



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Ciências da Matemática e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia

Diana Gomes Tabach Bustamante da Rocha

**Proposta de Revisão da Rede de Monitoramento para o Sistema Aquífero
Urucuia (SAU) no Estado da Bahia com Base no Estado da Arte**

Rio de Janeiro
2023

Diana Gomes Tabach Bustamante da Rocha

Proposta de Revisão da Rede de Monitoramento para o Sistema Aquífero Urucuia (SAU) no Estado da Bahia com Base no Estado da Arte

Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador(a): Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr.

Rio de Janeiro
2023

Rocha, Diana Gomes Tabach Bustamante da

Proposta de Revisão da Rede de Monitoramento para o Sistema Aquífero Urucuia (SAU) no Estado da Bahia com Base no Estado da Arte / Diana Gomes Tabach Bustamante da Rocha – Rio de Janeiro: UFRJ/IGEO 2023.

Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2023.

Orientador(a): Gerson Cardoso da Silva Jr.

1. Aquífero 2. Monitoramento 3. Revisão

Diana Gomes Tabach Bustamante da Rocha

Proposta de Revisão da Rede de Monitoramento para o Sistema Aquífero Urucuia (SAU) no Estado da Bahia com Base no Estado da Arte

Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Aprovado em:

Por:

Orientador: Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr. (IGEO - UFRJ)

Dra. Helena Polivanov (IGEO - UFRJ)

Dr. Eduardo Antonio Gomes Marques (DEC - UFV)

Me. Hullysses Sabino (IGEO - UFF)

Rio de Janeiro

2023

Agradecimentos

Nesta dedicatória, gostaria de agradecer às pessoas que fizeram parte dessa minha trajetória da graduação. Agradeço especialmente ao meu orientador Dr. Gerson Cardoso e ao laboratório de Hidrogeologia por me trazerem oportunidades incríveis e confiarem em mim durante toda a minha graduação.

Sou extremamente grato a todos os meus amigos, sobretudo aos que criei ao longo dos meus anos na geologia. A quem me apoiou e esteve ao meu lado tanto nos momentos fáceis quanto nos mais difíceis e conturbados. Beatriz, Letícia, Rebecca, Rodrigo, Rafa, Mariana e tantos outros nomes que eu nunca esquecerei.

Não posso deixar de citar o meu grupo de amigos do colégio, por serem fundamentais na construção da minha vida e me ajudarem a relaxar em momentos em que a graduação tomou conta de todo o resto, lembrando que no final, vai dar tudo certo. Aos queridos Daniel Maia, Igor Maiello, Luana Reis, Giulia Ventura e Gabrielle Lopes, aqui deixo os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço aqui também ao meu namorado, João Vitor Marques, que foi essencial para que eu me mantivesse com a cabeça no lugar e conseguisse chegar até aqui. Eu não conseguiria sem você.

Agradeço a cada membro da minha família. A minha mãe Luciana, às minhas avós Maria Luiza e Dayse, a todos os meus tios e tias, mas especialmente a minha tia Ilene e aos meus gatos, Azeite e Paçoca, os meus confortos diários. É impossível manifestar em apenas um parágrafo o amor e a gratidão a tudo que fizeram por mim ao longo de minha vida. Agradeço por me educarem, por colaborarem na construção do meu caráter e por me protegerem.

Por fim, porém o mais importante, agradeço ao meu pai, Gustavo, que não está mais aqui para ver esse ciclo se fechar, mas que eu sei que está olhando por mim e orgulhoso da filha que criou. Toda a minha vida acadêmica foi para ti. É para você que eu dedico não só esse trabalho, mas toda a minha carreira acadêmica. Muito, muito obrigada.

“Se há risco, é de eterno ser”

- **Scalene**

Resumo

ROCHA, Diana G. T. B. **Proposta de Revisão da Rede de Monitoramento para o Sistema Aquífero Urucuia (SAU) no Estado da Bahia com Base no Estado da Arte.** Ano 2023, 66 p., Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

O monitoramento do nível de água subterrânea é a principal fonte de informação para determinar os efeitos de estresses hidrológicos nos sistemas de água subterrânea. Dados diários a mensais do nível de água subterrânea são considerados adequados. Por outro lado, dados coletados ao longo de anos a décadas são necessários para abordar os efeitos de longo prazo do desenvolvimento do aquífero e compilar um registro hidrológico, definindo as flutuações do nível de água subterrânea ao longo do tempo. Registros de longo prazo são importantes para entender e corrigir problemas que se desenvolvem em resposta a padrões locais e regionais de extração de água subterrânea e mudanças no uso da terra. A intensificação no uso das águas subterrâneas aliada ao pouco conhecimento acerca da dinâmica de fluxo e armazenamento podem resultar em interferências ambientais como rebaixamento significativo dos níveis d'água, supressão ou redução de vazões de nascentes, diminuição das vazões de poços tubulares, avanço de cunhas salinas e abatimentos de terrenos. Mapear, através de uma rede de monitoramento, o uso da água subterrânea é essencial para o contexto de um uso mais sustentável mas também para o registro mais fidedigno para futuros estudos. Este trabalho busca revisar os conceitos de rede de monitoramento integrado das águas subterrâneas a partir da revisão bibliográfica da literatura disponível. Para atingir esse objetivo são apresentados os diversos fundamentos para a implementação de uma rede de monitoramento. Em seguida, apresentam-se exemplos de redes de monitoramento existentes em alguns países, além da rede de monitoramento brasileira implementada pela CPRM. Por fim, propôs-se uma base teórica atualizada para a revisão da rede de monitoramento existente no Sistema Aquífero Urucuia, localizado na porção oeste da Bahia.

Palavras-chave: Gestão de Aquíferos; Revisão Metodológica; Medição do Nível Piezométrico

Abstract

ROCHA, Diana G. T. B. **Proposal for a Review of the Groundwater Monitoring Network for the Urucuia Aquifer System (UAS) in the State of Bahia Based on the State-of-the-Art.** Ano 2023, p. 66, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Groundwater level monitoring is the main source of information for determining the effects of hydrological stresses on groundwater systems. Daily to monthly groundwater level data are considered adequate. While data collected over years to decades are necessary to address the long-term effects of aquifer development and compile a hydrological record defining groundwater level fluctuations over time. Long-term records are important for understanding and correcting problems that develop in response to local and regional patterns of groundwater extraction and land use changes. The intensification of groundwater use, combined with limited knowledge of flow dynamics and storage, can result in environmental interferences such as significant water level drawdown, suppression or reduction of spring flows, decreased yields from boreholes, saltwater intrusion, and land subsidence. Mapping groundwater use through a monitoring network is essential for promoting more sustainable use and providing reliable records for future studies. This work aims to review the concepts of an integrated groundwater monitoring network based on the available literature. To achieve this objective, the various fundamentals for the implementation of a monitoring network are presented. Then, examples of existing monitoring networks in some countries are presented, in addition to the Brazilian monitoring network implemented by CPRM. Finally, an updated theoretical basis was proposed for the review of the existing monitoring network in the Urucuia Aquifer System, located in the western portion of Bahia.

Keywords: Groundwater management; Methodological Review, Piezometric level measurements

Lista de Figuras

- Figura 1.** Representação gráfica do ciclo hidrológico. Fonte: Tucci, 2004 _____4
- Figura 2.** Mapa de localização dos poços de observação já existentes na rede a ser otimizada. Fonte: Prakash e Singh (2000) _____22
- Figura 3.** Resultado da análise multicriterial com auxílio das ferramentas de GIS. Fonte: Esquivel et al. (2015) _____25
- Figura 4.** Mapa de localização das áreas de monitoramento de águas subterrâneas. Fonte: Jørgensen e Stockmarr (2008)_____33
- Figura 5.** Mapa com a distribuição dos poços de monitoramento nos Estados Unidos. Fonte:USGS _____ 35
- Figura 6.** Localização do Sistema Aquífero Urucua (SAU)_____39
- Figura 7.** Figura representativa dos subtipos de aquíferos e do eixo divisor de fluxo subterrâneo no Sistema Aquífero Urucua. Fonte: Gaspar e Campos (2007) _____42
- Figura 8.** Mapa de localização das estações da rede hidrometeorológica nacional, operadas pela CPRM, e pontos de monitoramento construídos Fonte: CPRM _____44
- Figura 9.** Gráfico de variação do nível d'água ao longo do tempo do poço de monitoramento localizado na Fazenda Durr I / Zuttion. Fonte: CPRM_____ 45
- Figura 10.** Mapa de localização dos poços RIMAS _____ 47

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo geral	2
1.1.2. Objetivo específico	3
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	4
2.1. Água Subterrânea	4
2.2. Poços de Monitoramento	5
2.3. Redes de Monitoramento de Águas Subterrâneas	5
2.3.1. Abrangência da rede de monitoramento	9
2.4. Informações Necessárias para a Configuração da Rede de Monitoramento	11
2.5. Rede de monitoramento quantitativo	12
2.6. Rede de monitoramento qualitativo	15
3. METODOLOGIAS REVISADAS	16
3.1. Método Hidrogeológico	18
3.2. Método Geoestatístico	19
3.3. Análise Multicriterial	23
3.4. Método de Combinação da Análise Multicriterial e Geoestatístico	25
4. REVISÃO DOS ESTADO DA ARTE	29
4.1. Redes de Monitoramento ao Redor do Mundo	29
4.2. Rede de Monitoramento no Brasil e no Aquífero Urucua	37
4.2.1. Contextualização sobre o cenário de monitoramento no Brasil	37
4.2.2. Localização da área de estudo	38
4.2.3. Caracterização Hidrogeológica	40
4.2.4. Proposta de Revisão da Rede de Monitoramento do Aquífero Urucua	43

5. CONCLUSÃO	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

A intensificação no aproveitamento das águas subterrâneas, aliada ao pouco conhecimento acerca da dinâmica de fluxo e armazenamento e à ausência de ações efetivas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, resulta em conflitos pelo uso da água e em diversas interferências, tais como: rebaixamento significativo dos níveis d'água, supressão ou redução de vazões de nascentes, diminuição das vazões de poços tubulares, avanço de cunhas salinas e abatimentos de terrenos, dentre outros efeitos adversos.

As águas subterrâneas do Brasil são extraídas por meio de poços tubulares, poços escavados e de nascentes. Apesar da obrigatoriedade por lei do registro e/ou de autorização de extração (outorga) de água, o número de captações regulares é de pouco mais de 1% no total e de cerca de 10% no caso dos poços tubulares e, por consequência, o número real de poços e a quantidade de água extraída no país é desconhecido. Logo, qualquer estudo que busque identificar o papel do recurso hídrico subterrâneo deve superar e ter em conta a falta de dados oficiais (Hirata *et al.*, 2019).

Em conjunto à exploração não controlada, associam-se as práticas pouco criteriosas e sem ordenamento de uso e ocupação dos terrenos, elevando-se a possibilidade de comprometimento tanto quantitativo quanto qualitativo das águas subterrâneas (Mourão, 2009).

A principal questão acerca do presente trabalho é, ao fim e ao cabo, auxiliar a tornar efetivos os diversos instrumentos previstos na legislação para proteção e gestão das águas subterrâneas em geral e em particular no oeste da Bahia. Para isso, é necessário um conhecimento amplo a respeito dos aquíferos e seu comportamento e capacidade de sustentação frente aos múltiplos usos, ou seja, antever um eventual colapso de vários sistemas de produção existentes e estabelecer quais são os impactos de caráter permanente ou de difícil e lenta reversão. Nesse contexto, o monitoramento tem papel fundamental, constituindo-se em uma demanda de caráter nacional e regional prevista em vários instrumentos legais, já que serve como fonte de dados acerca da quantidade e qualidade da água para responder questionamentos em diversas escalas.

Para uma gestão eficiente e de longo prazo dos recursos de águas subterrâneas é necessário um banco de dados robusto sobre as águas subterrâneas (Prakash e Singh, 2000). Isso raramente ocorre de modo satisfatório globalmente, e o Brasil não é exceção: nossos sistemas de controle e acompanhamento de uso de água subterrânea são claramente insuficientes, incipientes e, frequentemente, inexistentes.

Este trabalho busca revisar os conceitos de rede de monitoramento integrado das águas subterrâneas a partir da revisão bibliográfica da literatura disponível. Para atingir esse objetivo serão apresentados os diversos fundamentos para a implementação de uma rede de monitoramento, levando em conta as diferenças de programas de acordo com a área de abrangência, uso atual e pretérito do aquífero e se o principal objetivo é um monitoramento quantitativo ou qualitativo, ou ambos. A finalidade da revisão bibliográfica acerca desse tema é contribuir com a perspectiva de quão importante é mapear o uso da água subterrânea para o contexto de um uso mais sustentável mas também para o registro mais fidedigno para futuros estudos. Apresenta-se ao final uma base teórica para a melhoria da rede de monitoramento existente no Sistema Aquífero Urucuia, oeste da Bahia.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é revisar as metodologias de construção de redes de monitoramento. Esse trabalho tem como finalidade contribuir com as discussões acerca do papel fundamental de se entender o comportamento das águas subterrâneas e capacidade de sustentar o uso dos aquíferos, haja vista a intensificação da exploração das águas subterrâneas e a tendência no aumento do número de poços e/ou no aumento de vazão em poços já existentes. Além disso, tem como objetivo mostrar a aplicação dessas bases conceituais, tecnológicas e financeiras para a implantação de uma rede de monitoramento para uma área específica onde a autora realizou estudos de iniciação científica, o Aquífero Urucuia localizado na porção oeste do estado da Bahia, podendo trazer novas discussões sobre o tema, além de colaborar com a pretendida futura implantação de uma rede de monitoramento na região, projeto que já conta com dotação orçamentária do governo da Bahia.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- (a) Revisar a metodologia de uma rede de monitoramento, gerando uma compilação de informações para trabalhos futuros em outros aquíferos do Brasil.
- (b) Apresentar e analisar a rede de monitoramento existente para o Sistema Aquífero Urucuia Baiano através das metodologias revisadas.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1. Águas Subterrâneas

Um sistema hidrogeológico ou de águas subterrâneas pode ser definido como um conjunto de componentes interconectados, localizados abaixo da superfície da Terra, tanto nos espaços porosos intergranulares do solo, sedimentos e rochas com porosidade primária, quanto nas fraturas das formações rochosas maciças, nos quais a água está presente. Forma parte integrante do sistema hidrológico global, o ciclo hidrológico (Figura 1), constituindo assim os chamados aquíferos. O movimento das águas subterrâneas depende, em grande parte, da porosidade e permeabilidade das rochas pelas quais flui, além da gravidade, que desempenha um papel importante, atraindo a água subterrânea da superfície para o meio ambiente subterrâneo através dos espaços porosos nas rochas (Thakur, 2013).

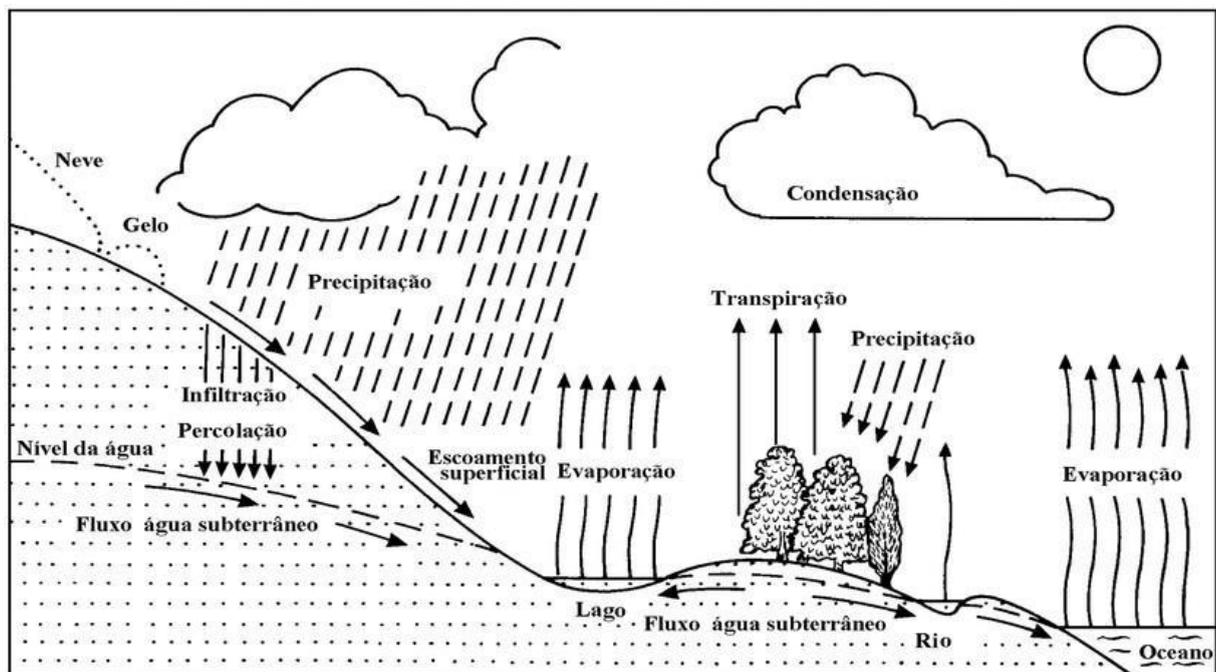


Figura 1: Representação gráfica do ciclo hidrológico. Fonte: Tucci, 2004

No Brasil, cerca de 52% dos municípios do país são total ou parcialmente abastecidos pelas águas subterrâneas, enquanto o setor privado extrai mais de 17,5 bilhões de metros cúbicos por ano ($557 \text{ m}^3/\text{s}$) desse recurso, através de 2,5 milhões de poços tubulares. Mesmo

com essa importância, as águas subterrâneas no país não têm recebido a devida atenção, havendo registros cada vez mais comuns de problemas de superexploração e contaminação, resultado da falta de gestão do recurso hídrico e do planejamento territorial (Hirata *et al.*, 2019).

Inúmeras atividades econômicas utilizam as águas subterrâneas para suprir suas necessidades pelo país, sendo o seu uso distribuído, segundo Hirata *et al.* (2019), entre atendimento doméstico (30%), agropecuário (24%), abastecimento público urbano (18%) e abastecimento múltiplo (14%), atendimento industrial (10%), entre outros usos (4%), cujo destino é em grande parte diversificado para a prestação de serviços urbanos.

2.2. Poços de Monitoramento

O objetivo principal de um poço de monitoramento é fornecer um ponto de acesso para medir os níveis de água subterrânea e permitir a coleta de amostras de água subterrânea que representem com precisão as condições de água subterrânea *in situ* no ponto específico de amostragem. Para alcançar esse objetivo, é necessário cumprir os seguintes critérios definidos por Aller (1990):

- Construir ou utilizar o poço com o mínimo de perturbação à formação geológica;
- Construir ou utilizar o poço com materiais que sejam compatíveis com o ambiente geoquímico e químico esperado;
- Concluir adequadamente o poço na zona desejada;
- Vedar adequadamente o poço com materiais que não interfiram na coleta de amostras representativas da qualidade da água e,
- Desenvolver suficientemente o poço para remover quaisquer aditivos associados à perfuração e proporcionar um fluxo não obstruído através do poço.

2.3. Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas

Uma rede de monitoramento de águas subterrâneas é um conjunto de poços de monitoramento estrategicamente localizados, com dispositivos de medição que coletam dados de interesse de um sistema de águas subterrâneas em uma determinada escala temporal (Thakur *et al.*, 2012). Ou seja, consiste em medições padronizadas a longo prazo, observação, avaliação

do estado e tendências, além de relatórios das condições das águas subterrâneas para atender aos objetivos do programa de monitoramento (Thakur, 2016).

Além dos detalhes de construção apropriados, o poço de monitoramento deve ser projetado de forma que seja possível atender os objetivos gerais do programa de monitoramento, considerando os fatores-chave como (Aller, 1990):

- Propósito pretendido do poço;
- Localização do poço para obter níveis de água precisos e/ou amostras representativas da qualidade da água;
- Diâmetro adequado do poço para acomodar ferramentas apropriadas para desenvolvimento do poço, equipamentos de teste do aquífero e dispositivos de amostragem de qualidade da água e,
- Proteção da superfície para garantir que não ocorra alteração na estrutura ou comprometimento dos dados coletados no poço.

Ao se pensar no monitoramento qualitativo das águas subterrâneas é requerida uma infraestrutura ainda mais complexa para suportar todas as atividades de amostragem, análise em laboratório, análise em campo e processamento de dados. Conseqüentemente, o monitoramento de longo prazo da qualidade das águas subterrâneas demanda um aporte econômico significativo, sendo fundamental em muitos locais em que ocorre a contaminação de águas subterrâneas industriais e urbanas, embora o custo por vezes dificulte sua implantação efetiva.

A necessidade de oferecer subsídios às decisões relacionadas ao uso e gerenciamento das águas subterrâneas torna a ferramenta de monitoramento desse recurso natural essencial, tanto para as instituições governamentais quanto para a população em geral. Sendo assim, é uma ferramenta extremamente necessária para a construção de uma base de dados hidrogeológicos consistentes.

Assim, as decisões relacionadas à identificação de novas fontes de abastecimento por água subterrânea, estimativa dos efeitos de atividades antrópicas nos aquíferos e diversas outras atividades que resultam do uso da água subterrânea, podem ser tomadas de forma mais consciente e concisa, através da análise das séries temporais de dados de nível de água subterrânea e qualidade da água necessárias a essas avaliações e estudos (SOGW, 2013).

Para Cázares *et al.* (2022), um gerenciamento adequado da água subterrânea inclui a implementação da rede de monitoramento a partir de conjuntos de piezômetros ou poços que permitam obter informações espaciais e temporais sobre a qualidade e os níveis da água subterrânea por meio de campanhas de campo. Logo, a rede de monitoramento se torna a principal fonte de informações necessárias para conhecer o comportamento hidrológico da água no subsolo, o que é de vital importância, uma vez que a extração de volumes consideráveis de água subterrânea tem causado efeitos adversos nos níveis e na qualidade da água em todo o planeta.

O monitoramento das águas subterrâneas geralmente começa em pequena escala, com problemas locais, evoluindo para redes de monitoramento regionais ou nacionais, com foco tanto em problemas locais quanto regionais. O monitoramento do nível das águas subterrâneas em escala regional é necessário, uma vez que a maioria das bacias hidrográficas é regional, os impactos das atividades humanas intensivas nas águas subterrâneas se estendem por toda a bacia e a gestão integrada dos recursos hídricos requer informações regionais sobre os níveis das águas subterrâneas em escala de bacia (Zhou *et al.*, 2013). No entanto, aspectos geológicos, que podem levar à falta de conexão entre unidades aquíferas ou entre as águas subterrâneas e as águas superficiais podem tornar esse processo difícil de gerir em nível regional (no caso de aquíferos confinados ou de terrenos cristalinos, por exemplo).

Podem ser distinguidos três estágios de desenvolvimento de uma rede de monitoramento das águas subterrâneas (Jousma e Roelofsen, 2004):

- (1) redes de monitoramento temporárias para investigação das águas subterrâneas ou identificação de problemas locais;
- (2) redes de monitoramento locais das águas subterrâneas para o monitoramento sistemático dos impactos da retirada intensiva de águas subterrâneas em determinados locais; e
- (3) redes de monitoramento das águas subterrâneas nacionais ou regionais para fornecer informações suficientes para o planejamento e gestão integrados dos recursos hídricos.

Assim, uma rede de monitoramento de abrangência nacional servirá para identificar áreas onde os níveis ou a qualidade da água subterrânea podem estar em situação de risco ou, ainda, apontar áreas em que não há dados suficientes para uma avaliação da disponibilidade de água. Para questões governamentais, cada instância deve analisar a rede de monitoramento

localizada em seu território geográfico para assim decidir a necessidade de coleta de dados adicionais de acordo com o nível de detalhe requerido para lidar com as questões locais.

Segundo o SOGW (2013), para se definir a estratégia de implementação da rede de monitoramento são necessários diversos questionamentos, já que a partir desses que serão definidas, por exemplo, a frequência de monitoramento e a necessidade de dados complementares, porque o armazenamento de um aquífero pode variar dependendo das características de seu entorno.

Uma especificação clara dos objetivos de monitoramento e das informações necessárias é fundamental para o projeto de uma rede de monitoramento que tenha como objetivo fornecer os dados necessários para o gerenciamento da água. Para Jousma e Roelofsen (2004), uma parcela significativa dos custos de monitoramento pode ser economizada se os objetivos forem bem definidos e especificados, sendo esses definidos a partir de duas diferentes perspectivas:

- Objetivos de gerenciamento, que tem como exemplos: desenvolver recursos de água subterrânea para o abastecimento de água potável, otimização da produção agrícola, proteção de áreas de conservação da natureza, restauração de áreas úmidas.
- Objetivos técnicos são, por exemplo: determinar as direções do fluxo de água subterrânea, estabelecer as áreas de infiltração e exfiltração, quantificar a relação entre água subterrânea e água superficial, alimentar os modelos de água subterrânea, estabelecer uma estimativa de recarga.

A partir dos dados gerados pela rede, e em conjunto com outros dados disponíveis, é possível determinar, por exemplo, os motivos para eventuais mudanças nas características da água subterrânea. Assim, no caso de mudanças nos níveis d'água que tenham como origem um possível bombeamento nos arredores, seria possível analisar em conjunto o registro da variação do nível d'água gerado pela rede de monitoramento com os dados desse bombeamento. Como outro exemplo, se a variabilidade do clima for suspeita de causar mudanças nos níveis de água, os registros de níveis de água devem ser comparados a dados de precipitação e recarga. Por essas razões, os usuários de dados precisam ter acesso ao máximo possível de dados complementares para responder adequadamente aos "porquês" associados às perguntas que a rede está ajudando a abordar (SOGW, 2013).

Dados de nível de água e as interpretações subsequentes fornecem descrições espaciais, temporais e de tendência das mudanças no armazenamento de água subterrânea ou no nível piezométrico, que podem ser avaliadas para identificar áreas que possuem:

- (1) suprimentos adequados de água subterrânea em diferentes cenários de uso;
- (2) declínio nos suprimentos de água subterrânea em diferentes cenários de uso e
- (3) dados insuficientes para avaliar o status da disponibilidade de água subterrânea.

Outro ponto a ser levado em conta ao se projetar uma rede é que essa é idealizada inicialmente para abordar as condições de nível e qualidade da água subterrânea basais, em relação às quais as mudanças futuras podem ser medidas, e como os níveis de água subterrânea e a qualidade da água subterrânea estão mudando com o tempo.

Por fim, independentemente do objetivo ou parâmetro alvo que precisa ser monitorado, o projeto da rede de monitoramento deve ser baseado na relação entre o esforço de medição e o erro de estimativa (Uil *et al.*, 1999), visando uma diminuição do erro de estimativa e os benefícios subsequentes para a gestão das águas subterrâneas.

2.3.1. Abrangência da rede de monitoramento

Diversos programas de monitoramento vêm sendo propostos ao longo dos anos, sendo eles estruturados em função da área de abrangência, tendo como distinções os objetivos, quando, onde e o que monitorar. Desse modo, podem ter abrangência nacional, regional e local, conforme descrito por Mourão (2009) em seu trabalho pioneiro no Brasil.

- Programa Nacional de Monitoramento de Águas Subterrâneas

Os programas nacionais devem ser definidos para atender a política nacional de proteção e conservação das águas subterrâneas e precisam considerar o uso da água subterrânea como fonte de abastecimento, sua função ambiental e as características de vulnerabilidade dos aquíferos, abrangendo os sistemas hidrogeológicos considerados prioritários nos aspectos de vulnerabilidade e pressões sofridas, além da importância para o abastecimento.

Nesse programa de monitoramento, segundo Mourão (2009), devem estar contemplados nível d'água em poços, vazão de nascentes e escoamento de base de cursos d'água para uma análise quantitativa. Mas também sendo possível monitorar parâmetros químicos e indicadores de intrusão salina, pluviometria e demais componentes exigidos para o cálculo da evapotranspiração, e exploração da água subterrâneas.

No monitoramento quantitativo, a Comunidade Europeia (2007) mostra que a frequência mensal é adequada para aquíferos que mostram baixa variabilidade dos parâmetros considerados, porém recomenda o monitoramento diário para casos em que se tem interesse em integrar a rede de monitoramento de águas subterrâneas com o monitoramento hidrometeorológico. No estudo é ressaltado que a frequência deve ser revisada a partir do avanço no conhecimento das respostas do aquífero e da variação na magnitude de qualquer pressão sobre o aquífero para permitir identificação das variações de curto e longo prazo, o que demanda de um conhecimento profundo da dinâmica do aquífero em específico.

- Programa Regional de Monitoramento de Águas Subterrâneas

Um programa regional de monitoramento, segundo Mourão (2009), deve ser flexível e capaz de servir a diferentes propósitos, no entanto tendo como objetivo principal a aquisição de dados estatisticamente representativos e significativos sobre a água subterrânea de modo a contribuir com as políticas regionais e estratégias de proteção e conservação. Os programas regionais e nacionais devem ser complementares e implantados de forma integrada visando a análise e interpretação dos dados de forma combinada.

Os locais de monitoramento devem atender aos propósitos específicos da gestão e uso das águas, priorizando aquíferos em que existem interferências ou que têm grande importância para o abastecimento. A frequência de amostragem deve ser mais elevada do que o sugerido para o programa nacional.

- Programa Local de Monitoramento de Águas Subterrâneas

Os programas locais são operados de forma independente aos nacional e regional e tem como objetivos (Martinez, 2004 *apud* Mourão, 2009):

- i) identificação de fontes ou atividades potenciais de degradação, sejam elas

- qualitativas ou quantitativas das águas subterrâneas;
- ii) observação e controle do avanço de plumas de contaminação; e
- iii) avaliação dos efeitos de medidas de remediação.

São redes de alto custo operacional já que são implantados em locais específicos que requerem uma grande quantidade de pontos de observação, além de exigirem uma alta frequência de coleta de dados, essas são frequentemente financiadas pelos responsáveis pelas interferências nas águas subterrâneas (Mourão, 2009).

2.4. Informações Necessárias para a Configuração da Rede de Monitoramento

Segundo a Comunidade Europeia (2007), os programas de monitoramento devem ser projetados com base na caracterização e avaliação de riscos para fornecer as informações necessárias sobre o sistema de águas subterrâneas e os efeitos potenciais das atividades humanas sobre ele. Um modelo conceitual para cada corpo de água subterrânea deve ser:

- (a) relevante para avaliar como as pressões identificadas podem afetar esse, e
- (b) proporcional em termos de detalhes e complexidade aos riscos prováveis.

Sendo assim o design do programa de monitoramento exige o conhecimento sobre:

- Limites estimados de todos os corpos de água subterrânea;
- Informações sobre as características naturais e um entendimento do modelo conceitual;
- Informações sobre como os corpos podem ser agrupados devido a características hidrogeológicas semelhantes e, portanto, respostas semelhantes às pressões identificadas;
- Informações sobre o nível de confiança nas avaliações de risco e quais dados de monitoramento seriam necessários para validar as avaliações de risco.

A partir da interpretação dessas informações é que se torna possível a escolha da escala e da extensão do monitoramento necessário para avaliar as mudanças na água subterrânea no momento e as mudanças ao longo do tempo. Determinar o que é considerado suficiente como níveis de precisão e confiança, bem como um risco "significativo", resultará em:

- o número de estações necessárias para avaliar o status de cada corpo de água; e

- a frequência com que os parâmetros devem ser monitorados.

Para Uil et al. (1999), dados acerca do sistema de fluxo subterrâneo, a extensão da água subterrânea, o potencial de uso e vulnerabilidade ao risco de poluição são essenciais para caracterização do corpo. A partir dessas informações, é criado um modelo conceitual para representar o atual conhecimento a respeito do corpo hídrico, incluindo o tipo do aquífero, sua estrutura tridimensional, condições de contorno, pressões percebidas e os impactos identificados (Mourão, 2009).

Para que o monitoramento possa contribuir de forma decisiva no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, é necessária a interpretação conjunta dos resultados obtidos e dos dados de informações meteorológicas e hidrológicas, além da análise das componentes do ciclo hidrológico, reconhecendo o papel da água subterrânea na manutenção do fluxo e qualidade das águas superficiais e vice-versa.

2.5. Rede de monitoramento quantitativo

O monitoramento quantitativo tem como objetivo auxiliar na caracterização hidrogeológica, determinar tendências de alteração e funciona como suporte à análise das características químicas do monitoramento qualitativo. Os principais elementos, segundo a Comunidade Europeia (2007), para compreensão dos aspectos quantitativos são:

- Avaliação da recarga e balanço hídrico;
- Informações de nível d'água e descarga;
- Informações do risco a que encontram expostas as águas subterrâneas dependentes das águas superficiais ou dependentes dos ecossistemas terrestres;
- O grau de interação entre água subterrânea, águas superficiais e ecossistemas terrestres.

Com base na escala e nos objetivos, podem ser considerados dois tipos de redes de monitoramento de águas subterrâneas, primárias, ou secundárias, ou ainda a combinação desses dois tipos (Jousma e Roelofsen, 2004):

- a) Redes "primárias" em larga escala para estudos gerais do sistema de águas subterrâneas:

São redes de monitoramento em larga escala, geralmente cobrindo aquíferos de grande tamanho regional, que fornecem dados sobre o comportamento do sistema de águas subterrâneas e os impactos gerais na situação da água subterrânea causados pela exploração de águas subterrâneas e outras intervenções. Elas também servem como redes de referência para estudos locais específicos. Essas redes podem abranger um país inteiro, como por exemplo na Holanda, ou apenas as planícies e áreas de preenchimento de vales.

As redes primárias possuem poços de observação localizados nos principais aquíferos, principalmente nas zonas de água doce. Os poços selecionados geralmente estão a distâncias relativamente grandes, porém suficientemente próximos para fornecer uma visão geral da situação das águas subterrâneas. Dependendo das características dos aquíferos a rede terá uma determinada densidade de poços. Por exemplo, em aquíferos confinados essa pode ser muito menor do que em aquíferos não confinados, já que esses são localmente mais suscetíveis a influências meteorológicas e humanas.

b) Redes "secundárias" orientadas localmente:

Redes secundárias de monitoramento de águas subterrâneas são compostas para atender a fins específicos, como monitorar a queda do lençol freático ao redor de campos de bombeamento, monitorar os efeitos de projetos de irrigação, monitorar os níveis de água subterrânea em áreas de conservação da natureza. Essas redes geralmente são redes locais, ajustadas à situação específica para a qual são destinadas. Sua configuração depende do assunto estudado e da situação do aquífero envolvido.

c) Combinação de redes primárias e secundárias de monitoramento de águas subterrâneas:

Redes primárias e secundárias são frequentemente combinadas em uma rede regional com espaçamento amplo, com partes mais densamente espaçadas em áreas de interesse específico.

Sendo assim, a partir do trabalho de Jousma e Roelofsen (2004) é apresentada uma terminologia de redes primárias e secundárias que pode ser usada para vincular essas redes a "objetivos gerais", válidos para grandes regiões, e a "objetivos específicos", usados para focar em aspectos particulares e, geralmente, condições locais. Mas essa classificação também pode ser utilizada para dividir a responsabilidade pelo monitoramento entre organizações governamentais responsáveis pelo gerenciamento geral da água e organizações com tarefas ou interesses específicos.

Prioritariamente à implantação da rede de monitoramento é necessária uma elaboração do modelo conceitual da área de interesse, que pode ser refinado através da inclusão de novos pontos de monitoramento se necessário. Por vezes se faz necessária a implementação de um modelo numérico para analisar a integração das águas superficiais e subterrâneas, com o fito de auxiliar na interpretação dos dados do monitoramento quantitativo e na identificação de interferências (Mourão, 2009).

Para o monitoramento, diversos tipos de poços podem ser usados para observar os níveis de água subterrânea na fase inicial de avaliação dos recursos hídricos subterrâneos, desde poços escavados, poços de produção abandonados ou em uso, até poços de monitoramento especialmente perfurados.

Após o potencial do sistema de águas subterrâneas para abastecimento de água ser comprovado e o desenvolvimento estar em andamento, a rede de monitoramento pode ser aprimorada pela instalação de poços de monitoramento extras em locais críticos e substituição de poços disponíveis que não atendam aos critérios (Jousma e Roelofsen, 2004).

Essa rede deverá incluir pontos de monitoramento representativos em quantidade suficiente e uma frequência adequada de monitoramento para que seja possível levar em conta variações de curto e longo prazo na recarga ao estimar o nível das águas subterrâneas e avaliar o status quantitativo de cada corpo de água subterrânea, avaliar o impacto das captações e descargas no nível e estimar a direção e a taxa de fluxo das águas subterrâneas (Comunidades Europeias, 2007). Sendo assim, a rede de monitoramento quantitativo irá fornecer uma avaliação confiável do status quantitativo dos corpos de água subterrânea, ajudando na avaliação dos recursos disponíveis de água subterrânea, complementando e validar o procedimento de caracterização e avaliação dos riscos de não se alcançar um bom status quantitativo.

2.6. Rede de monitoramento qualitativo

A rede de monitoramento qualitativo tem como principal objetivo o monitoramento da qualidade da água subterrânea através da classificação do estado químico da água, mapeamento de áreas com alterações na qualidade e também de áreas com tendências de aumento na concentração de poluentes.

Para monitorar a qualidade da água subterrânea, Jousma e Roelofsen (2004) distinguem três tipos de redes de monitoramento:

1. Rede de referência para a caracterização inicial da qualidade da água subterrânea e para estudos gerais sobre a adequação da água subterrânea e tendências naturais.
2. Redes específicas para monitorar os efeitos na qualidade da água subterrânea causados por fontes difusas de poluição.
3. Redes específicas para monitorar os efeitos na qualidade da água subterrânea de fontes pontuais e lineares de poluição.

Para a implantação de pontos de monitoramento qualitativo deve-se considerar a rede de monitoramento quantitativa para que esses sejam colocados de maneira próxima uns aos outros, para que a combinação de resultados auxilie na interpretação de ambos devido à interdependência entre os aspectos químicos e a variação dos níveis d'água.

Os parâmetros que devem ser minimamente considerados são: pH, turbidez, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, nitratos, coliformes termotolerantes (Mourão, 2009). A resolução CONAMA 396/2008 Art. 12. estabelece que “os parâmetros a serem selecionados para subsidiar a proposta de enquadramento das águas subterrâneas em classes deverão ser escolhidos em função dos usos preponderantes, das características hidrogeológicas, hidrogeoquímicas, das fontes de poluição e outros critérios técnicos definidos pelo órgão competente”. Ou seja, para a definição dos parâmetros a serem considerados é preciso do conhecimento prévio sobre a área, mas também o mapeamento do uso pretendido. Como exemplo, se a rede tem o objetivo de avaliar um caso de contaminação industrial, tanto o número de poços, a distância entre os pontos de monitoramento, a frequência da coleta de dados, a profundidade na qual os parâmetros serão medidos, a área coberta pela rede quanto os compostos a serem analisados serão específicos da área em questão.

3. METODOLOGIAS REVISADAS

Tuinhof et al. (2002) indicam que uma rede de monitoramento é normalmente composta por um conjunto de poços de observação juntamente com um número determinado de poços de extração, de forma otimizada de acordo com as necessidades atuais e futuras, bem como com os recursos econômicos disponíveis. Para isso, diversos métodos são utilizados para que esse aspecto seja atendido.

Um parâmetro fundamental em projetos extração de água subterrânea é o nível da água, que deve ser estimado com alta precisão, sendo esse parâmetro o único mensurável diretamente, e a densidade dos pontos de medição é muito importante (Zhou *et al.*, 2013). A literatura mostra o desenvolvimento de redes de monitoramento de águas subterrâneas usando diferentes métodos, como geoestatística, algoritmo genético, krigagem difusa, métodos estatísticos, modelos matemáticos de fluxo e transporte e técnicas probabilísticas, entre outros. Porém, métodos geoestatísticos baseados em variância, avaliação de semivariograma, teoria de variáveis regionalizadas são utilizados para calcular a distribuição espacial, determinar a precisão dessas distribuições e obter locais de amostragem otimizados para o monitoramento de águas subterrâneas.

Um algoritmo genético baseado em *kriging* foi demonstrado por Reed et al. (2007) para otimizar e projetar a rede de monitoramento quantitativa a longo prazo utilizando dados de nível da água subterrânea. Outras abordagens utilizadas para o projeto de monitoramento de águas subterrâneas incluem modelos matemáticos de fluxo e transporte, técnicas probabilísticas, método hierárquico, métodos de simulação probabilística e análise multicriterial, como descrito por Esquivel *et al.* (2015).

Para Esquivel et al. (2015), o projeto, implementação e otimização dessas redes devem levar em consideração fatores como: geologia, características hidrodinâmicas do aquífero, pontos de poluição, vulnerabilidade do aquífero, localização dos poços, regimes de bombeamento dos poços, acessibilidade dos pontos de monitoramento, condições de operação e manutenção, frequência de monitoramento, bem como custos financeiros. Logo, por esses motivos é possível observar que muitos desses critérios são dinâmicos, sendo assim, é necessário uma revisão periódica sobre o funcionamento da rede de monitoramento.

Zhou *et al.* (2013) classificam os métodos para o projeto de redes de monitoramento do nível das águas subterrâneas em: (1) abordagem hidrogeológica, (2) abordagem geoestatística e (3) abordagem de modelagem.

Os métodos, especialmente os estatísticos, probabilísticos e de otimização, têm-se mostrado eficazes, apesar de serem limitados pela necessidade de conhecimento aprofundado sobre o aquífero e pela disponibilidade de pessoal com o conhecimento necessário para implementá-los (ASCE, 2003 *apud* Esquivel *et al.*, 2015).

Os métodos utilizados para projetar redes de monitoramento são classificados, de acordo com a ASCE (2003) *apud* Esquivel *et al.* (2015), da seguinte forma:

- i) aqueles baseados em regras que combinam a experiência pessoal de um especialista em hidrogeologia com métodos estatísticos;
- ii) estatísticas que incluem comparações estatísticas, detecção de tendências e métodos geoestatísticos.
- iii) técnicas probabilísticas que envolvem a aplicação de métodos como filtro de Kalman, hierárquico e de simulação probalística;
- iv) métodos de otimização matemática

Além da análise espacial do nível de água subterrânea, é preciso analisar as variações temporais do nível de água subterrânea (Ahmadi e Sedghamiz, 2006), já que um dos problemas enfrentados pode ser a falta de medições de dados suficientes, frequentes e regulares ao longo de anos consecutivos. A rede de águas subterrâneas deve ser analisada para diferentes objetivos, como localização espacial, frequência temporal, frequência espacial-temporal de observação, eficiência da rede e efetividade de custos.

Em geral, devido à importância da precisão no monitoramento contínuo das águas subterrâneas, os pesquisadores têm realizado diversos estudos para otimizar custos e tempo nessa área, pois a proposição de novos métodos de previsão e estimativa com alta precisão também é uma necessidade (Kavusi *et al.*, 2020).

Nesta parte do trabalho serão, portanto, descritas as metodologias encontradas com mais frequência na literatura para a instalação das redes de monitoramento.

3.1. Método Hidrogeológico

A abordagem hidrogeológica refere-se aos princípios e diretrizes para o projeto de redes de monitoramento do nível das águas subterrâneas com base na compreensão conceitual dos sistemas hidrogeológicos (Zhou *et al.*, 2013).

Peters (1972) propôs critérios limitados aos dados do nível de água necessários para estudos hidrológicos e de planejamento futuros, relacionados apenas a esse parâmetro, que deve ser coletado sistematicamente ao longo de vários anos e capaz de igualar o escopo e detalhe dos dados à precisão exigida em futuros estudos hidrológicos. Assim, é possível determinar a densidade de poços de observação e o tempo de registro para diferentes intensidades e tipos de investigações hidrogeológicas.

Os critérios para os diferentes níveis de estudo devem resultar em dados adequados para descrever o recurso hídrico subterrâneo com graus apropriados de precisão e detalhe. A definição dos níveis de estudo, a extensão do registro e o cronograma dos estudos foram identificados como elementos básicos dos critérios para o gerenciamento de um programa de medição do nível de água subterrânea.

O projeto da rede é derivado de uma descrição hidrogeológica, sendo assim não é dada uma quantificação explícita da incerteza. Loaciaga *et al.* (1992) definem essa abordagem como o caso em que a rede é projetada com base nos cálculos e no julgamento do hidrogeólogo, sem o uso de métodos geoestatísticos avançados.

Logo, a abordagem hidrogeológica refere-se à análise hidrogeológica que indica locais potenciais de amostragem, tendo as características físicas dos sistemas hidrogeológicos consideradas e os locais de amostragem importantes mapeados. No entanto, a desvantagem dessa abordagem é que não há critério quantitativo para determinar inicialmente quantos poços de observação serão necessários.

Para Uil *et al.* (1999) a abordagem hidrogeológica é mais adequada para estudos específicos de um local, onde existe, por exemplo, uma fonte de contaminação bem delimitada, ou seja, para as redes de monitoramento qualitativos. Logo, no caso das redes de monitoramento qualitativo com base na abordagem hidrogeológica, o número e a localização dos pontos de amostragem são estritamente determinados pelas condições hidrogeológicas próximas à fonte de contaminação, dependendo fortemente de informações descritivas sobre os aquíferos de interesse.

Assim como a abordagem hidrogeológica pode fornecer informações sobre a configuração espacial do projeto da rede, ela também pode ajudar a determinar a frequência de amostragem ao longo do tempo, levando em consideração as variações sazonais para alguns objetivos e algumas atividades humanas, como a agricultura, e pela aplicação da lei de Darcy para descrever a velocidade da água subterrânea (Uil *et al.*, 1999).

Por exemplo, estimando a condutividade hidráulica e a porosidade nas proximidades de um poço de captação de água subterrânea, a velocidade do fluxo pode ser calculada e relacionada ao intervalo de amostragem da qualidade da água subterrânea. Em geral, uma amostragem mais frequente será necessária em aquíferos rasos, de alta velocidade, com maior vulnerabilidade, enquanto uma amostragem menos frequente será necessária em aquíferos mais profundos e confinados.

3.2. Método Geoestatístico

Krige (1951), trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que somente a informação dada pela variância seria insuficiente para explicar o fenômeno em estudo, e que para esse fim seria necessário levar em consideração a distância entre as observações. Assim, o conceito da geoestatística surge, levando em consideração a localização geográfica e a dependência espacial.

Baseado nas observações de Krige, Matheron (1963) desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas, ou seja, uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples. A teoria pressupõe que a variação de uma variável pode ser expressa

pela soma de três componentes (Burrough, 1987 *apud* Camargo, 1998):

- a) uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante;
- b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; e
- c) um ruído aleatório ou erro residual.

A incorporação de procedimentos geoestatísticos em SIG's, baseados em técnicas de krigagem, é importante para melhorar os procedimentos tradicionais dos sistemas devido à qualidade do estimador e, principalmente, pela informação de acurácia fornecida nesse modelo inferencial (Camargo, 1998).

Quando os valores de uma variável estão disponíveis para um conjunto de pontos de amostragem em uma área, métodos de interpolação espacial podem ser usados para determinar o valor da variável em outros locais. A interpolação espacial pode ser dividida em métodos determinísticos (*splines* e funções de base radial) e geoestatísticos (IDW, krigagem/kriging, modelos ordinais). O primeiro método usa uma função matemática para calcular os valores e o valor calculado é um número definido. O segundo método usa estimativas probabilísticas, como a variância.

A krigagem é uma técnica de interpolação baseada na teoria de variáveis regionalizadas, sendo expressa como uma média ponderada dos valores de campo vizinhos que estão dentro de uma determinada distância chamada de alcance de influência (Prakash e Singh, 2000). A estimativa do campo em um ponto arbitrário X, com base em N valores medidos (vizinhos), é dada pela Equação 1:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \times Z(x_i) \quad (\text{Eq. 1})$$

Os pesos são escolhidos de forma que a estimativa tenha as seguintes propriedades:

1. A estimativa é não tendenciosa, dada pela Equação 2:

$$0 = E [Z^*(x_0) - Z(x_0)] \quad (\text{Eq. 2})$$

2. A estimativa tem variância mínima, dada pela Equação 3:

$$E [Z^*(x_0) - Z(x_0)]^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

onde Z e Z* são valores medidos e estimados, respectivamente.

A estimativa de variância mínima dada pela Equação 3 é chamada de variância de krigagem, que pode ser utilizada como um guia na amostragem. Por exemplo, uma localização com o maior nível de incerteza de estimativa indicado por uma alta variância de estimativa pode ser alvo de monitoramento adicional. Uma vez que um variograma do modelo é ajustado, a estimativa em intervalos espaciais regulares é realizada juntamente com a variância de erro.

Para Theodossiou e Latinopoulos (2006), uma das principais vantagens da krigagem é que ela apresenta a possibilidade de estimar o erro de interpolação dos valores da variável regionalizada onde não há medições iniciais, oferecendo uma medida da precisão e confiabilidade da estimativa da distribuição espacial da variável.

Prakash e Singh (2000), visando aprimorar a rede de monitoramento de uma área que fica a 50 km a leste de Hyderabad, na Índia, utilizaram do método de krigagem para realizar uma seleção ideal de locais para ampliar a rede existente. O trabalho foi baseado na redução da variância e na classificação dos novos locais em potencial. Durante a krigagem obteve-se o resultado de que a maioria dos altos valores de variância de erro foi encontrada ao longo da fronteira da bacia. Portanto, os nós de fronteira foram as escolhas predominantes para medições adicionais. A rede a ser otimizada conta com 32 poços (Figura 2) e ao passo que os autores incluíram mais 10 poços, a variância total de erro que foi reduzida em 25%.

Esta variância total do erro foi reduzida em 50% após a adição de mais 24 aos poços existentes. Após essa etapa, o ganho de informação se torna praticamente insignificante, mesmo após adicionar novos pontos de observação. Assim Prakash e Singh (2000), chegaram ao número máximo de poços que devem ser adicionados à rede existente com um máximo de eficiência e menor custo/benefício, cobrindo uma área de 180 km².

Olea e Davis (1999a) aplicaram a técnica de krigagem para estimar o nível de água em cada poço de observação utilizando o método de validação cruzada. Além disso, eles propuseram a instalação de novos poços de observação com base no desvio padrão da krigagem, já que desvios padrão elevados indicavam áreas de baixa densidade da rede (Olea e Davis, 1999b). A seleção desses locais de poços é direta, sendo teoricamente determinado e confirmado na prática que é suficiente ter um poço em cada hexágono com raio de 4,5 km, dispostos em um padrão hexagonal regular, para alcançar um desvio padrão que satisfatório.

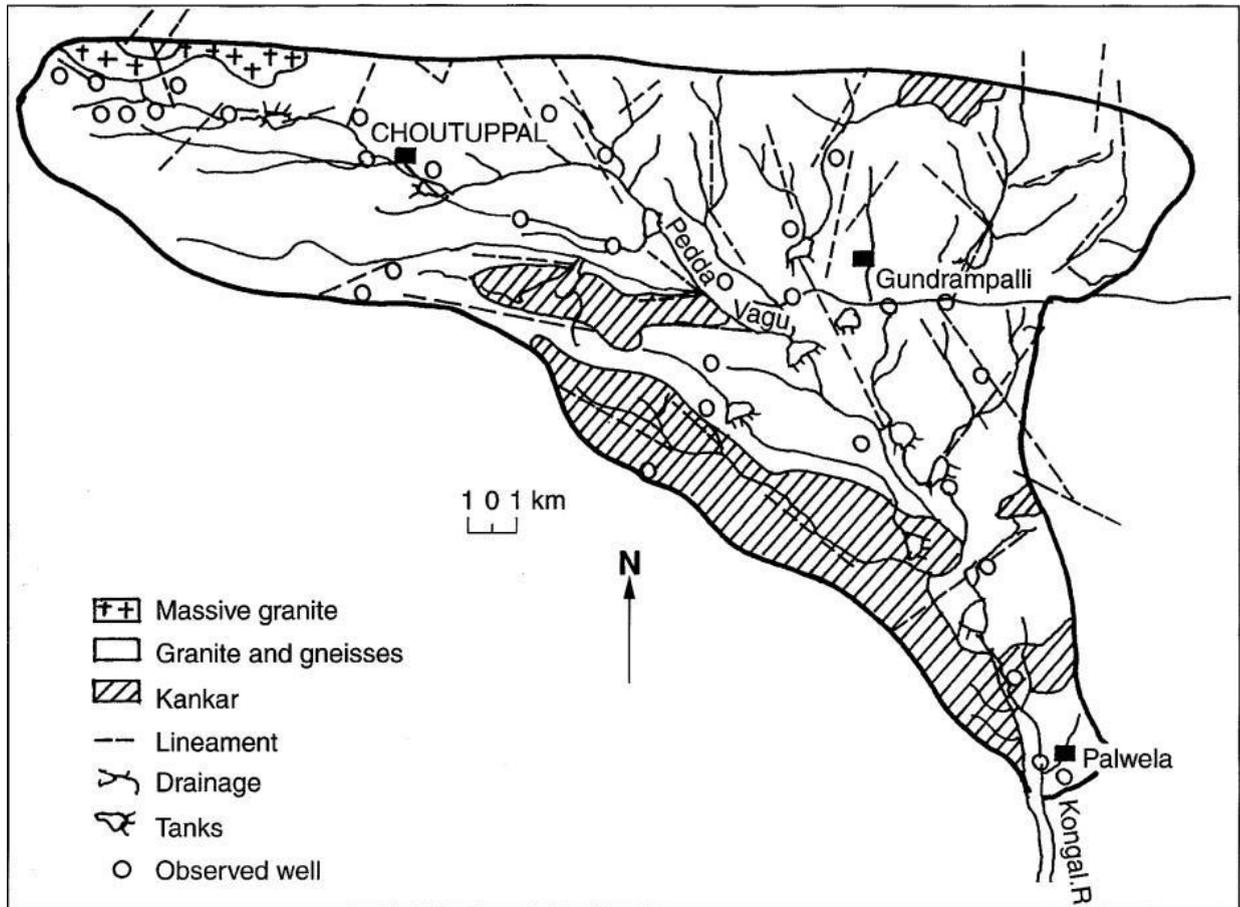


Figura 2: Mapa de localização dos poços de observação já existentes na rede a ser otimizada.

Fonte: Prakash e Singh (2000)

Para Olea (1999) uma vantagem de utilizar o desvio padrão de krigagem como medida de incerteza é que seu valor depende do semivariograma e da configuração espacial dos pontos de observação, e não das medições individuais do nível da água, além disso, esse método pode ser utilizado para avaliar poços já existentes e tomar a decisão de agregá-los ou não à rede de monitoramento.

3.3. Análise Multicriterial

Uma das metodologias utilizadas para a implementação da rede é através da análise multicriterial, segundo Esquivel et al. (2015), o método de processo analítico hierárquico é um dos mais comumente utilizados na gestão de recursos hídricos, pois permite classificar os diversos critérios considerados e ponderá-los com base em sua importância.

Desenvolvido por Saaty (1990), o processo analítico hierárquico é uma ferramenta matemática usada para construir um modelo hierárquico que representa o problema a ser estudado, propondo inicialmente critérios e alternativas, deduzindo posteriormente quais são as melhores alternativas e tomando uma decisão.

No trabalho de Esquivel *et al.* (2015) são utilizados seis fatores e três restrições como os critérios mais influentes no processo de criação de uma rede de monitoramento, sendo eles:

- A diminuição nos níveis d'água dos aquíferos representando mudanças na dinâmica do aquífero que ocorrem principalmente como resultado da exploração intensiva do aquífero.
- O aumento nos níveis d'água subterrânea, sendo esse fator também representativo das mudanças na dinâmica do aquífero.
- A taxa de declínio nos níveis d'água subterrânea por um período de tempo definido, já que áreas com taxas de declínio mais altas são áreas prioritárias de monitoramento, uma vez que o efeito da superexploração do aquífero é refletido de forma mais intensa nessas regiões.
- A malha de poços de extração, sendo o número de poços por unidade de área. Esse fator foi escolhido devido à necessidade de monitorar áreas com alta densidade de poços, uma vez que essas áreas podem apresentar uma característica devido ao conjunto de poços ali instalados e exploração mais intensa.
- O gradiente hidráulico vertical, sendo utilizados para identificar a suscetibilidade de regiões à passagem de poluentes da superfície do solo para a porção mais produtiva do aquífero e também para compreender quais áreas são mais intensamente exploradas e como o gradiente vertical se comporta nessas áreas.
- Fissuras, já que é uma das características de uma exploração intensiva de águas

subterrâneas, podendo afetar a poluição das águas subterrâneas, uma vez que pode atuar como uma rota de fluxo preferencial para poluentes.

- Em contrapartida as três restrições utilizadas são o relevo, corpos d'água ao entorno do aquífero e o seu limite.

Após selecionar os fatores a serem considerados foi necessária uma padronização para obter uma escala comum entre esses, já que possuem diferentes escalas e unidades, usando a lógica *fuzzy* do IDRISI-GIS. O próximo passo foi identificar o peso de cada fator, ou seja, atribuir o valor da importância de um fator em relação a outro em termos da importância ou influência que ele tem em alcançar o objetivo proposto.

O módulo Decision Wizard do IDRISI-GIS foi aplicado para obter os pesos dos fatores a partir de um dos 3 métodos: Pesos iguais, Pesos definidos pelo usuário ou Processo Hierárquico Analítico (AHP, na sigla em inglês). O método AHP foi selecionado por Esquivel *et al.* (2015) e foi aplicado usando o módulo Weight do IDRISI-GIS, que realiza automaticamente comparações em pares. A consistência é calculada para uma matriz de ordem 'n' no método AHP, e se o Índice de Consistência (CI) calculado não atingir o nível de referência necessário, então os pesos são alterados. O CI é obtido com o auxílio da Equação 4:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde λ_{max} é o maior valor próprio e n é a ordem da matriz. A razão de consistência (CR) = CI/RI (RI = matriz aleatória). Para manter a matriz confiável, $CR \leq 0.1$ (Saaty, 2003).

Para finalizar e aplicar a análise multicritério, o método da combinação linear ponderada foi escolhido por com o objetivo de gerar um mapa a partir dos resultados da multiplicação dos fatores pelos pesos e uma segunda multiplicação desses resultados pela restrição (mapas booleanos 0 e 1). Esse método é uma aplicação da técnica de álgebra de mapas, que se baseia em uma série de operações algébricas e lógicas aplicadas a um grupo de dados *raster*, obtendo como resultado a Figura 3:

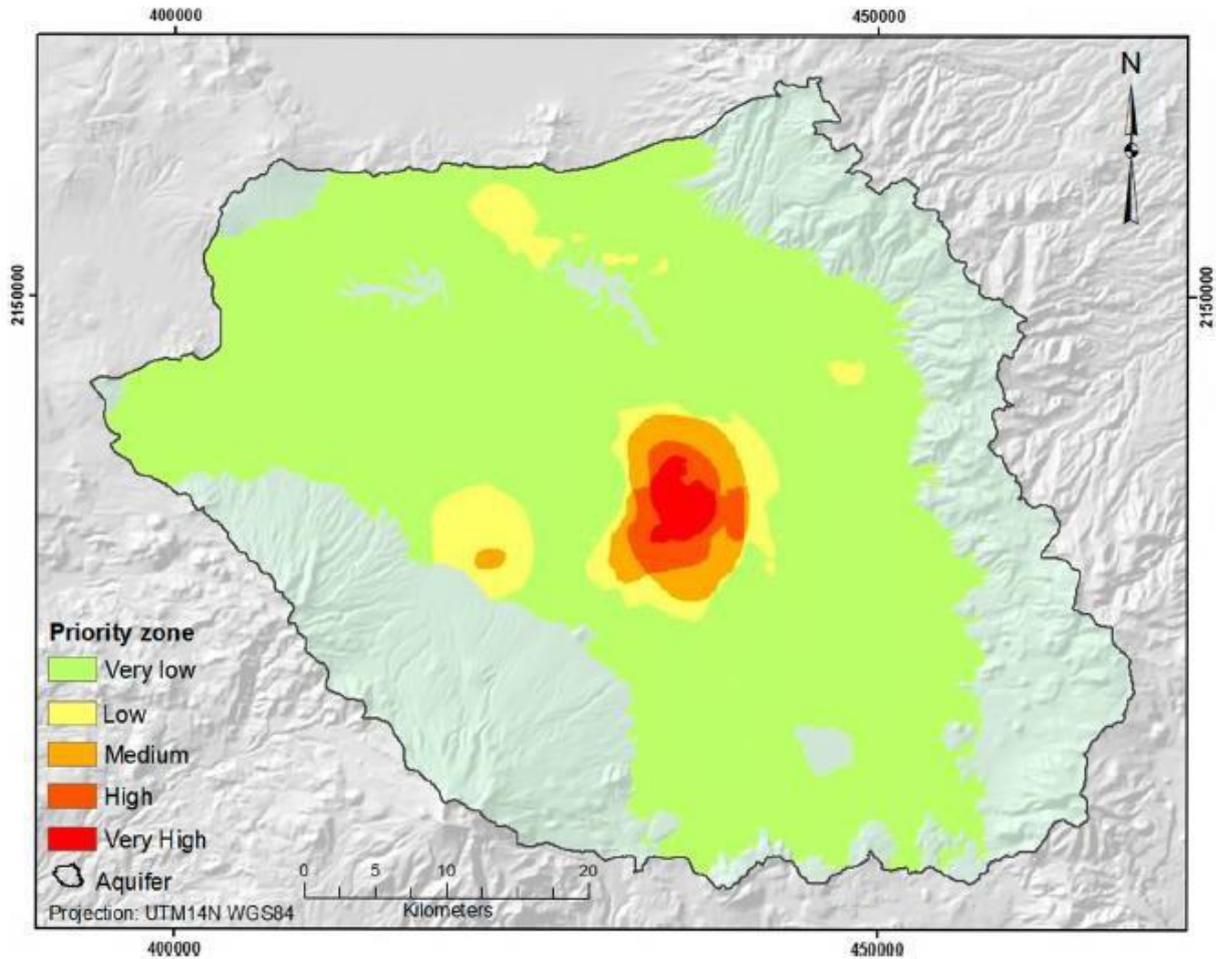


Figura 3: Exemplo de resultado da análise multicritério com auxílio das ferramentas de GIS

Fonte: Esquivel et al. (2015).

Portanto, a análise multicritério com o auxílio de ferramentas GIS auxilia na determinação de áreas que devem ser priorizadas na hora de determinar o número de poços de monitoramento necessários para instalar nessas áreas prioritárias e a frequência das medições de dados, que requer uma abordagem mais específica e detalhada.

3.4. Método de Combinação da Análise Multicritério e Geoestatístico

Singh e Katpatal (2017) propuseram uma abordagem nova e simplificada utilizando análise multicritério (sobreposição ponderada, processo analítico hierárquico, *fuzzy*) e método geoestatístico (krigagem ordinária) para projetar uma rede de monitoramento dos níveis de água subterrânea na sub-bacia do Wainganga, Índia. Para isso, foram considerados parâmetros como geologia, unidade geomorfológica, uso do solo/cobertura do solo, densidade de lineamentos,

flutuação do nível de água subterrânea, recarga, declive e meio do solo.

O estudo de Singh e Katpatal (2017) identifica zonas representativas ou prioritárias usando análise multicritério e determina o número ideal de poços de observação dentro das zonas representativas usando o método geoestatístico, tendo como objetivo superar as limitações de métodos previamente sugeridos, combinando as duas abordagens. O primeiro objetivo é reduzir o número de poços de observação e determinar o número ideal desses, e o segundo objetivo é identificar as localizações espaciais adequadas para tais. A técnica de Análise Multicritério concentra-se em delimitar zonas adequadas para a colocação dos poços de monitoramento, mas não consegue fornecer o número ideal para isto. Por outro lado, as técnicas geoestatísticas fornecem o número ideal de poços de monitoramento, mas não oferecem as localizações espaciais adequadas para a colocação desses.

Portanto, para o projeto de redes de monitoramento de águas subterrâneas, é necessário fornecer simultaneamente tanto o número ideal quanto as localizações espaciais. Para isso Singh e Katpatal (2017) combinaram os métodos de sobreposição ponderada, processo analítico hierárquico - já apresentado anteriormente -, metodologia *fuzzy* e métodos geoestatísticos.

- Sobreposição Ponderada

Na técnica de análise de sobreposição ponderada, todos os parâmetros controladores para selecionar a localização dos poços foram convertidos em camadas *raster*. Cada classe em um *raster* de entrada recebe um peso com base nas contribuições científicas dos parâmetros em relação a fatores hidrogeológicos e antropogênicos que afetam a disponibilidade e a dinâmica das águas subterrâneas. A zona de prioridade foi obtida usando a análise de sobreposição ponderada, utilizando a Equação 5, onde P e w são, respectivamente, os parâmetros e pesos selecionados para localizar os poços.

$$\text{Zona de prioridade} = \sum_{i=1}^n P_i(w_i) \quad (\text{Eq. 5})$$

- *Fuzzy*

A lógica *fuzzy* é útil para modelar as incertezas altas e baixas presentes em diferentes parâmetros hidrológicos e ambientais usando SIG (Singh e Katpatal, 2017), integrando todos os dados temáticos *raster*, e assim demarcar as zonas mais adequadas para localizar os poços de observação na área de estudo. Neste método, os dados temáticos *raster* são transformados em mapas temáticos que, por sua vez, são reclassificados e a eles atribuídos pesos. Na análise de sobreposição *fuzzy*, valores de pertinência são atribuídos a cada parâmetro transformado para uma escala comum que varia de 0 a 1, indicando altas ou baixas incertezas. O algoritmo de pertinência *fuzzy* (MSSmall) calcula a pertinência com base na média e no desvio padrão dos parâmetros de entrada. Na análise de Singh e Katpatal (2017), todos os nove parâmetros foram combinados usando o operador Fuzzy GAMMA no software ArcGIS.

- Método Geoestatístico

O método geoestatístico foi utilizado para selecionar o número de poços de observação para a área de estudo. Na geoestatística, o krigging ordinário foi utilizado para a análise, assumindo-se que a média da variável regionalizada é constante em toda a área de interesse.

As localizações para adicionar os poços de observação foram identificadas considerando toda a heterogeneidade e os parâmetros de incerteza associados aos recursos de água subterrânea. As zonas prioritárias foram obtidas a partir dos mapas temáticos obtidos de acordo com os nove parâmetros escolhidos pelo autor.

Sendo assim, o trabalho de Singh e Katpatal (2017) propõe três etapas para otimizar as redes de poços de monitoramento. A primeira etapa compreende a coleta de dados brutos a serem analisados, processados, georreferenciados e convertidos em camadas *raster*. Na segunda etapa, ocorre a criação e integração de todos os mapas temáticos no *software* ArcGIS usando sobreposição ponderada, AHP e métodos Fuzzy para demarcar as zonas prioritárias. Na última etapa, o método geoestatístico é aplicado para obter o número de poços de monitoramento.

Já partir da segunda etapa, são obtidas zonas prioritárias e em cada zona são adicionados poços de observação aos já existentes. Para esse trabalho foi considerado um valor limite de erro padrão menor que 1, que foi calculado para cada uma das redes de poços e várias combinações de tentativas foram realizadas para cada método (sobreposição ponderada, AHP e Fuzzy), e esse procedimento é repetido até que o erro padrão diminua para 1. O número de poços dentro de todas as zonas prioritárias é obtido e a rede resultante dos três métodos com o menor número de poços é selecionada como rede de monitoramento otimizada para a área.

4. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Nesse momento será apresentado uma série de redes de monitoramento em países ao redor do mundo e após isso uma discussão acerca da rede de monitoramento no Aquífero Urucua.

A escolha dos países a serem utilizados foi baseada no trabalho realizado pela IGRAC (*International Groundwater Resources Assessment Centre*) em 2008 com o objetivo de realizar um inventário das redes de monitoramento no mundo. Esse trabalho categorizou essas redes em insignificantes, insuficientes, regulares e boas de acordo com cada um dos fundamentos, sendo eles: densidade de poços, frequência de medição, informações sobre a qualidade da água e uso dos dados.

As redes descritadas nesta parte do trabalho foram enquadradas majoritariamente nesses fundamentos como redes de monitoramento boas, além disso foi possível observar que a rede de monitoramento do Brasil foi enquadrada como insuficiente para todos os parâmetros, mas vale ressaltar que o projeto de implementação operado pela CPRM foi iniciado somente em 2009.

4.1. Exemplos de Redes de Monitoramento ao Redor do Mundo

- **Coreia do Sul**

Com as tendências crescentes no uso da água subterrânea, a Coreia do Sul esbarrou em diversos problemas como: uma diminuição significativa no nível da água subterrânea, contaminação da água subterrânea e subsidência do solo (Lee e Kwon, 2016). Para enfrentar esses problemas, o governo sul coreano implementou leis e regulamentações que obrigam os ministérios do governo a monitorar a quantidade e qualidade da água subterrânea.

Atualmente, existem seis redes de monitoramento de água subterrânea operadas e gerenciadas por organizações governamentais para diferentes propósitos que são descritas por Lee e Kwon (2016), sendo elas:

➤ Rede Nacional de Monitoramento de Águas Subterrâneas

A Rede Nacional de Monitoramento de Águas Subterrâneas é a principal rede de monitoramento de águas subterrâneas na Coreia, essa contava com 402 poços até 2015 e o governo sul coreano tinha como meta ter mais 530 poços instalados até o ano de 2021, que são distribuídos em todo o país com uma densidade espacial igual de estações, levando em consideração a geologia local. Cada estação conta com dois poços de monitoramento, um para águas subterrâneas rasas em depósitos aluviais e/ou sedimentos inconsolidados e o outro para águas subterrâneas profundas em aquíferos. Esse duplo monitoramento é um procedimento interessante e relativamente simples com o qual o Brasil não conta.

As profundidades médias dos poços são de 20 metros para águas subterrâneas rasas e 70 metros para águas subterrâneas profundas, e cada poço de monitoramento é equipado com um registrador automático de dados que mede o nível da água, a temperatura da água e a condutividade elétrica a cada hora.

Os dados medidos são transmitidos automaticamente em tempo real para um sistema de coleta de dados, por meio de telecomunicação sem fio, sendo disponibilizados em tempo real ao público por meio de um site (www.gims.go.kr)

➤ Rede de Monitoramento da Qualidade das Águas Subterrâneas

A qualidade das águas subterrâneas é controlada pelo Ministério do Meio Ambiente da Coreia do Sul. O ministério e os governos provinciais monitoram a qualidade das águas subterrâneas por meio da rede desde 1996, sendo assim é dividida em nacional, que é instalada e operada pelo governo central e suas organizações afiliadas, e local, governada pelos governos provinciais.

A Rede de Monitoramento da Qualidade das Águas Subterrâneas Nacional monitora a qualidade da água em áreas limpas mas também observa as áreas suscetíveis à contaminação, utilizando poços de águas subterrâneas já instalados em duas regiões separadas: regiões residenciais e agrícolas, e regiões industriais, de aterro sanitário e de mineração. Os resultados da análise são reportados e os dados estão disponíveis ao público por meio de um site (sgis.nier.go.kr) gerenciado pelo Instituto Nacional de Pesquisa Ambiental.

➤ Rede de Monitoramento de Intrusão de Água do Mar

O uso excessivo de águas subterrâneas para agricultura e o aumento do nível do mar resultaram em intrusão de água do mar em aquíferos costeiros. Cada estação possui de um a três poços de monitoramento, dispostos perpendicularmente à linha costeira, e cada poço é equipado com um registrador automático de dados, painéis de energia solar e um terminal de telecomunicações sem fio.

As sondas conectadas ao registrador de dados medem o nível da água subterrânea, condutividade elétrica e temperatura da água a cada hora. Os dados medidos são transmitidos automaticamente em tempo real para um servidor central da Coreia do Sul e o público pode acessar os dados de monitoramento pela internet (www.groundwater.or.kr).

Enquanto o sistema de monitoramento automático coleta dados a cada hora, um registro vertical completo de condutividade elétrica e temperatura da água e uma análise da qualidade da água subterrânea são realizados pelo menos uma vez por ano, a partir dos registros, qualquer avanço da intrusão de água do mar ou potencial avanço da interface água do mar-água doce é avaliado.

➤ Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas Rurais

Com o aumento do uso agrícola de águas subterrâneas, esta rede foi criada para monitorar as mudanças nas águas subterrâneas afetadas pelas atividades agrícolas. O nível, a temperatura e a condutividade elétrica da água subterrânea são medidas a cada hora usando sondas submersas, e registros verticais de temperatura da água, condutividade elétrica e análises químicas da água subterrânea são realizados anualmente. Os dados medidos a cada hora são automaticamente enviados para o servidor de dados da Coreia do Sul e estão disponíveis ao público. Há também a análise química que examina os níveis de íons principais, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} e NO_3^- , para que seja possível uma adequação da água subterrânea para uso agrícola (campos de arroz e horticultura).

➤ Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas Subsidiárias ou Locais

Utilizada para preencher as lacunas nos poços de monitoramento atuais da Rede Nacional de Monitoramento de Águas Subterrâneas que estão esparsamente distribuídos pelo país. Os governos locais são obrigados a estabelecer poços de monitoramento de águas subterrâneas auxiliares, utilizando poços existentes ou instalando novos poços para verificar as mudanças no nível da água subterrânea. O nível da água subterrânea deve ser medido manualmente ou automaticamente pelo menos uma vez por mês.

➤ Rede de Monitoramento de Água Potável (Água Subterrânea)

Toda a água engarrafada comercial tem origem em águas subterrâneas, pois a venda de águas engarrafadas provenientes de águas superficiais (rios) é estritamente proibida na Coreia do Sul de acordo com as leis pertinentes (Lee e Kwon, 2016).

As empresas de água engarrafada devem realizar monitoramento do nível da água subterrânea, taxa de captação, condutividade elétrica, temperatura da água e pH com sensores automáticos a cada hora para cada poço de produção. Todo mês, eles também devem enviar os dados de monitoramento ao governo central e/ou local responsável, porém ao contrário das demais, os dados não estão disponíveis para o público porque os poços de produção são propriedades privadas. As reclamações cíveis contra as empresas de água engarrafada estão aumentando devido à preocupação com a depleção das águas subterrâneas devido aos poços de produção.

- **Dinamarca**

O Programa de Monitoramento de Águas Subterrâneas da Dinamarca (Figura 4) compreende uma rede de 74 áreas de captação de poços, dedicadas ao monitoramento, espalhadas de forma quase uniforme por toda a Dinamarca. As áreas variam de tamanho de cinco a 50 km² e cada uma contém até 25 poços de monitoramento, que são estabelecidos, na medida do possível, para permitir a vigilância da qualidade da água nos aquíferos primários e secundários (Jørgensen e Stockmarr, 2008).

No momento do estabelecimento, cada área foi delimitada com base na área de captação de um poço de abastecimento central de água subterrânea para produção de água potável. No entanto, o monitoramento de águas subterrâneas continuou na maioria das áreas para acompanhar as mudanças na qualidade da água subterrânea. A extensão conhecida das áreas de recarga foi ajustada nos últimos 10 anos como resultado de estudos locais de modelagem, resultando no fechamento de alguns poços e estabelecimento de novos (Jørgensen e Stockmarr, 2008). Como as águas subterrâneas rasas pareciam estar sub-representadas no programa, novos poços rasos foram recentemente estabelecidos para monitorar águas subterrâneas mais rasas que recarregam para aquíferos mais profundos.

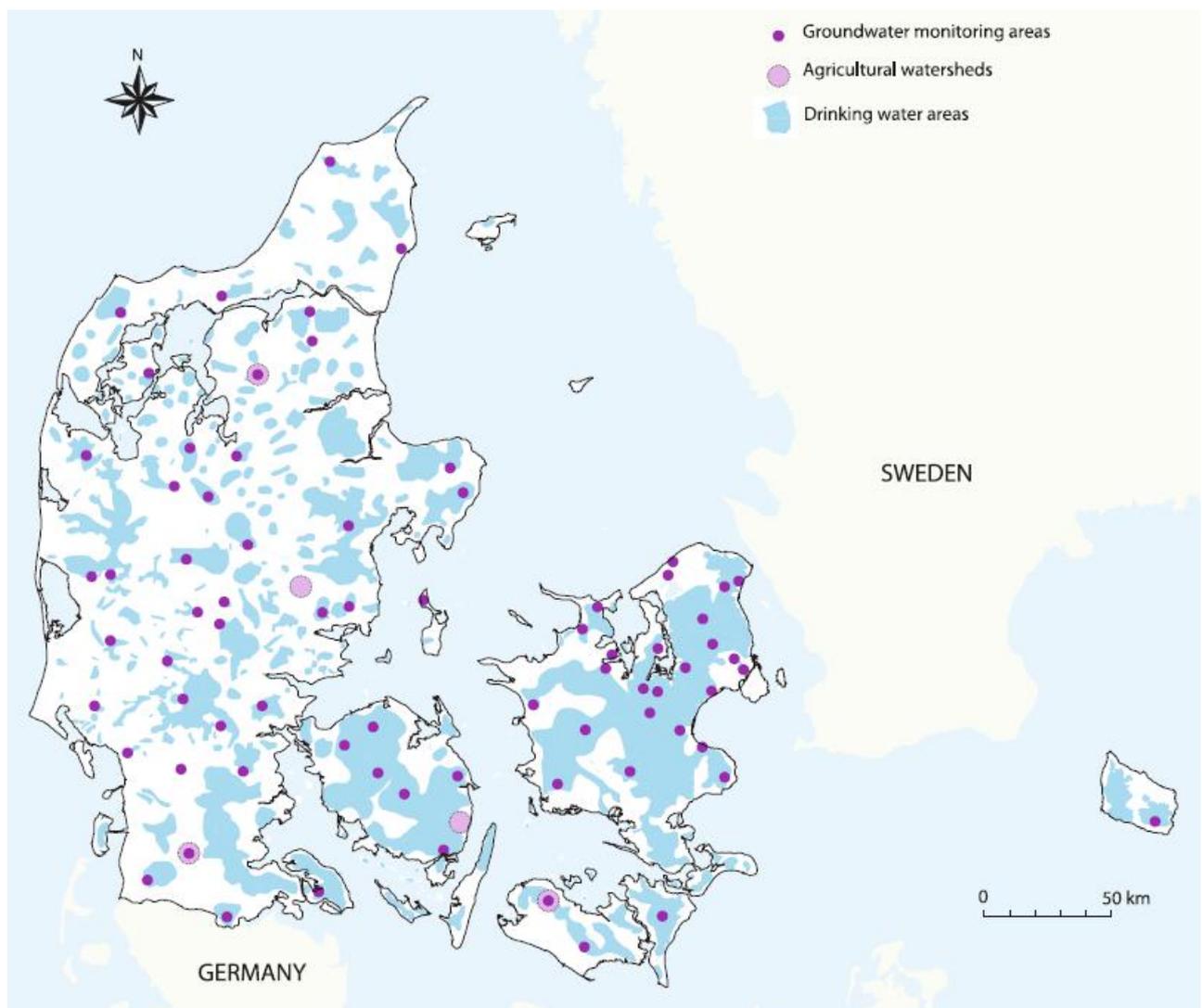


Figura 4: Mapa de localização das áreas de monitoramento de águas subterrâneas.

Fonte: Jørgensen e Stockmarr (2008)

A maioria dos poços é amostrada anualmente e alguns várias vezes ao ano, sendo os parâmetros analisados agrupados em componentes principais (como cloreto, nitrato, sulfato, amônia e ferro), elementos traços inorgânicos (por exemplo, arsênio, cobre e níquel), micropoluentes orgânicos (por exemplo, hidrocarbonetos aromáticos, solventes clorados e fenóis) e pesticidas.

O monitoramento quantitativo era, até recentemente, realizado em uma rede nacional composta por 60 poços piezométricos fora das áreas de monitoramento de águas subterrâneas, porém atualmente a maioria das áreas de monitoramento possui um ou mais poços de monitoramento do nível das águas subterrâneas. Uma nova rede nacional quantitativa para a Dinamarca está atualmente em fase de estabelecimento, com base na delimitação dos aquíferos segundo Jørgensen e Stockmarr (2008).

- **Alemanha**

A Agência Ambiental da Baviera, segundo a IGRAC (*International Groundwater Resources Assessment Centre*), opera uma rede de monitoramento de cerca de 3000 poços de monitoramento de águas subterrâneas, sendo composta pela rede básica (620 poços), pela rede de compactação (341 poços) e por redes regionais (2.063 poços), sendo equipada com instrumentos de registro contínuo para coletar os dados de águas subterrâneas.

A rede básica concentra-se em aquíferos suprarregionais e representativos, com grande importância para o gerenciamento de águas e são equipadas com dispositivos de transmissão remota de dados. A rede de compactação complementa o trabalho da rede básica, que geralmente é usada para tarefas hidrogeológicas por um período limitado ou apenas em determinados momentos. As redes regionais são estabelecidas para investigações de águas subterrâneas em pequena escala, principalmente por um período limitado. A profundidade dos locais de monitoramento varia de 2 m a 1400 m.

O governo oferece um site, chamado NID, para consulta dos dados de águas subterrâneas de locais de monitoramento selecionados ao público e a vários usuários, são fornecidos mapas de visão geral com uma classificação diária das águas subterrâneas de cada local de monitoramento localizado em aquíferos rasos ou mais profundos. Essas informações também estão disponíveis em formato de tabela em que são apresentadas séries temporais dos níveis de águas subterrâneas para todo o período de monitoramento.

Os valores de cada poço são classificados em novo valor mais baixo (ou nível), muito baixo, baixo, sem variação de nível, sem classificação e sem dados atuais. Esse modelo de classificação é baseado em uma análise estatística dos dados disponíveis, que é realizada apenas em pontos de medição com mais de 5 anos de dados disponíveis. Os limites estatísticos são calculados para um período móvel de 31 dias, levando em conta as variações naturais sazonais nos níveis de água.

- **Estados Unidos**

O objetivo da Rede Nacional de Monitoramento de Águas Subterrâneas (Figura 5) é fornecer informações necessárias para o planejamento, gerenciamento e desenvolvimento de suprimentos de água subterrânea para atender às necessidades atuais e futuras de água e requisitos ecossistêmicos. Para isso, é necessária a combinação de dados de águas subterrâneas adequados de organizações locais, estaduais e federais, de forma que os dados sejam comparáveis e possam ser incluídos em uma rede nacional consistente, tendo a sua escala da rede concentrada nos aquíferos principais dos Estados Unidos.

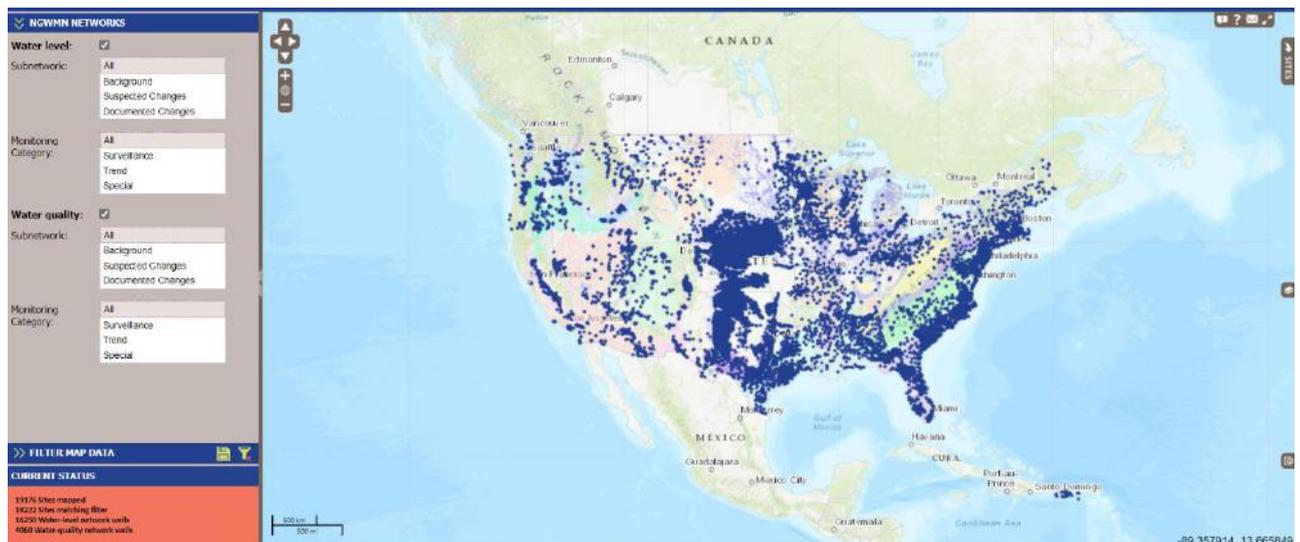


Figura 5: Mapa com a distribuição dos poços de monitoramento nos Estados Unidos.

Fonte: USGS

A rede é composta por poços selecionados de redes de monitoramento de águas subterrâneas federais, multiestaduais, estaduais, tribais e locais existentes. Para suportar a Rede Nacional de Monitoramento de Águas Subterrâneas existem sub-redes de classificação de poços e categorias de monitoramento, segundo a USGS, que são:

- Sub-rede de Fundo: pontos de monitoramento que fornecem dados de aquíferos com efeitos antropogênicos nulos ou mínimos, e espera-se que continuem assim.
- Sub-rede de Mudanças Suspeitas: pontos de monitoramento que fornecem dados de aquíferos que podem ter sido afetados pela atividade humana, mas que não estão documentados ou conclusivos, podendo ser áreas onde ocorrem extrações ou onde houve mudanças no uso do solo, mas o efeito ainda não foi claramente identificado.
- Sub-rede de Mudanças Documentadas: pontos de monitoramento que fornecem dados de aquíferos que têm efeitos antropogênicos documentados, como serem conhecidos por serem bombeados intensivamente, ter passado por mudanças substanciais no uso do solo que alteram a recarga, ter recursos de água subterrânea gerenciados e ter qualidade da água degradada ou níveis de água em declínio.

Para classificar as áreas e os poços novos são utilizados cinco anos de monitoramento inicial para estabelecer essas condições e assim enquadrá-los em uma das sub-redes mencionadas acima. Para poços existentes, dados passados podem ser usados para categorizar os poços em uma das sub-redes. Para cada poço dentro de cada sub-rede são atribuídos uma categoria de monitoramento que foi determinada pela USGS, dependendo do objetivo do monitoramento no poço, sendo essas informações essenciais para determinar as frequências de monitoramento a serem sugeridas.

- Poços de Monitoramento de Tendências (*Trend*): são geralmente monitorados para determinar mudanças ao longo do tempo, sendo assim a frequência de monitoramento depende das condições hidrológicas do aquífero e pode variar desde dados diários até medições anuais. Além disso, são os principais poços da Rede Nacional de Monitoramento de Águas Subterrâneas.

- Poços de Monitoramento de Vigilância (*Surveillance*): são usados em conjunto com o monitoramento de tendência para relatar periodicamente as condições gerais de nível de água e qualidade da água dos recursos hídricos subterrâneos nacionais, assim tem uma frequência muito menor.
- Poços para Estudos Especiais: são um aspecto secundário, não sendo obrigatório e fornecido apenas como uma opção, geralmente estão associados às Sub-redes de Mudanças Suspeitas ou Mudanças Documentadas e são usados para avaliar o status dos recursos de água subterrânea em risco ou potencialmente em risco de esgotamento ou deterioração. Essa classificação é um indicativo de que informações adicionais podem estar disponíveis.

4.2. Rede de Monitoramento no Brasil e no Aquífero Urucua

4.2.1. Contextualização sobre o cenário de monitoramento no Brasil

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) diante da necessidade de ampliação do conhecimento hidrogeológico coordena e opera a rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas em nível nacional.

A rede de monitoramento proposta é de natureza fundamentalmente quantitativa, ou seja, tem o propósito de registrar as variações de nível d'água. Não há a informação precisa de qual é a frequência com que os dados são coletados, apenas é informado de que há instrumentos que permitem o registro automático do nível d'água (NA) instalados nos poços de observação e que periodicamente é feita a coleta dos dados armazenados, os quais, posteriormente, são disponibilizados para consulta e download na página [SGB - Serviço Geológico do Brasil - RimasWeb](https://rimasweb.sgb.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php?rimas=true) (https://rimasweb.sgb.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php?rimas=true).

Devido à variedade hidrogeológica do país, além das dificuldades econômicas, foram adotados critérios de priorização dos aquíferos a serem monitorados sendo então, segundo a CPRM:

1. Aquíferos sedimentares;
2. Importância socioeconômica da água;
3. Uso da água para abastecimento público;
4. Aspectos de vulnerabilidade natural e riscos;
5. Representatividade espacial do aquífero; e
6. Existência de poços para monitoramento.

Apesar da rede ser projetada com apenas um viés quantitativo, há um sistema de alerta e controle de qualidade com medições anuais da condutividade elétrica, pH, potencial de oxirredução, que além disso, na instalação do poço de observação e a cada cinco anos são feitas coletas para análises físico-químicas completas conforme as condições de uso e ocupação dos terrenos nas imediações da estação.

O programa da rede de monitoramento da CPRM é composto de poços existentes, que foram cedidos, e poços construídos visando uma distribuição e densidade suficientes para obtenção de dados representativos das condições hidrogeológicas. O projeto RIMAS foi iniciado em 2009 e atualmente conta com dados de monitoramento, segundo a própria CPRM, de aproximadamente 400 poços distribuídos pelo território nacional.

4.2.2. **Localização da área de estudo**

A partir da participação da autora em estudo constituído por um conjunto de projetos colaborativos desenvolvidos por pesquisadores e técnicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal de Viçosa (UFV), da Associação dos Agricultores e Irrigantes da Bahia (Aiba), do Governo do Estado da Bahia através da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (Sema), Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Inema), Secretaria da Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura (Seagri), Secretaria de Infraestrutura Hídrica e Saneamento (SIHS), do Instituto Water for Food da Universidade do Nebraska (DWFI/UNL), USA e outros parceiros foi escolhido o Sistema Aquífero Urucuia como área de estudo.

Os projetos foram financiados com recursos do Programa para o Desenvolvimento da Agropecuária (Prodeagro) para permitir a mensuração da disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas, a análise da mudança do uso do solo no Oeste da Bahia visando o aprimoramento da gestão dos recursos hídricos e contribuir para o desenvolvimento socioeconômico regional e para o uso sustentável da água.

O Sistema Aquífero Urucuia, de cerca de 126.468 km², ocorre predominantemente na região do oeste do estado da Bahia, estendendo-se desde o extremo sul do Maranhão e Piauí, até o extremo noroeste de Minas Gerais (Figura 6). Seus limites são demarcados a oeste pelo limite da Serra Geral de Goiás, e, a leste na altura das sedes dos municípios de Barreiras (BA), Correntina (BA), Cocos (BA), Formosa do Rio Preto (BA) e Gilbués (PI) (Gaspar e Campos, 2007).

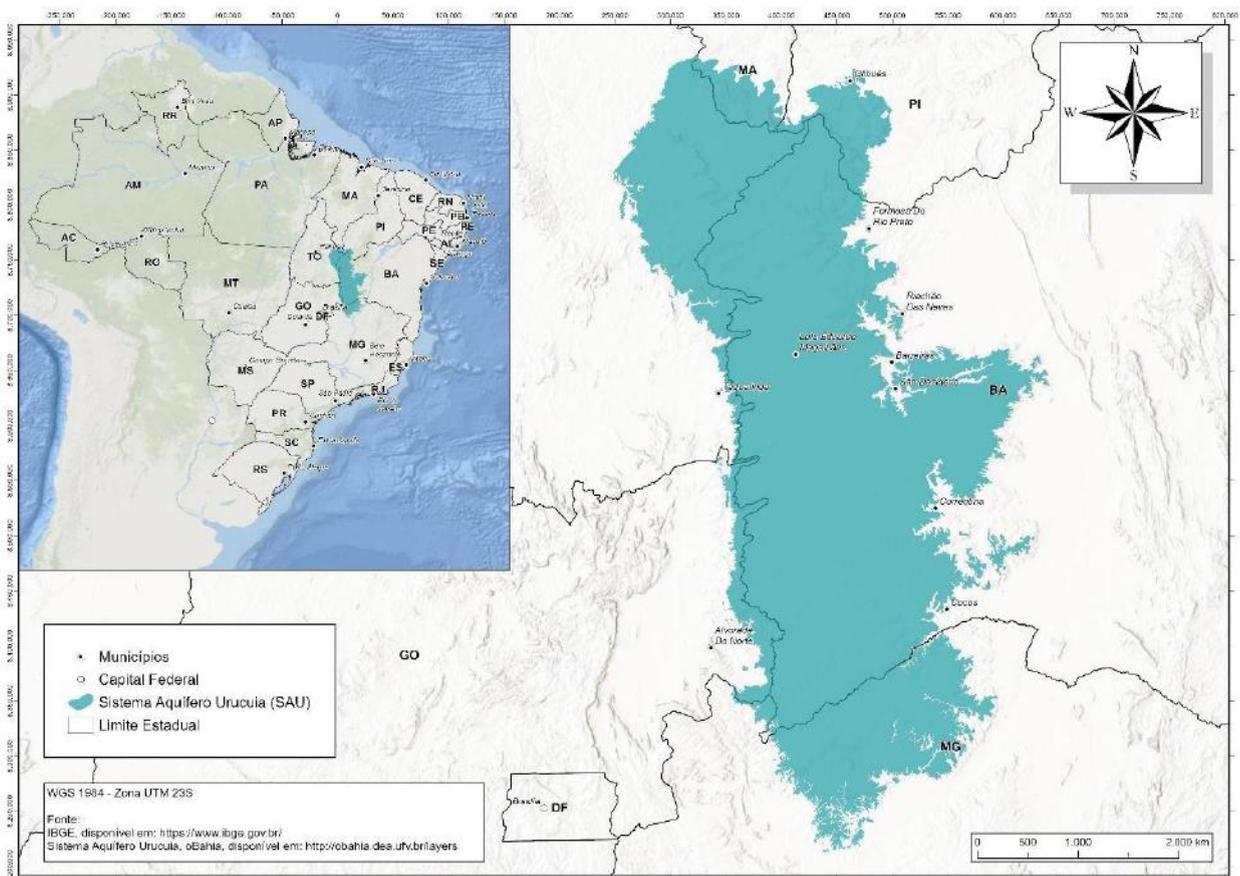


Figura 6: Localização do Sistema Aquífero Urucuia (SAU)

Dentro dessa região destaca-se o oeste da Bahia, que se tornou uma importante fronteira agrícola para o Brasil com o avanço de áreas de cultivo de monoculturas. Sendo assim, a expansão mencionada, juntamente com as estações climáticas secas e úmidas bem definidas, resultou em uma grande demanda por recursos hídricos na região, principalmente para fins de irrigação.

Isso tem levado a um aumento significativo nos pedidos de outorga para o uso de águas superficiais e subterrâneas, uma vez que esses recursos são abundantes nessa área. No entanto, devido à baixa densidade de rios no oeste da Bahia (Gaspar, 2006), muitos desses rios já alcançaram o limite máximo permitido para outorga, direcionando assim a concessão de outorgas na região principalmente para a extração de águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia (SAU) nas últimas décadas.

Com isso, o Sistema Aquífero Urucuia tem uma importância estratégica para o desenvolvimento da região em que está inserido, exigindo uma boa gestão para evitar conflitos decorrentes de uma possível superexploração dos recursos hídricos, somado a um contexto de mudanças climáticas e do uso e cobertura do solo, afetando áreas de recarga do aquífero.

4.2.3. **Caracterização Hidrogeológica**

O termo Sistema Aquífero Urucuia (SAU), cunhado por Gaspar (2006), é proposto como denominação para o conjunto de aquíferos que ocorrem no domínio do Grupo Urucuia, que se encontra na província hidrogeológica São Francisco, composto por uma unidade geológica sedimentar. O SAU, caracterizado como um sistema do tipo granular em forma de um tabuleiro, é composto predominantemente por quartzo-arenitos e arenitos feldspáticos eólicos, bem selecionados, com presença de níveis silicificados conglomeráticos.

A área efetiva do Sistema Aquífero Urucuia no oeste da Bahia (SAU-BA), com cerca de 82.000 km² (ANA, 2017), que corresponde à área a qual a unidade aquífera desempenha as funções de armazenar, regular e filtrar a água.

Sendo assim, apesar do SAU-BA estender-se pela área das rochas do Grupo Urucuia, a sua área efetiva é relativamente menor que a unidade geológica (Gaspar e Campos, 2007).

A recarga do aquífero ocorre através das chuvas que ocorrem principalmente entre os meses de dezembro e fevereiro, gerando a infiltração da água precipitada no solo, percolando até atingir a zona saturada na forma de recarga (Figura 7). O oeste da Bahia possui características geomorfológicas com extensas regiões de chapadas nas quais ocorre a recarga e vales escavados em que ocorre a descarga para os rios.

O SAU-BA pode ser dividido em diferentes regiões, cada uma com características distintas de aquífero. Essas subdivisões incluem aquífero livre regional, aquífero suspenso local, aquífero semiconfinado ou confinado, devido à presença de camadas silicificadas da Formação Serra das Araras, e aquífero livre profundo (Gaspar & Campos, 2007). O SAU-BA apresenta um eixo divisor do fluxo com direção de norte a sul, localizado a oeste, próximo ao limite estadual da Bahia. Esse eixo é responsável por drenar o fluxo subterrâneo em direção à bacia do rio Tocantins, a oeste do eixo divisor, e para a bacia do rio São Francisco, a leste do eixo, assim ocasionando em uma assimetria entre as bacias hidrográficas e hidrogeológicas.

Gaspar e Campos (2007) delimitaram o posicionamento aproximado desse eixo divisor de fluxo com base nas informações dos levantamentos geofísicos feitos por Amorim Junior (2003), e também a partir da observação dos níveis estáticos dos poços cadastrados na região (Figura 5).

A espessura do Aquífero Urucuia é um objeto de estudo ainda controverso, isso porque há diversos estudos que apontam para resultados distintos. Estudos anteriores, como Gaspar (2006) e Amorim Jr e Lima (2007) utilizando de técnicas geofísicas de sondagem eletromagnética no domínio do tempo (TDEM), encontraram espessuras variando de oeste a leste de 600 metros a 50 metros e 450 metros a pouco mais de 100 metros, respectivamente.

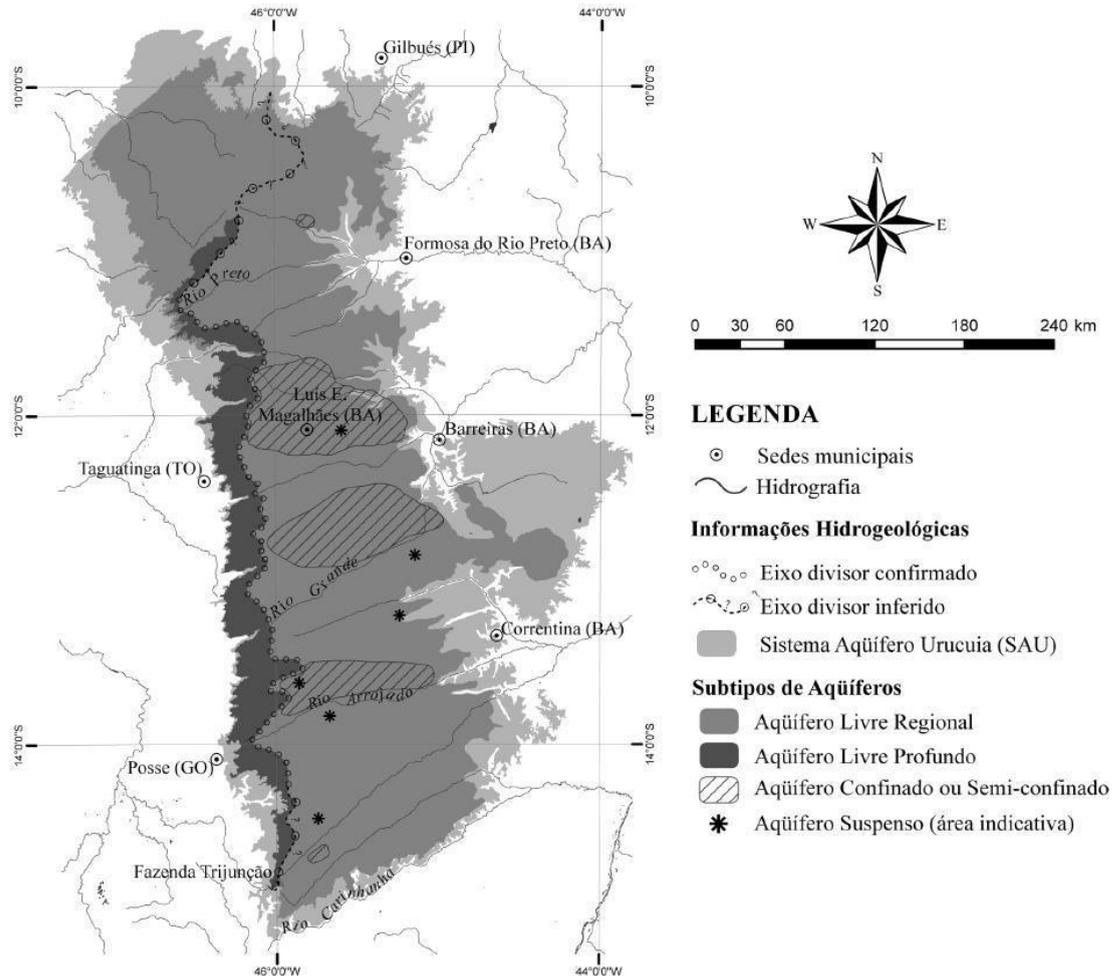


Figura 7: Figura representativa dos subtipos de aquíferos e do eixo divisor de fluxo subterrâneo no Sistema Aquífero Urucuia. Fonte: Gaspar e Campos (2007).

Chang e Silva (2015), chegaram ao resultado de uma espessura máxima na ordem de 350 metros para o SAU através das análises de sucessões sedimentares com base na identificação e correlação de fácies geofísicas, indicando que estudos anteriores foram induzidos ao erro pela incorporação à espessura do SAU das formações Motuca e Sambaíba da Bacia do Parnaíba, presentes no embasamento da Bacia Sanfranciscana. ANA (2017) utilizou dados de TDEM e sondagem elétrica vertical (SEV), resultando em espessuras variando na ordem de 50 metros a 350 metros. Ainda nesse mesmo estudo, é citado que foram perfurados poços estratigráficos pela CPRM e coletados dados da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), disponibilizado na 12ª Rodada de Licitações de Petróleo e Gás (2013), indicando espessuras de cerca de 600 metros para o Grupo Urucuia entre as cidades de Luís Eduardo Magalhães e Barreiras. Sendo assim, a espessura mínima e máxima do Sistema Aquífero Urucuia ainda é um tópico de discussão.

De modo geral, a condutividade hidráulica varia entre 10^{-7} a 10^{-4} m/s em regiões com característica de aquífero livre e 10^{-6} a 10^{-4} m/s em regiões de aquífero confinado. Em relação à transmissividade a mesma é de 10^{-3} a 10^{-2} m²/s no aquífero confinado e 10^{-5} a 10^{-2} em regiões de aquífero freático. O coeficiente de armazenamento está na ordem de 10^{-4} para o aquífero confinado e 10^{-1} para o aquífero livre (Gaspar & Campos, 2007). Já a disponibilidade hídrica, estimada pelo estudo da ANA (2017), é de um reserva explorável para o SAU na ordem de 4,84 km³/ano.

4.2.4. Proposta de Revisão da Rede de Monitoramento do Aquífero Urucuia

Devido à extrema importância do aquífero Urucuia na região foram realizados estudos que visam estabelecer critérios específicos para a perfuração de poços no domínio do SAU na Bahia, levando em conta aspectos como vazão e tempo de bombeamento dos poços, distância entre poços e distância do poço para um corpo hídrico superficial que resultaram na Instrução Normativa N° 15 de 2010 do Instituto de Gestão das Águas e Clima da Bahia – INGÁ, que foi atualizada pelo Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia – INEMA para a Instrução Normativa N° 3, de 2022.

A Instrução Normativa n° 3 discorre sobre procedimentos administrativos e critérios técnicos de tamponamento de poços, monitoramento e outorga para fins de exploração além da autorização para perfuração de poços localizados no Sistema Aquífero Urucuia no estado da Bahia, levando em conta aspectos como a vazão de bombeamento, distância entre poços e distância do poço para um corpo hídrico superficial.

Em comparação com a IN 15 observa-se que algumas limitações foram atenuadas, como a falta de avaliação da influência do bombeamento das águas subterrâneas nos rios, sendo assim, com essa flexibilização, são necessárias melhorias contínuas e implementação de ferramentas de suporte para uma melhor análise e tomada de decisão para concessão de outorgas no SAU. Ou seja, uma rede de monitoramento estruturada é essencial a fim de garantir a sustentabilidade a longo prazo das águas subterrâneas, além de auxiliar em uma melhor gestão dos recursos hídricos no oeste da Bahia, evitando conflitos pelo uso da água e promovendo melhorias contínuas na legislação.

Essa rede de monitoramento se mostra insuficiente para uma área com tal importância para o desenvolvimento da região, considerando a baixa densidade de poços para a região como todo, uma densidade de 0,0005 poços/km² se considerada toda a sua extensão e de 0,0008 poços/km² se considerada somente a sua área efetiva.

Soma-se à irrisória densidade de poços, a baixa qualidade dos dados disponibilizados como resultado da rede de monitoramento, como demonstrado na Figura 9, onde pode ser observada a falta de dados por longos períodos de tempo, além da ausência de dados desde a data de 11/02/2022, completando mais de 1 ano e meio de falta de informação essencial para o conhecimento acerca do comportamento do aquífero naquela localização.

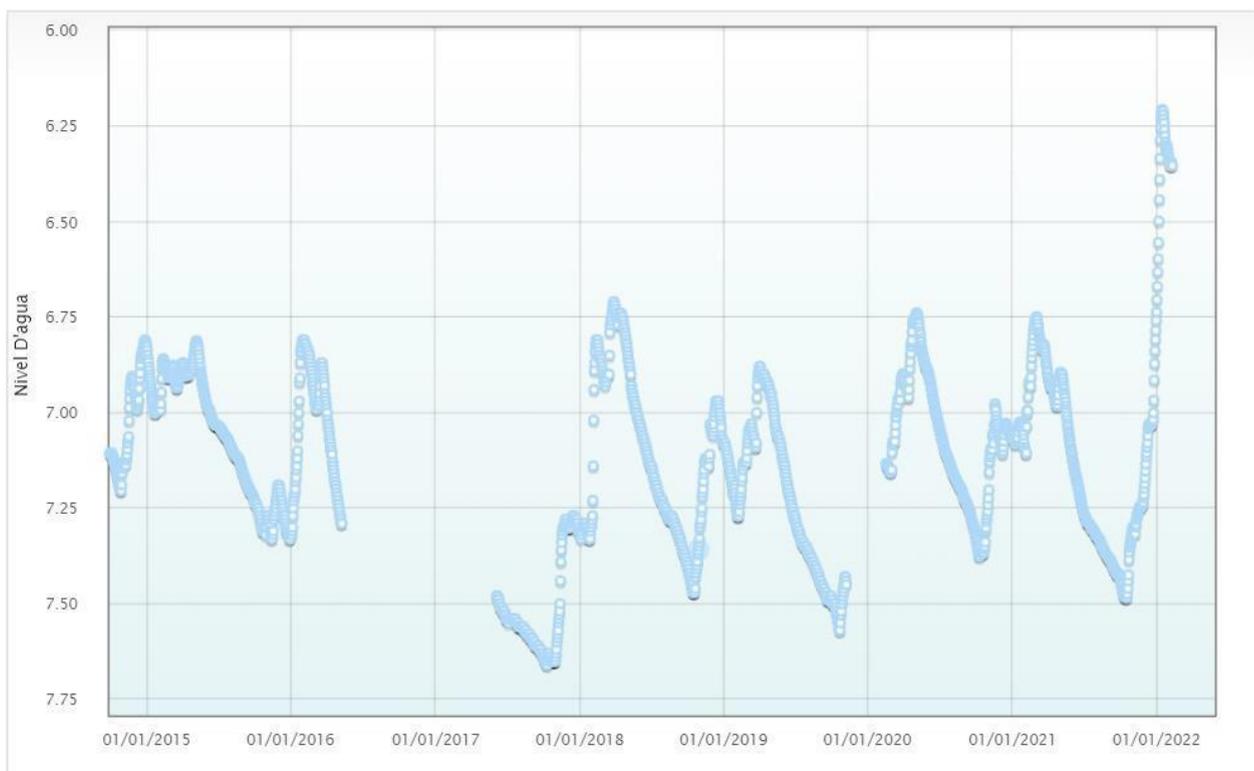


Figura 9: Gráfico de variação do nível d'água ao longo do tempo do poço de monitoramento localizado na Fazenda Durr I / Zuttion. Fonte: CPRM

Corroborando com a ideia de que são dados de extrema importância, Eger *et al.* (2021) em seu estudo que tinha como principais objetivos avaliar possíveis alterações na capacidade de infiltração causadas por mudanças no uso e cobertura da terra, e estimar as taxas de recarga na região do SAU, através de testes de infiltrômetro para verificar a capacidade de infiltração dos solos, do método *Water Table Fluctuation* (WTF) e da utilização do modelo SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) para estimar a recarga.

Porém, para calcular a recarga pelo método WTF, foram utilizados apenas 19 poços dos 61 disponíveis na época, já que somente esses possuíam resultados satisfatórios, nos quais os registros do nível de água permitiram uma boa medição da variação do nível de água. Segundo Eger *et al.* (2021), os dados descartados apresentaram problemas, como a falta de dados em determinados períodos, o que dificultou a interpretação da curva de variação do nível de água.

Com isso é necessária uma otimização da rede de monitoramento já existente ou a criação de uma rede de monitoramento regional de forma integrada entre os governos dos Estados nos quais o SAU se estende. Entende-se, a partir da revisão da bibliografia, que a utilização de métodos geoestatísticos é a melhor forma de estimar o número de poços necessários, porém deve-se combinar a análise multicriterial e as ferramentas GIS para espacializar e localizar as áreas de maior prioridade para a construção dessa rede, áreas para além das já atendidas pelos poços existentes.

Porém, é recomendado que a nova rede de monitoramento aproveite e integre-se à rede RIMAS, utilizando seus poços de monitoramento já existentes como ponto de partida, para que seja possível se utilizar de dados históricos presentes na rede RIMAS, mesmo que haja inconsistências nesses.

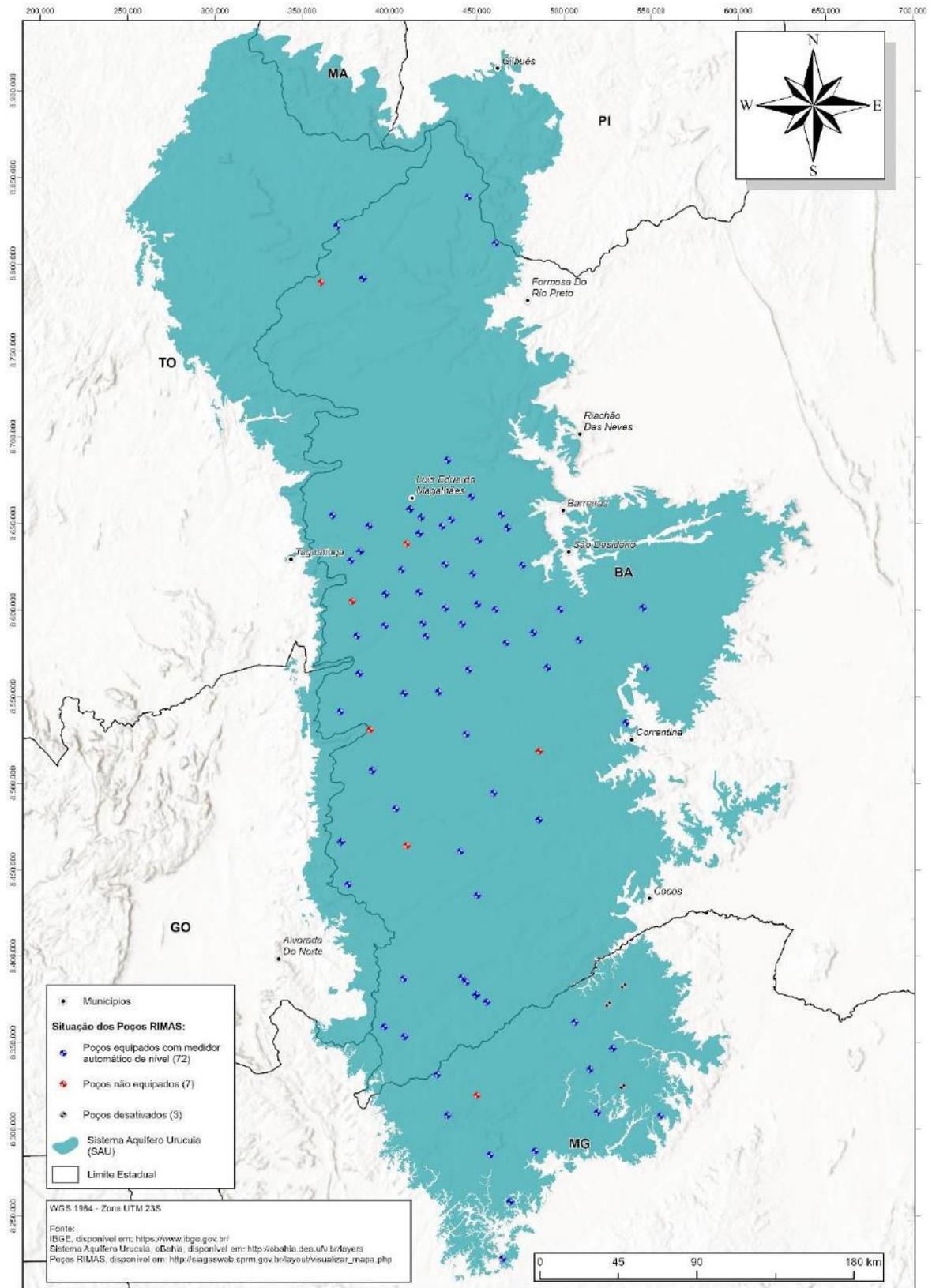


Figura 10: Mapa de localização dos poços RIMAS.

Essa expansão permitirá uma melhor representatividade espacial do aquífero, capturando a variabilidade das condições hidrogeológicas e a distribuição das águas subterrâneas ao longo da região. A porção do SAU localizada no oeste da Bahia é caracterizada por ser uma importante fronteira agrícola para o Brasil, sendo assim problemas da qualidade da água subterrânea podem chamar atenção devido à infiltração de agrotóxicos, fertilizantes, esgotos domésticos e de excrementos animais nos aquíferos ou diretamente nos poços artesianos (Mirlean *et al.*, 2005).

Com isso, em relação aos parâmetros a serem monitorados, é necessário a incorporação da análise qualitativa para além da quantitativa já presente na rede RIMAS, já que essa, apesar de contar com um sistema de alerta e controle de qualidade com medições anuais, é desejado que haja uma maior frequência e dedicação a esses fatores.

Por fim, destaca-se a importância da colaboração entre instituições governamentais, pesquisadores e comunidades locais na implementação e manutenção da nova rede de monitoramento, fortalecendo a eficácia e a aceitação das atividades de monitoramento.

5. CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica realizada neste trabalho proporcionou uma compreensão acerca dos tipos, abrangência e informações necessárias das redes de monitoramento. A partir dessa foi possível concluir que para a construção de uma rede de monitoramento ideal é preciso ir além da descrição hidrogeológica levando em conta medidas de gestão visando a otimização de redes de monitoramento.

A localização estratégica dos pontos de monitoramento desempenha um papel crucial na eficácia e representatividade da rede. A distribuição espacial adequada dos pontos de monitoramento permite uma avaliação abrangente das condições ambientais em uma determinada área, além de auxiliar na redução de custos, visto que implementar e manter uma rede de monitoramento possui um custo elevado. Com isso, foi possível observar a necessidade de uma melhora na densidade de poços na áreas de estudo, uma vez que é uma área de extrema importância econômica e esse aperfeiçoamento na região vai auxiliar nas medidas de gestão voltadas para um uso sustentável.

O uso de tecnologias como sistemas de informações geográficas (SIG), análises geoestatísticas e a análise multicriterial combinada com o conhecimento acerca do comportamento hidrogeológico pode melhorar a precisão e eficiência do monitoramento, permitindo a detecção de tendências, padrões e anomalias de forma mais eficaz, o que é essencial na hora de desenvolver a rede RIMAS já existente no SAU-BA, já que a partir desses métodos é possível quantificar o mínimo de poços necessários e localizar as áreas prioritárias nessa, respectivamente. Considera-se esses os métodos essenciais para a melhoria da rede já que a existe foi projetada com base no método hidrogeológico.

A rede de monitoramento existente no Brasil através do projeto RIMAS foi essencial para iniciar o conhecimento acerca das águas subterrâneas, porém a partir da revisão bibliográfica foi possível analisar uma deficiência para uma área de extrema importância como o Sistema Aquífero Urucuia e assim propor o debate para uma revisão dessa visando o fortalecimento dos dados para a tomada de decisão em uma área de extrema importância econômica devido ao avanço das atividades agrícolas e agropecuárias ali presentes.

Atualmente, existe um projeto em trâmite e em vias de aprovação para a implantação efetiva de uma rede de monitoramento regional de água subterrânea no SAU-BA e espera-se que este trabalho venha a contribuir como um primeiro passo para os estudos e avaliações que se farão necessários no desenrolar do projeto.

Em suma, esta revisão bibliográfica ressalta a importância das redes de monitoramento e das metodologias existentes para compreensão das águas subterrâneas e a tomada de decisões em busca da sustentabilidade. Através do estudo realizado foi possível identificar diretrizes e boas práticas para a projeção de projetos de redes de monitoramento.

Por fim, recomenda-se os seguintes passos para a aprimoração do conhecimento sobre as águas subterrâneas do Brasil e em particular no SAU-BA:

- Instalação de novos poços de monitoramento e estações fluviométricas de forma bem distribuída e com destaque para regiões carentes de dados.
- Melhor caracterização do aquífero através de estudos locais e regionais a fim de determinar a espessura do SAU-BA e os tipos de aquífero que compõem esse sistema.
- A partir de uma melhor caracterização, construção de um modelo conceitual para representar o conhecimento.
- Aplicação dos métodos revisitados neste trabalho para otimizar a rede de monitoramento existente no país.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi, S. H., & Sedghamiz, A. 2006. Geostatistical Analysis of Spatial and Temporal Variations of Groundwater Level. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129(1-3), 277–294. doi:10.1007/s10661-006-9361-z
- Aller, L. 1990. Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency. National Water Well Association, Ohio, USA.
- Amorim Junior V. 2003. Avaliação Hidrogeológica do aquífero Urucua na Bacia do rio das Fêmeas usando IP-Resistividade. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 82 p.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. 2008. RESOLUÇÃO CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008. DOU nº 66, de 7 de abril de 2008, Seção 1, páginas 64-68
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. 2017. Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e Proposição de Modelo de Gestão Integrada Compartilhada: Volume 1 - Diagnóstico do Meio Físico da Região de Abrangência dos Sistemas Aquíferos Urucua e Areado: Tomo I – Caracterização do Meio Físico, do Uso e Ocupação da Terra, Levantamento Hidrogeológico e Investigações Geofísicas: relatório final / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio Engecorps - Walm. -- Brasília: ANA, 2017. 138p.
- Camargo, E. C. G. 1998. Geoestatística: Fundamento e Aplicações. In: CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Geoprocessamento em Projetos Ambientais. 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 1998. Cap 5, 36p.
- Cázares Escareño, J., Júnez-Ferreira, H.E., González Trinidad, J., Bautista-Capetillo, C., Robles Roveló, C.O. 2022. Design of Groundwater Level Monitoring Networks for Maximum Data Acquisition at Minimum Travel Cost. *Water* 2022, 14, 1209.

Comunidade Europeia. 2007. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Guidance Document No15. Guidance on Groundwater Monitoring. Technical Report – 002 – 2007. Luxemburgo: European Communities, 52p

CPRM. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. Disponível em: <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php>. Acessado em: 28/06/2023 às 15:00.

Eger, G.Z.S., Silva Junior, G.C., Marques, E.A.G., Leão, B.R.C., Rocha, D.G.T.B., Gilmore, T.E., Amaral, L.G.H., Silva, J.A.O., Neale, C. 2021. Recharge Assessment in the Context of Expanding Agricultural Activity: Urucua Aquifer System, western State of Bahia, Brazil, Journal of South American Earth Sciences, Volume 112, Part 1,2021, 103601, ISSN 0895-9811. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103601>

Esquivel, J. M., Morales, G. P., & Esteller, M. V. 2015. Groundwater Monitoring Network Design Using GIS and Multicriteria Analysis. Water Resources Management, 29(9), 3175–3194. doi:10.1007/s11269-015-0989-8

Gonçalves, R. D., Engelbrecht, B. Z., & Chang, H. K. 2017. Evolução da Contribuição do Sistema Aquífero Urucua para o Rio São Francisco, Brasil. Águas Subterrâneas, 32(1), 1–10. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28916>

Gaspar, M.T.P. Sistema Aquífero Urucua: Caracterização Regional e Propostas de Gestão. 2006. 158 f. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.

Gaspar M.T.P. & Campos J.E.G. 2007. O Sistema Aquífero Urucua. Revista Brasileira de Geociências, 37(4):216-226.

Hirata, R., Suhogusoff, A., Marcellini, S. S., Villar, P. C., Marcellini, L. 2019. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. Universidade de São Paulo / Instituto de Geociências. doi: 10.11606/9788563124074

IGRAC. Groundwater monitoring country profile – Germany. Disponível em: [Groundwater monitoring country profile - Germany | International Groundwater Resources Assessment](#)

[Centre \(un-igrac.org\)](http://un-igrac.org) . Acessado em: 02/07/2023 às 17:08.

Jousma G., Roelofsen F. J. 2004. World-wide inventory on groundwater monitoring. International Resources Assessment Centre, Utrecht, The Netherlands. http://igrac.nitg.tno.nl/pics/monitoring_report.pdf. Cited 1 January 2008

Jørgensen, L. F., & Stockmarr, J. 2008. Groundwater monitoring in Denmark: characteristics, perspectives and comparison with other countries. *Hydrogeology Journal*, 17(4), 827–842. doi:10.1007/s10040-008-0398-7

Kavusi, M., Khashei Siuki, A., & Dastourani, M. 2020. *Optimal Design of Groundwater Monitoring Network Using the Combined Election-Kriging Method. Water Resources Management*, 34(8), 2503–2516. doi:10.1007/s11269-020-02568-7

Krige, D.G. 1951. A Statistical Approaches to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52, 119-139.

Lee, J.-Y., & Kwon, K. 2016. Current Status of Groundwater Monitoring Networks in Korea. *Water*, 8(4), 168. doi:10.3390/w8040168

Loaiciga, H. A., Charbeneau, R. J., Everett, L. G., Fogg, G. E., Hobbs, B. F., & Rouhani, S. 1992. Review of Ground-Water Quality Monitoring Network Design. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(1), 11–37. doi:10.1061/(asce)0733-9429(1992)118:1(11)

Matheron, G. 1963. *Traité de Géostatistique Appliquée, Tome II: Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières: Editions Technip*, vol. 24., 172 p.

Mirlean, N., Machado, M. I., Osinaldi, G. M., Demoliner, A., Baisch, P. 2005. O impacto industrial na composição química das águas subterrâneas com enfoque de consumo humano

(Rio Grande, RS). *Química Nova*, SP, v. 28, n.5, p. 23-32.

Mourão, M. A. A. 2009. Projeto “Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas”. CPRM, p. 90.

Olea, R.A. 1999. *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*: Kluwer Academic Publishers, New York, 303 p.

Olea, R., & Davis, J. 1999a. Optimizing the High Plains aquifer water-level observation network, K.G.S. Open File Report 1999–15.

Olea, R.A., and J.C. Davis. 1999b. Sampling Analysis and Mapping of Water Levels in the High Plains Aquifer of Kansas: Kansas Geological Survey Open-File Report No. 99-11, 35 p. and 9 plates.

Prakash, M. R., & Singh, V. S. 2000. Network design for groundwater monitoring - a case study. *Environmental Geology*, 39(6), 628–632. doi:10.1007/s002540050474

Peters, H. J. 1972. Criteria Groundwater Level Data Networks Hydrologic and Modeling Purposes. California Department of Water Resources, Sacramento, California. Vol. 8, N°. 1.

Saaty, T. L. 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. doi:10.1016/0377-2217(90)90057-i

Singh, C. K., & Katpatal, Y. B. 2017. A GIS Based Design of Groundwater Level Monitoring Network Using Multi-Criteria Analysis and Geostatistical Method. *Water Resources Management*, 31(13), 4149–4163. doi:10.1007/s11269-017-1737-z

SOGW, Subcommittee on Ground Water. 2013. A National Framework for Groundwater Monitoring in the United States, p. 182.

Theodossiou, N., & Latinopoulos, P. 2006. Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the Kriging methodology. *Environmental Modelling & Software*, 21(7), 991–1000. doi:10.1016/j.envsoft.2005.05.00

Thakur, J. K., Gossel, W., Weiss, H., Wycisk, P. 2012. Optimizing long-term groundwater monitoring network using geostatistical methods. IAHS, Publ. 355.

Thakur, J. K. 2013. Methods in groundwater monitoring: strategies based on statistical, geostatistical, and hydrogeological modelling and visualization. Martin Luther University, Alemanha, p. 182.

Thakur, J. K. 2016. Hydrogeological modeling for improving groundwater monitoring network and strategies. Applied Water Science, 7(6), 3223–3240. doi:10.1007/s13201-016-0469-1

Tucci, C. E. M. 2004. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH.

Tuinhof A., Foster S., Kemper K. 2002. Requirements of groundwater monitoring. GWP associated program, World Bank. EEUU, Washington DC, p 10.

Uil. H., Geer. F.C, Geherels, J.C. 1999. State of art on monitoring and assessment of groundwaters. UN/ECE Task Force on Monitoring and Assesemt. Working Programme 1996/1999. Volume 4. The Netherlands Institute of Applird Geoscience: Lelystad, setempro de 1999. 84 p. ISBN 9036952778

USGS. National Ground-Water Monitoring Network. Disponível em: [National Ground-Water Monitoring Network \(usgs.gov\)](https://www.usgs.gov/national-ground-water-monitoring-network). Acessado em: 02/07/2023 às 20:47.

Zhou, Y., Dong, D., Liu, J., & Li, W. 2013. Upgrading a regional groundwater level monitoring network for Beijing Plain, China. Geoscience Frontiers, 4(1), 127–138. doi:10.1016/j.gsf.2012.03.008