfis geofísicos térmicos e ou perfis fotográficos.

#### d) Informações hidráulicas e hidrodinâmicas do poço

As informações hidráulicas e hidrodinâmicas de um poço deverão ser obtidas através da execução de testes bombeamento e recuperação. No entanto, para que a instalação do equipamento de dessalinização reflita a plenitude da capacidade no aquífero no local, previamente é necessário às seguintes providências.

- Desenvolvimento e limpeza do poço.

O Programa Água Doce utiliza poços existentes e, desta forma, requer que a instalação do sistema de dessalinização esteja captando água em poços, absolutamente isentos, de materiais arenosos, argilosos ou finos da rocha perfurada. A falta de providência para retirar esses tipos de materiais induz ao mau

funcionamento e até a paralisação, em futuro próximo, da bomba submersível a ser instalada no poço por conta da corrosão física em seus rotores.

O desenvolvimento e limpeza deverão ser executados com compressor. As tubulações de ar e água a serem descidas nos poços devem atuar nas fraturas, microfraturas, horizontes cavernosos do poço e secções filtrantes quando o poço é totalmente revestido. É importante a informação de suas respectivas profundidades obtidas por ocasião da perfuração. Como geralmente não é comum dispor dessas informações, o bom senso recomenda que se vá até o fundo do poço e alterne o fechamento e abertura da válvula de ar compressor em toda a sua extensão da saturada.

O tempo de atuação do compressor estará condicionado à verificação da total isenção de material na boca do poço. Cabe uma observação: tem casos em que o poço não deixa de produzir material e há que se abandonar a ideia de instalação do poço. O desenvolvimento pode ser realizado com a perfuratriz, (haste e martelo pneumático) ou com sistema simples de compressor e tubulação de ar e de água.

No final do desenvolvimento e limpeza de um poço o compressor deve sempre estar com a sua tubulação de água e ar no fundo do poço para a execução de um pré-teste - 2 horas - com anotação do nível dinâmico e da vazão que servirão de base para a colocação da bomba que testará o poço.

- Testes de bombeamento e recuperação

O teste de bombeamento é um procedimento técnico de descarga de água para determinar os parâmetros hidráulicos do poço, cuja interpretação, resulta no cálculo da capacidade de produção do poço. O teste de recuperação é um processo de recarga de água do aquífero para o poço que também se presta a determinação dos parâmetros hidráulicos objetivando também a determinação da capacidade de produção.

- Tipos de testes de bombeamento

Os testes de bombeamento são realizados por compressor ou bomba submersa. Os testes com compressor devem ser evitados, considerando-se, neste

caso, que a vazão não é constante com relação às perdas de carga do aquífero, resultando em cálculos que podem estar distorcidos da realidade. Dessa forma, os testes de bombeamento devem ser realizados com bomba submersa de preferência com gerador, a fim de se evitar qualquer tipo de variação, inclusive de corrente elétrica.

Na impossibilidade de se usar a bomba submersa, a interpretação do teste com compressor deve se assentar na observação do comportamento temporal do nível dinâmico e da vazão para saber se é utilizável a curva vazão específica x tempo. Muitas vezes por falta de submergência, o teste não tem qualquer validade. É o que acontece em poços com baixas vazões, níveis estáticos profundos e grandes rebaixamentos dos níveis dinâmicos.

Mesmo depois de realizado o teste de bombeamento com compressor e instalada a bomba submersível é recomendado a confirmação dos dados do teste através da medição de níveis por algumas horas ininterruptas, p. ex. 3 horas, cuja interpretação proporcionará as informações sobre a correção e funcionamento da bomba pelo tempo necessário ao abastecimento da comunidade.

Há basicamente dois tipos de teste: o teste de aquífero e do teste de produção.

O teste de aquífero é realizado com observação da evolução dos níveis dinâmicos no poço e, a uma determinada distância, no piezômetro (poço de observação e pequeno diâmetro para a medição de níveis hidráulicos e coleta de amostra de água) se prestando à determinação dos parâmetros de Transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e coeficiente de armazenamento (S) que, por sua vez são utilizados nos cálculos de reserva do aquífero, interferência entre poços produtores próximos etc. em estudos para abastecimento que requerem grandes volumes de fornecimento de água como bairros, cidades, polos industriais ou de irrigação.

O teste de produção se presta ao cálculo da capacidade de fornecimento de água (L, m<sup>3</sup>) por unidade de tempo (hora, dia) do poço que se está testando. Essa capacidade pode ser calculada através de bombeamentos sucessivos com vazões diferentes e um mesmo intervalo de tempo. São os denominados testes escalonados que definem as perdas de carga no aquífero (localmente) e as perdas de carga no próprio poço testado, objetivando análise do funcionamento pelo cálculo da eficiência do mesmo. Esse tipo de teste requer instrumentos de precisão, tanto

nas medições de níveis como dos volumes instantâneos, durante o bombeamento e podem ser utilizados na indústria, a exemplo da produção de água mineral e projetos de irrigação.

O teste escalonado se caracteriza pela utilização de, em tempos iguais e vazões diferentes para cada escalão, medições de níveis dinâmicos objetivando a determinação das perdas de carga no aquífero e perdas de carga no próprio poço, o que resulta na determinação da eficiência do poço para qualquer vazão que se queira extrair, limitada a sua vazão máxima de exploração.

A produção de um poço também pode ser determinada a partir de um teste de bombeamento com compressor ou bomba submersível, em geral, em tempo de 12 horas com medições de níveis dinâmicos e vazão em recipientes de pequenos volumes com tambores de 200 litros. Normalmente, em programas governamentais e mesmo para particulares esse tipo de teste de produção é bastante utilizado devido à simplicidade de sua operação, sendo constatado que este é o mais utilizado tipo de teste de vazão de poços para o abastecimento de pequenas comunidades rurais, como é o caso do Programa Água Doce.

Evidente que, quanto mais se tenha informações do poço – níveis e vazões de fraturas produtivas, por exemplo – melhor estará assegurada a informação do rebaixamento máximo do nível dinâmico da água no poço para a escolha da profundidade adequada a ser instalada a bomba. Esse teste de 12 horas também mostra o comportamento do nível dinâmico durante o período diário normalmente utilizado nos bombeamentos.

Todas as informações de nível deverá ter como referência a cota da boca do poço. É importante salientar que a escolha da bomba é função da profundidade do nível dinâmico para uma determinada vazão de exploração, que se soma às perdas de carga por diferença de altura e à distância entre a boca do poço e o ponto de descarga para a caixa d'água.

- Capacidade de Produção

A tabela 01 a seguir é um exemplo de um teste de bombeamento em um poço na localidade denominado Floresta I, no município de Afonso Bezerra/RN, que não dispõe de ficha de dados construtivos. Do ponto de vista de captação se situa no aquífero calcário Jandaíra /RN cujos poços têm profundidades que variam de 60 a 250 metros. Apresenta como dados básicos:

Profundidade de 85 metros medidos no início do teste:

Nível estático NE = 33,45 m

Vazão Q = 2,570 m<sup>3</sup>/m

Rebaixamento  $\Delta s$  = 16,80 m

Vazão específica q = 0,1530 m<sup>3</sup>/h/m para 12 horas de teste

De posse dos dados obtidos de tempo de bombeamento e níveis dinâmicos (2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> colunas respectivamente) são relacionados na 4<sup>a</sup> coluna os dados de rebaixamento  $\Delta s$  dos níveis dinâmicos do aquífero com a bomba submersível extraindo a água a uma taxa Q = 2,570 m<sup>3</sup>/h constante durante todo o tempo de bombeamento 720 minutos (12 horas).

A vazão específica é a razão entre a vazão de bombeamento Q (5<sup>a</sup> coluna) e o rebaixamento  $\Delta s$  para cada medida de tempo (6<sup>a</sup> coluna).

A plotagem dos dados de vazão específica (eixo vertical y) e os dados de tempo de bombeamento (eixo horizontal x) em um gráfico semilogarítmico resultou no Gráfico 01. A linha de tendência para o funcionamento por 1 ano (525.600 minutos) revela a vazão específica q = 0,15 m<sup>3</sup>/h/m a ser utilizada no cálculo da vazão máxima que o poço pode produzir.

Utilizando-se o disposto na **Resolução CRH N.º 01/2011, 06 de junho de 2011, Recife, PE**, chega-se a determinação da vazão máxima de exploração, tendo como critério admitir 40% da espessura da lâmina de água do poço, (a diferença de nível entre o fundo do poço e o seu respectivo nível estático), o rebaixamento máximo disponível (RMD).

Nesse caso os dados são:

Profundidade do poço (P) = 85,00 m

Nível estático (NE) = 33,453 m

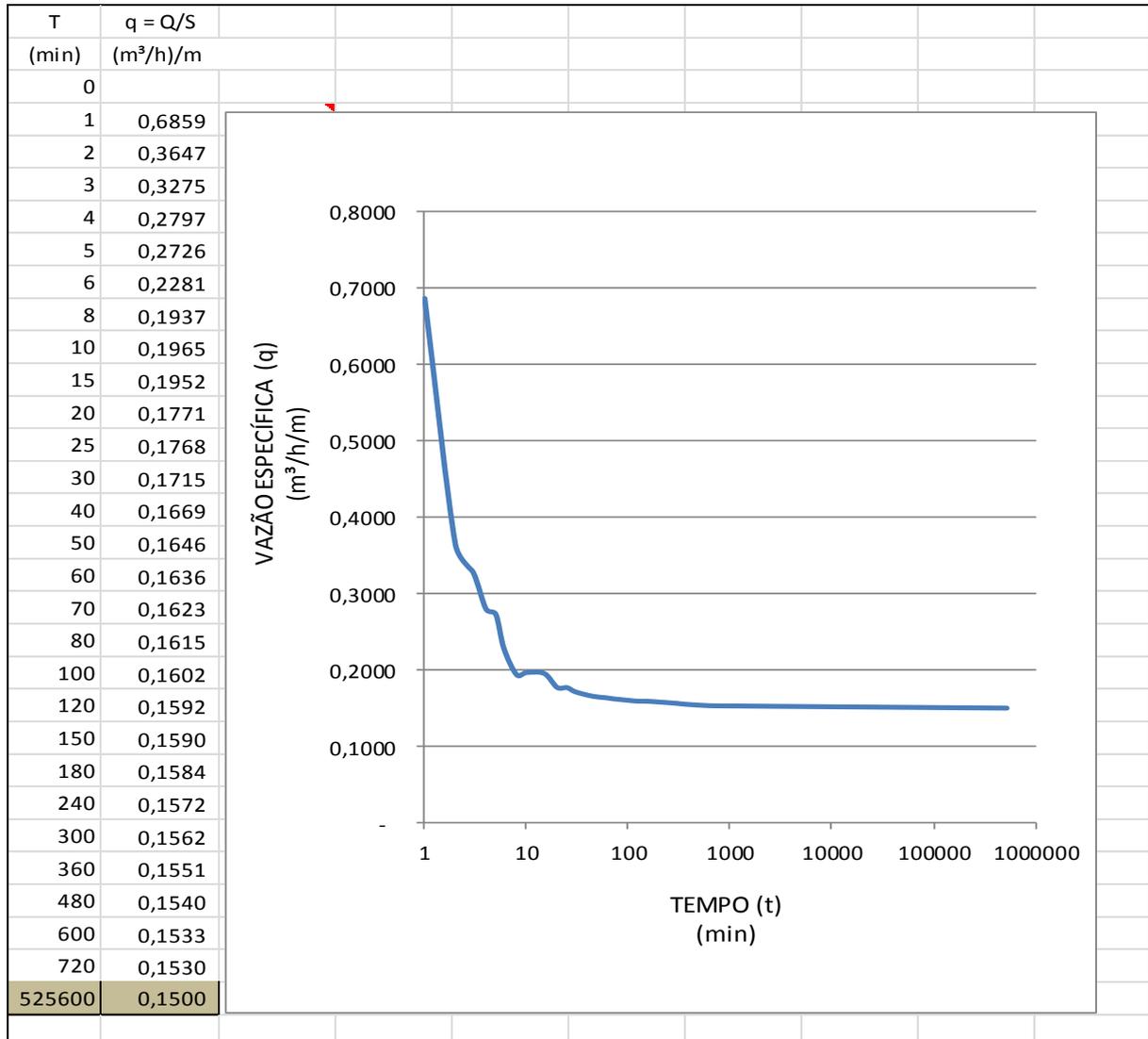
Espessura da lâmina de água = P – NE = 85,00 m – 33,453 m = 51,54 m.

Tabela 01 – Teste de Bombeamento

TESTE DE VAZÃO EM POÇOS TUBULARES									
DATA 15/10/2013									
AQÜÍFEROS FISSURAIS/CÁRSTICOS									
MUNICÍPIO : Afonso Bezerra /RN					COORD UTM: 782836,40 Km E / 9399929,00 Km S				
LOCAL : Assentamento Floresta I					ZONA: 24				
CÓDIGO PAD:					COORD GEOGRÁFICA: 36° 26' 51,7" W / 05° 25' 24,5 S				
AQÜÍFERO: Cárstico					DATUM: WGS-84				
PROFUNDIDADE DO POÇO (m) 85,00					DIAMETRO DO REVESTIMENTO: 6"				
TESTE COM BOMBA SUBMERSÍVEL					CRIVO DA BOMBA				
NE (m)	33	ND (m)	50,590	Q (m³/h)	2,57	TB(min)	720		
BOMBEAMENTO						RECUPERAÇÃO			
HORA	T	ND (m)	S	Q	q = Q/S	Tr	ND'	S'	(TB/Tr)+1
(h:min)	(min)		(m)	(m³/h)	(m³/h)/m	(min)	(m)	(m)	
06:00:00									
06:01:00	1	37,20	3,75	2,570	0,6859	1	47,64	14,19	721,00
06:02:00	2	40,50	7,05	2,570	0,3647	2	44,15	10,70	361,00
06:03:00	3	41,30	7,85	2,570	0,3275	3	43,66	10,21	241,00
06:04:00	4	42,64	9,19	2,570	0,2797	4	42,52	9,07	181,00
06:05:00	5	42,88	9,43	2,570	0,2726	5	41,44	7,99	145,00
06:06:00	6	44,72	11,27	2,570	0,2281	6	40,53	7,08	121,00
06:08:00	8	46,72	13,27	2,570	0,1937	8	39,16	5,71	91,00
06:10:00	10	46,54	13,09	2,570	0,1964	10	38,13	4,68	73,00
06:15:00	15	46,62	13,17	2,570	0,1952	15	37,85	4,40	49,00
06:20:00	20	47,97	14,52	2,570	0,1770	20	36,15	2,70	37,00
06:25:00	25	47,99	14,54	2,570	0,1768	25	35,71	2,26	29,80
06:30:00	30	48,44	14,99	2,570	0,1715	30	35,41	1,96	25,00
06:40:00	40	48,85	15,40	2,570	0,1669	40	34,98	1,53	19,00
06:50:00	50	49,07	15,62	2,570	0,1646	50	34,58	1,13	15,40
07:00:00	60	49,16	15,71	2,570	0,1636	60	34,22	0,77	13,00
07:10:00	70	49,29	15,84	2,570	0,1623	70	34,01	0,56	11,29
07:20:00	80	49,37	15,92	2,570	0,1615	80	33,81	0,36	10,00
07:40:00	100	49,50	16,05	2,570	0,1602	100	33,72	0,27	8,20
08:00:00	120	49,60	16,15	2,570	0,1592	120	33,70	0,25	7,00
08:30:00	150	49,62	16,17	2,570	0,1590				
09:00:00	180	49,68	16,23	2,570	0,1584				
10:00:00	240	49,80	16,35	2,570	0,1572				
11:00:00	300	49,90	16,45	2,570	0,1563				
12:00:00	360	50,02	16,57	2,570	0,1551				
14:00:00	480	50,14	16,69	2,570	0,1540				
16:00:00	600	50,22	16,77	2,570	0,1533				
18:00:00	720	50,25	16,80	2,570	0,1530				
	1 ANO	50,59	17,14	2,570	0,1500				

Fonte: VERITAS – Engenharia Ambiental Diagnóstico Técnico, Social, Ambiental de Afonso Bezerra/RN, 2014.

Gráfico 01 - Curva Vazão específica (q) X Tempo de Bombeamento (t)



Fonte: VERITAS – Engenharia Ambiental, Diagnóstico Técnico, Social, Ambiental de Afonso Bezerra/RN, 2014.

Rebaixamento máximo disponível (RMD) = 40% de 51,547 m

RMD = 20,62 m

E a vazão máxima de exploração do poço será:

**Q max = RMD x q (1 ano) = 20,62 m x 0,15 m<sup>3</sup>/h/m = 3,093 m<sup>3</sup>**

Quando este rebaixamento máximo disponível é somado ao nível estático se obtém a profundidade recomendada do crivo da bomba submersível, ou seja,

**Profundidade da bomba = 20,62 m + 33,453 m = 54,08 m**

Levando-se em conta as variações de nível estático influenciadas pela sazonalidade, futuras perdas de carga por colmatção de fissuras/fraturas ou interferências de níveis provocados pelo funcionamento de poços próximos, pode-se acrescentar mais 6 (seis) metros na profundidade definitiva da bomba submersa.

Este resultado, todavia não deverá ser efetivado sem antes de se definir as demandas de água, com relação aos volumes a ser consumidos nos usos praticados pelo conjunto de famílias da comunidade. A vazão máxima de exploração do poço pode suprir totalmente ou parcialmente as necessidades básicas da comunidade. É fundamental o pronunciamento e a decisão da comunidade sobre este aspecto para que seja definida uma vazão recomendável de exploração com a respectiva especificação da bomba submersível, observada a economicidade principalmente com relação ao gasto diário de energia elétrica.

Concluindo, deve-se sempre considerar que os métodos para cálculos de produção são vários e dependem de vários fatores como comportamento hidráulico do aquífero, composição litológica do perfil litológico do poço, profundidade e extensão das fraturas, cavernas da posição e espessura das secções filtrantes do pacote sedimentar produtor etc.;

#### e) Informações hidroquímicas da água

As características físico-químicas da água superficiais são adquiridas em função basicamente do clima, da composição das rochas aflorantes drenadas, da natureza do solo e da ocupação antrópica. Um percentual dessa água irá se infiltrar no meio ambiente subterrâneo,

Sob o ponto de vista qualitativo, a água subterrânea nada mais é que a resultante do contato da água de infiltração e respectivas características adquiridas, com as rochas que compõe o citado meio, tendo, como fator primordial, a composição química dessas rochas e o tempo de residência desta água no aquífero.

Dessa forma o levantamento das informações geológicas é importante, servindo de parâmetros para a definição do tipo de análise química que se quer. Esse é o caso de regiões onde predominam as rochas constituídas por metais pesados e radioativos cujos elementos químicos, como urânio, chumbo, manganês, alumínio, bário, cádmio, etc. que podem estar dissolvidos na água em concentrações não compatíveis com o consumo humano e animal.

Neste caso é importante a determinação dos teores desses elementos e, mesmo depois de instalado o sistema de dessalinização, determinar os mesmos teores nas amostras de água do permeado e concentrado das águas de processamento do dessalinizador, assim como analisar a água represada nos tanques do concentrado.

Outro tipo de influência na qualidade da água fica por conta da contaminação por genes patogênicos oriundos de matéria orgânica de origem humana e animal, provocando o desenvolvimento de doenças de veiculação hídrica e consequentes óbitos principalmente na população infantil das comunidades.

- Desinfecção do Poço

Para o Programa Água Doce, a fonte hídrica considerada é o poço tubular que abastece as comunidades rurais com água salobra ou salgada.

Antes de se realizar a amostragem da água subterrânea para a posterior análise físico-química, é necessário que o poço passe pelo processo de desinfecção. Deve sempre ser considerado que, por ocasião da sua construção, foram introduzidas as composições de perfuração (hastes, martelo pneumático etc.), tubulações acopladas ao compressor para o desenvolvimento e limpeza do poço e bomba submersível para o teste de bombeamento. Comumente esses materiais se encontram em contato com o terreno no canteiro de obra, sendo, portanto, susceptíveis à contaminação bacteriológica do meio ambiente.

Este processo deverá ser executado após a etapa de desenvolvimento, limpeza e teste de bombeamento, a partir introdução de uma solução de hipoclorito de sódio ( $\text{NaClO}$ ) com uma concentração de 200 mg/L cuja permanência deverá ser de 12 horas, devendo ser realizada de forma que o desinfetante circule no interior do poço, no trecho compreendido entre o nível estático e o fundo do poço e o nível estático e a boca do poço. Cabos, bomba submersível e tubulações usadas no processo deverão ser previamente desinfetados evitando qualquer contaminação na zona não saturada do aquífero, ou seja, entre a boca do poço e o nível estático do poço.

Após a execução da desinfecção é importante deixar a bomba submersível funcionando pelo tempo mínimo para a extração de todo volume de água afetada no processo objetivando a retirada total de cloro livre.

- Características físicas da água

Para fins de análise da qualidade da água as características físicas os parâmetros determinados são temperatura, cor, sabor, turbidez e condutividade elétrica. Cor, sabor e turbidez podem ser observados por ocasião da coleta da amostra que vai a laboratório.

A aceitação da água para beber pela população da comunidade rural é, na prática, definida pelas suas características de cor, sabor e turbidez. A temperatura da água captada em poços pouco profundos é sempre próxima à temperatura do meio ambiente, não tendo relevância no uso que se possa fazer localmente.

Uma turbidez acentuada pode indicar que o poço não tenha sido desenvolvido e limpo suficientemente que com o uso, pode afetar diretamente a bomba submersível instalada para fornecimento de água, assim danificar as membranas filtrantes do dessalinizador pela presença de sílica em alto teor.

A condutividade elétrica a ser obtida no local é um indicador importante na definição do aproveitamento do poço, visto que, há uma relação aproximada com a quantidade de sólidos totais dissolvidos (TDS) que é um parâmetro importante – limitado preliminarmente ao mínimo de 1000 mg/L de sais totais para a instalação do sistema de dessalinização.

- Características químicas da água

Os principais parâmetros químicos a serem dosados em uma análise são: sólidos totais dissolvidos (STD), potencial hidrogeniônico (pH), os cátions, - ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), ( $\text{Mg}^{2+}$ ), os ânions - íons negativos de cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), carbonato de cálcio ( $\text{CO}_3^-$ ), bicarbonato de cálcio ( $\text{HNO}_3^-$ ) e Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), alcalinidades (total, de hidróxido, carbonato e bicarbonato em  $\text{CaCO}_3$ ), dureza em  $\text{CaCO}_3$ , a série de nitrogênio (nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_3$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) o ferro (Fe) e a sílica ( $\text{SiO}_2$ ).

Os sólidos totais dissolvidos é o resultado da soma, em peso, dos constituintes minerais dissolvidos na água e é medido em miligramas por litro (mg/L). É o parâmetro que define a utilização da água para o consumo humano

(máximo de 500 mg/L ou animal (até 10.000 mg/L dependendo do animal). Desta forma define o mínimo de salinidade para o processo de dessalinização da água.

O potencial hidrogeniônico (pH) parâmetro que varia de 1 a 14 (adimensional) em função do gás carbônico dissolvido na água e a sua alcalinidade. O índice 7 representa o pH neutro enquanto valores abaixo representa o pH ácido e acima de 7 o pH básico. Em termos práticos o pH da água serve para a definição da escolha do material de revestimento e filtros por ocasião da completação do poço, da bomba submersível a ser instalada e tubulação de adução para a caixa d'água. Com o tempo de uso de águas ácidas podem danificar materiais que não sejam de PVC ou aço inoxidável.

Os cátions e ânions se encontram em maior quantidade na água, compondo a maior parte do total de sólidos dissolvidos (TDS) e sua relação serve ao cálculo de balanço iônico e a Classificação de Piper pelos íons predominantes. O caso do cátion cálcio o limite para o consumo humano é de 200 mg/L e para os ânions cloreto e sulfato é de 250 mg/L (Portaria 2914 do Ministério da Saúde, 2011) (Tabela 02).

Os elementos nitrogenados podem indicar a presença de matéria orgânica e até poluição recente no caso da presença de nitritos. O nitrato resultante final da oxidação da matéria orgânica em níveis superiores a 5 mg/L pode indicar contaminação da água por atividade antrópica.

Com relação ao ferro, o nível máximo para o consumo humano é de 0,3 mg/L. (Portaria 2914 do Ministério da Saúde, 2011). Alto teor de ferro na água captada pode estar associado por quimiossíntese à presença de ferrobactérias ou corrosão do revestimento e filtros de ferro ou galvanizados de poços antigos.

A dosagem de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) também é importante por cota dos danos que podem causar às membranas do dessalinizador. o teor alto de sílica pode estar associado a poços que não foram suficientemente desenvolvidos e limpos.

Tanto as características físicas como químicas (de elementos orgânicos, inorgânicos, agrotóxicos e microrganismos) da água subterrânea têm a sua classificação e valores máximos permitidos, através dos limites para os o consumo humano, animal, irrigação e recreação definidos pela **Resolução n.º 396/2008 do CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente.**

- A análise físico-química – balanço iônico

A análise físico-química é o documento científico usado na determinação da qualidade da água. De posse dos dados da análise, a primeira observação a ser feita diz respeito ao balanço iônico. É comum a não realização do balanço iônico por parte dos laboratórios que entregam o laudo da análise, sem a colocação do erro máximo permitido, obtido no cálculo realizado por essa ferramenta. .

É fundamental ter a certeza de que a amostra foi analisada corretamente para que se evite a escolha das membranas filtrantes do dessalinizador fora do padrão físico-químico, para o qual foram fabricadas. A ocorrência de uma má escolha pode acarretar membranas super ou subdimensionadas afetando diretamente a economicidade prática de seu funcionamento referente a relação permeado/concentrado, ou seja, à recuperação do dessalinizador.

Como exemplo, no caso da amostra 663/14 (Tabela 2) a seguir, foram executados com o auxílio do programa QUALIGRAF (FUNCEME,2014) o balanço iônico:

- a) Pelo método de Custódio & Llamas -1993, (Figura 1) que considera a condutividade elétrica (C.E.) e que resultou em um erro prático de 5,87% um pouco acima do limite do erro permitido (4%) para a condutividade de 3.458  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- b) Pelo método de Logan - 1965 (Figura 2) que considera a soma de íons ou cátions e que resultou em erro prático de 2,93%, portanto abaixo do limite do erro permitido.

OBS: Como em um dos métodos se detectou um erro acima do permitido, a análise foi repetida permanecendo o mesmo erro. Isto pode ter acontecido por alguma interferência de algum elemento não dosado. Ademais, constatado o erro prático ficou abaixo do máximo permitido pelo método de Logan, pode-se considerar o que a amostra de água foi analisada corretamente.

- Interpretação da análise físico-química

A interpretação da análise físico-química da água deve levar em consideração os múltiplos usos praticados ou que podem vir a ser praticados pela

comunidade. Para cada uso a legislação define limites máximos permitidos em termos de elementos dosados na água.

Os usos mais comuns se referem ao consumo humano, consumo animal (por espécie animal), irrigação (por tipo de cultivo) e recreação. Nesses casos, a Resolução 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA pode ser a fonte de consulta para a utilização da água do concentrado obtido no processo de dessalinização da água.

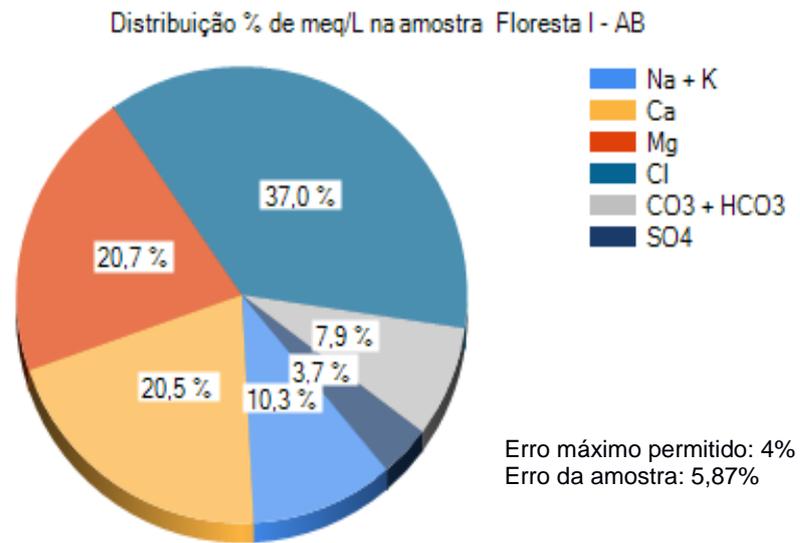
No exemplo da amostra 666/14 (Tabela 2) os parâmetros analisados na amostra, que classificam a água como mista cloretada pelo Diagrama de Piper (Figura 3), mostram que a água bruta captada no poço não pode ser consumida pelo ser humano por ter o total de sais dissolvidos maior que 0,5g/L, devendo ser dessalinizada para tal fim. Serve, entretanto, para o consumo pelo gado, ovinos e caprinos que suportam água com mais de 8g/L de sais totais, mesmo considerando que o teor de sais totais dissolvidos seja duplicado com o processo de dessalinização e o consumo do concentrado produzido.

No que diz respeito da qualidade desta água para a irrigação foi utilizado o Diagrama do United States Salinity Laboratory – USSSL, que usa o RAS (Razão de Adsorção do Sódio), ou seja, a sodificação do solo e a condutividade elétrica diretamente proporcional ao perigo de salinização deste solo. Para a citada amostra a classificação obtida foi C<sub>4</sub>S<sub>1</sub> – água com baixo risco (formação de teores nocivos de sódio susceptível de troca) para a quase totalidade dos solos e um alto risco de salinização que podem ser utilizadas em solos arenosos permeáveis abundantemente irrigados.

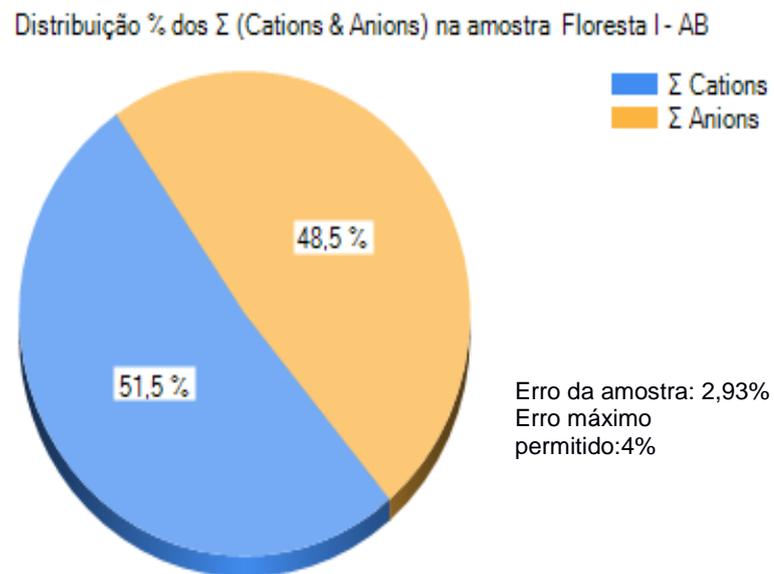
Tabela 02 – Análise físico-química

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA			
Laboratório : LABORATÓRIO DE ANÁLISES DE SOLOS, ÁGUA E PLANTA			
Endereço: Av. Interventor Mário Câmara, 2550 Natal RN - CEP 59074-600			
Amostra n.º	663 / 14	Data entrada	28/05/2014
		Data - entrega	10/06/2014
Poço			
Solicitante: VÉRITAS ENGENHARIA AMBIENTAL			
Procedência: Floresta I - Afonso Bezerra - RN		COORD:782836,40 Km E / 9399929,00 Km N	
Materia : Água			
Coletor: Laboratório		Cliente	X
Determinação*	Valor Máximo Permitido**	Valor Encontrado	
Temperatura °C		26,00	
Cor uH	15,00	-	
Odor	não objetável	não objetável	
Sabor	não objetável	salôbra	
Turbidez, UT	5,00	0,00	
pH	6 a 9,5	7,10	
Condutividade elétrica, µS/cm		3.458,00	
Sólidos totais a 105 °C, mg/L		2.494,00	
Sólidos dissolvidos totais, mg/L	1.000,00	2.494,00	
Sólidos em suspensão, mg/L		0,00	
Alcalinidade total, mg/L CaCO <sub>3</sub>		278,89	
Alcalinidade de hidróxido, mg/L CaCO <sub>3</sub>		0,00	
Alcalinidade de carbonato, mg/L CaCO <sub>3</sub>		0,00	
Alcalinidade de bicarbonato, mg/L CaCO <sub>3</sub>		278,89	
Dureza, mg/L CaCO <sub>3</sub>		1.457,60	
Nitrogenio amoniacal, mg/L NH <sub>3</sub>	1,50	0,10	
Nitrito. mg/L N	1,00	0,01	
Nitrato. mg/L N	10,00	10,13	
Cálcio, mg/L Ca <sup>+2</sup>		289,82	
Magnésio, mg/L Mg <sup>+2</sup>		178,28	
Sódio, mg/L Na <sup>+</sup>	200,00	154,00	
Potássio, mg/L K <sup>+</sup>		22,14	
Ferro, mg/L Fe	0,30	0,08	
Carbonato, mg/L CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>		0,00	
Bicarbonato, mg/L HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		340,25	
Sulfato, mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	250,00	124,54	
Cloreto, mg/L Cl <sup>-</sup>	250,00	927,66	
Sílica, mg/l SiO <sub>2</sub>		31,86	
Fósforo Reativo Total, mg/L P		0,00	
** Padrão de aceitação para o consumo humano (port. 2914 MS - 12/12/2011)			

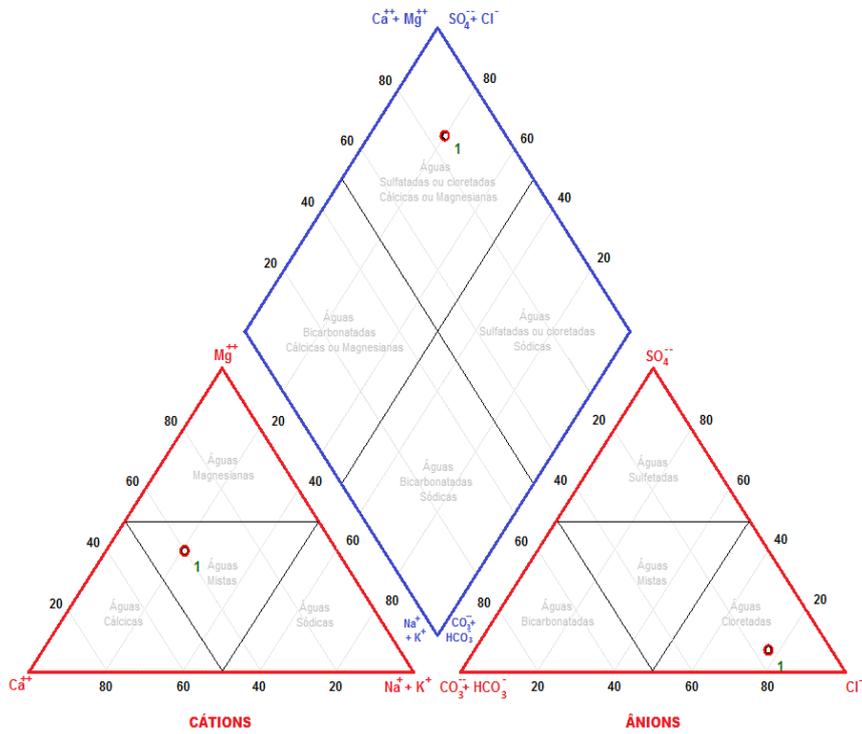
Fonte: Diagnóstico Técnico, Social, Ambiental – VERITAS – Eng. Ambiental, 2014.



**Figura 3.** Balanço Iônico (Custódio & Llamas,1983)

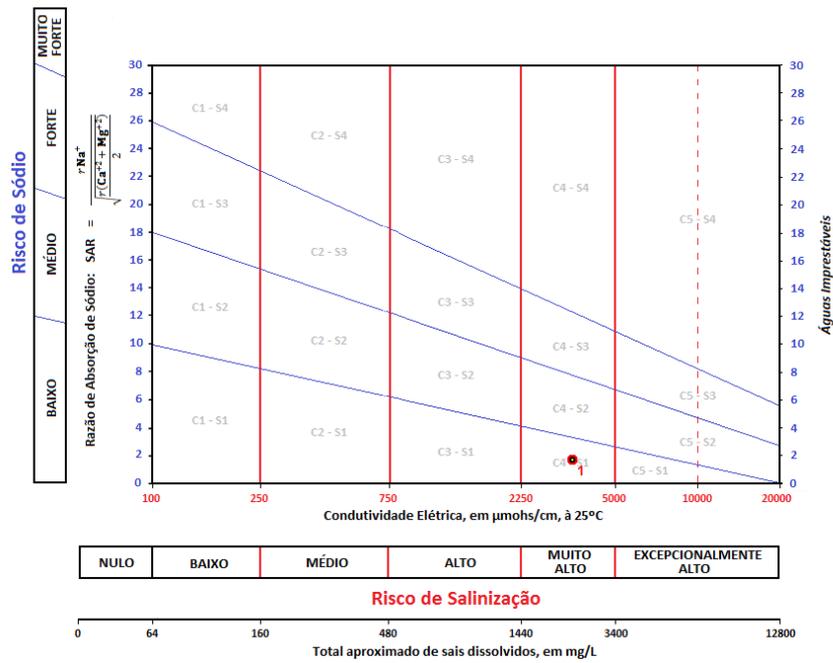


**Figura 4.** Balanço Iônico (Logan,1965 )



LEGENDA

1- Floresta I - AB



LEGENDA

1- Floresta I - AB

## 6. CONCLUSÃO

O Programa Água Doce, como um programa de ação governamental que tem como meta, em termos amplos, a aplicação de uma política pública de sustentabilidade social e ambiental, tem a preocupação, não somente com os aspectos sociais que envolvem o abastecimento de água de boa qualidade para as populações das comunidades rurais do semiárido, mas também com os aspectos técnicos da implantação de sistema de dessalinização, cujo ponto alto é o respeito à utilização moderna da tecnologia, sintonizada com a economicidade e a facilidade de operação dos referidos sistemas.

Seguindo essa premissa básica, este trabalho tem o seu foco na utilização, por técnicos e operadores, dos conhecimentos mais básicos da hidrogeologia e procedimentos práticos advindos das observações locais principalmente aquelas atinentes à construção, funcionamento da fonte hídrica de captação da água subterrânea (poço) e respectivos usos em benefício da população rural.

A atualização do Documento Base, neste caso, se deu pela revisão conceitual de forma a tornar mais claro o texto referente aos aspectos da captação da água subterrânea e, sobretudo pela inserção das noções básicas de hidrogeologia e procedimentos de campo com relação a análise dos dados construtivos do poço, hidráulicos e hidroquímicos da água subterrânea.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Documento Base do Programa Água Doce. 2010. Disponível em <http://www.mma.gov.br/agua/agua-doce> Acesso 26/06/2016.
- CUSTÓDIO, E., Hidroquímica, Sección 10, Hidrologia Subterrânea, Ediciones Omega, 2ª Edición, 1983
- DNOCS, História. Disponível em <http://www.dnocs.gov.br/comunicacao/registros> Acesso 26/06/2016
- VERITAS ENGENHARIA AMBIENTAL Diagnóstico Técnico, Social, e Ambiental da Localidade de Floresta I, 2014.
- FEITOSA, F.A.C., Testes de Bombeamento em Poços Tubulares, DNPM/ABAS, 1996.
- FGV CPDOC, A Criação da SUDENE. Disponível em <http://www.cpdoc.fgv.br>, acesso 26/06/2016.
- FILHO, M.J., Evolução Histórica do Conhecimento, Hidrologia: Conceitos e Aplicações, CPRM, 3ª Edição, 2008.
- MENTE, A. A Água Subterrânea no Brasil, Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, CPRM, 3ª Edição, 2008.
- PORTARIA 2914, Ministério da Saúde, 2011.
- RESOLUÇÃO 257, Coordenação Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2005.
- RESOLUÇÃO 386, Coordenação Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2008.
- SANTOS, A.C., Noções de Hidroquímica, Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, CPRM, 3ª Edição, 2008.