



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Perda de Captações Subterrâneas e Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica em áreas afetadas pelo enchimento e operação de Reservatórios de Hidrelétricas

Marcio da Rosa Magalhães Bessa¹, José Eloi Guimarães Campos²

¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília. Instituto de Geociências, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF - Fone: 61 3107-6998 e Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletrobras Eletronorte, m_bessa@hotmail.com. ORCID 0000-0001-8096-6486. ² Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. e-mail: eloi@unb.br. ORCID 0000-0003-2007-2223.

Artigo recebido em 05/11/2022 e aceito em 12/04/2023

RESUMO

Esta pesquisa propõe uma estratégia metodológica por meio de um sistema cíclico de monitoramento e avaliação na área da hidrogeologia aplicada aos sistemas de usinas hidroelétricas-reservatórios a serem implantadas e poderá também ser útil para as que estão em operação. A pesquisa se baseia nas experiências nacionais e internacionais apresentadas em workshops, seminários, reuniões e relatórios técnicos de impactos do meio ambiente. O ciclo de monitoramento e avaliação proposto é composto por componentes que possuem respectivamente tarefas a serem atendidas de maneira que se procure uma integração e melhoria dos serviços, como também a utilização de instrumentos já consolidados no monitoramento hidrogeológico de reservatórios artificiais. O estudo de caso utilizado é quando há perda de captação subterrânea ocasionados pela elevação do nível freático nas áreas marginais de reservatórios e hidrelétricas. Ao longo desse caso, são indicados aspectos técnicos, institucionais e de gestão que devem ser levantados e medidos de uma forma integrada e racional visando aperfeiçoar as atividades de monitoramento e avaliação. Ao final conclui-se que a aplicação de uma estratégia metodológica é um importante caminho de se ter informações que proporcionarão melhorias na eficácia e eficiência das tarefas que visam à interpretação do comportamento decorrente da elevação artificial do nível freático que são pouco conhecidos e desconsiderados em diferentes estudos.

Palavras-chave: Hidrogeologia, hidrelétrica, nível freático, rede de fluxo, reservatório.

Loss of Groundwater Catchment and Hydrogeological Monitoring and Assessment in areas affected by the filling and operation of Hydropower Reservoirs

ABSTRACT

This research proposes a methodological strategy through a cyclic system of monitoring and evaluation in the area of hydrogeology applied to hydroelectric power plant-reservoir systems to be implemented and may also be useful for those in operation. The research is based on national and international experiences presented in workshops, seminars, meetings, and technical reports on environmental impacts. The proposed monitoring and evaluation cycle is composed of components that have respective tasks to be fulfilled in a way that an integration and improvement of services is sought, as well as the use of instruments already consolidated in the hydrogeological monitoring of artificial reservoirs. The case study used is when there is a loss of underground catchment caused by rising groundwater levels in the marginal areas of reservoirs and hydroelectric plants. Throughout this case, technical, institutional and management aspects are indicated that should be surveyed and measured in an integrated and rational way to improve the monitoring and evaluation activities. The conclusion is that the application of a methodological strategy is an important way of obtaining information that will provide improvements in the effectiveness and efficiency of the tasks that aim to interpret the behavior resulting from the artificial elevation of the water table, which are little known and disregarded in different studies.

Keywords: Groundwater, hydropower, aquifer, net flow, reservoir.

Introdução

Um dos impactos ambientais negativos devido a construção de Usina Hidrelétrica - UHE, com enchimento e operação do reservatório é a perda de captação subterrânea de um sistema de abastecimento d'água municipal e das comunidades lindeiras, como exemplificado pelos casos de Porto Nacional e Palmas/TO (THEMAG, 1996). Isso ocorre devido à submersão de poços e à elevação do lençol freático (Li et al., 2020).

Diversos autores (Yost & Naney, 1975; Albuquerque Filho, 2002; Campos & Bessa, 2022) observaram *in situ* o agravamento que a percolação de água subterrânea em áreas vizinhas ao complexo de empreendimento de UHEs pode ocasionar no uso do solo ou nos recursos hídricos, além de diversos outros impactos biológicos e referentes às perdas de solos agricultáveis.

É importante destacar que os estudos ambientais no Brasil ganharam maior relevância a partir da análise dos impactos desencadeados pelos empreendimentos hidrelétricos. Entretanto, foi com o CONAMA 01/86 que ocorreram ações mais efetivas com a implantação dos Estudos de Impacto Ambientais e respectivos Relatórios de Impactos de Meio Ambiente - EIA/RIMA.

No que tange aos impactos hidrogeológicos em áreas afetadas pelo enchimento e operação de reservatórios de UHE na referida resolução não houve citações. Os problemas eram identificados muitas vezes pelos moradores de comunidades afetadas.

À medida que as cargas hidráulicas são elevadas nas áreas marginais dos reservatórios, há reversão das direções de fluxos e um influxo de água do reservatório para o sistema subterrâneo. Para reservatórios que podem ter dezenas ou até centenas de quilômetros de extensão a elevação do nível de água pode ser de 30 metros ou superior, e o significado quantitativo desses processos transitórios pode ser considerável (Freeze & Cherry, 2017; Li et al., 2020).

Se a elevação da superfície potenciométrica antes do represamento fosse baixa, o aumento do nível freático regional poderia ser benéfico, uma vez que melhores condições de umidade em solos próximos à superfície podem auxiliar na produção agrícola.

Por outro lado, se os níveis já estivessem próximos da superfície, a influência da elevação poderia ser prejudicial. Os solos podem ficar encharcados e existe a possibilidade de salinização por meio por eventual evaporação direta.

Uma vez que um reservatório tenha atingido seu nível operacional, as flutuações sazonais e operacionais são, em geral,

relativamente pequenas em comparação com o período inicial, e os efeitos transitórios tornam-se menos importantes. Se a presença de um reservatório influencia o ambiente hidrogeológico, o inverso também pode acontecer (Freeze & Cherry, 2017).

Um poço destinado à captação de água subterrânea para abastecimento público é uma das unidades do sistema como um todo, ou seja, adutoras, elevatórias, tratamento, reservatórios e rede de distribuição. Se esse manancial for afetado, todo o sistema é comprometido não só no âmbito quantitativo, mas também no qualitativo, podendo comprometer os padrões de potabilidade. Conclui-se, portanto, a possibilidade não só de prejuízos econômicos, mas também graves consequências socioambientais advindas da interrupção do abastecimento d'água.

Entidades, como a FUNASA e as companhias de abastecimento de água, por exemplo, que têm como foco no saneamento básico e saúde pública, necessitam estar informadas desse tipo de impacto para execução de seus projetos.

Uma maneira racional e integrada de subsidiar com informações sob medida as ações de prevenção e mitigação desse problema é a utilização de uma metodologia estratégica de monitoramento e avaliação.

O sistema de monitoramento de águas subterrâneas tem sido praticado por décadas, uma vez que é o único caminho para conhecer o regime qualitativo e quantitativo hidrogeológico (Zhou, 2001).

Importante enfatizar que qualquer medida deve atender às exigências atuais de flexibilização e dinamismo em função do aumento da demanda dos recursos hídricos nas últimas décadas, em destaque as UHEs de maiores portes instaladas em diferentes regiões do mundo (Maldaner et al., 2019; Silva e Castilho, 2021; Borowski, 2022).

Os reservatórios refletem os acontecimentos na bacia de drenagem. As experiências adquiridas na operação da usina hidrelétrica e nos reservatórios merecem ser difundidas, para incorporar à gestão da água. Isso requer uma estratégia dinâmica ao longo do tempo. Somente por meio do monitoramento e avaliação periódica e sistemática os avanços concretos serão alcançados para melhor qualidade ambiental (Bessa, 2012; Jiang et al., 2020; Kos et al. 2021).

O objetivo desse trabalho é apresentar uma proposta estratégica metodológica cíclica de monitoramento e avaliação aplicado ao impacto negativo da perda de captações de água subterrânea.

Essa pesquisa terá como base três práticas internacionais, já consagradas, incluindo: o

Arcabouço de Monitoramento da Qualidade da Água do Conselho Nacional de Monitoramento da Qualidade da Água - NWWMC / USA; o Ciclo de Monitoramento da União Europeia - UN/ECE e o *Ciclo de Monitoramento Fechado (The Closed-Loop)*, proposto por Jones et al., 2002).

A prática mais comum discutida nos diversos encontros internacionais é conhecida por MTM I, II, III e IV (“*Monitoring Tailor Made*”) e foi elaborada pela força de trabalho em monitoramento e avaliação das Nações Unidas / Comunidade Econômica (UN/ECE, 2006).

Também serão apresentadas as principais técnicas e contribuições para o aprimoramento do processo de elevação induzida no nível freático, sob a ótica de conceituações hidrogeológicas. É proposta, então uma modelagem conceitual desse evento a fim de subsidiar futuros trabalhos de simulação matemática ou computacional.

Este trabalho não teve como objetivo detalhar os procedimentos técnicos de monitoramento e avaliação, pois já são bem estabelecidos e consagrados na literatura das diversas áreas afins.

A seguir são apresentadas definições utilizadas neste trabalho (UN/ECE, 2000):

- Monitoramento (*monitoring*): é o processo de observação repetitiva para propósitos definidos de um ou mais elementos do meio ambiente, de acordo com uma agenda preestabelecida no espaço e no tempo. Utiliza metodologias comparáveis para sensores ambientais e coleta de dados. Fornece informação sobre o estado atual e as tendências passadas do comportamento ambiental.
- Avaliação (*assessment*): caracterização do estado hidrogeológico, hidrológico, morfológico, físico-químico e/ou biológico ou microbiológico da água subterrânea em relação às condições do contexto (*background*), efeitos humanos e os usos atuais ou intencionais que possam adversamente afetar a saúde humana ou o meio ambiente.
- Inventário (*survey*): atividade de duração finita, programa intensivo de medição e avaliação visando relatar o estado do sistema da água subterrânea para um propósito específico.

Material e métodos

Ciclo de Monitoramento e Avaliação

A presente pesquisa se enquadra no campo da hidrogeologia com foco nos problemas de saneamento básico e ambiental causado pela perda de captação de água, consequência do fluxo d'água subterrâneo ocasionado pelo reservatório de uma UHE, e ao conhecimento básico, conceitual e qualitativo.

Desta forma, procurou-se aplicar o ciclo de monitoramento e avaliação proposto por Bessa & Campos (2022) utilizando-se de dados secundários, literatura reconhecida na área e exemplos inéditos do assunto em UHEs brasileiras. Adicionalmente contou-se com a experiência dos autores no tema abordado.

Portanto, não será abordado nesta oportunidade o desenvolvimento de métodos para resolução de problemas de natureza diversa, com parametrizações, análises estatísticas e quantificações.

Os materiais de consulta foram principalmente artigos científicos, livros, dissertações, relatórios técnicos, além de Estudos de Impacto Ambientais e seus respectivos Relatórios, entre outros.

Importante salientar, que a utilização do ciclo se subteme um significativo arcabouço bibliográfico e de experiências internacionais, por exemplo, o arcabouço utilizado pelo NWWMC / USA.

Com isso, as tarefas analisadas foram organizadas em materiais numa sequência lógica, dentro de componentes do ciclo. Além disso, buscou-se apresentar instrumentos que auxiliam nas execuções das tarefas.

Com esses materiais, foram enquadradas as tarefas nos componentes dentro dos seguintes critérios, para cada ciclo, incluindo:

Informações Necessárias: representam os objetivos específicos a serem alcançados.

Coleta de Dados: trata-se do estabelecimento de um projeto da rede amostral, incluindo, no caso da pesquisa hidrogeológica a rede de poços de monitoramento das águas subterrâneas.

Análise de Dados: são esforços de processamento com relevância no contexto da análise de dados, que estão fortemente relacionados com a precisão e a confiabilidade da informação.

Utilização da Informação: devem ser vistos como o meio de interconexão de representação das informações necessárias e exibição dos resultados do ciclo de integração. Neste caso o tema central é relativo à Hidrogeologia no problema relativo à perda de captações.

Nesta etapa o método foi a pesquisa de um instrumento que fizesse a ligação da gestão com as variáveis técnicas para serem trabalhadas na rede amostral.

Somado a isso, pesquisou-se também um modelo conceitual para ser apresentado, sendo esse a base para correlação com outras áreas, tais como:

utilização de modelagem computacional, análise estatística, entre outras.

O uso de modelos numéricos com apoio de softwares como MODFLOW e FEFLOW podem ajudar a melhorar a rede amostral pela demonstração de onde impactos podem ser esperados sob condições específicas. Sempre que possível deve-se priorizar a integração dos modelos numéricos com as atividades de monitoramento e avaliação.

Outra análise apresentada foram pontos relevantes dessa influência da elevação do lençol freático nas regiões marginais aos reservatórios.

Resultados

Proposta do Ciclo de Monitoramento e Avaliação

O Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológico (Figura 1) foi elaborado com base nos diversos trabalhos de autores e entidades, tais como: ACWI (2022), Timmerman et al., (2001), Jones et al., (2002) e Veronez (2022).

Essa forma cíclica de lidar com este complexo e dispendioso problema, proporciona melhoria nos processos de gestão. As diversas instituições e órgãos de interesse nos recursos

hídricos serão motivados a atuarem de forma integrada. A importância de se utilizar essa metodologia estratégica resulta em se trabalhar de forma eficaz e eficiente em conjunto, por exemplo, uma empresa de saneamento e uma empresa de geração de energia.

A estratégia metodológica do Ciclo de Monitoramento e Avaliação apresentado na Figura 1 mostra que o começo e o caminho a ser tomado é aleatório, pois é importante respeitar o cenário e circunstância específica de cada caso. Naturalmente, numa sequência de trabalhos futuros utilizando o ciclo um sentido e direção lógica deverá ser adotada pelos especialistas envolvidos.

Para este trabalho o ponto de partida é o componente “Informação Necessária”, que deve ser estudado nas bases dos objetivos da gestão de recursos hídricos. Resumidamente, a gestão tem o interesse de prevenir ou mitigar o impacto que a elevação do nível freático, ocasionado pela formação do reservatório de uma usina hidrelétrica, possa ocasionar nos poços existentes ou planejados, os quais são utilizados para o abastecimento público de água das comunidades que margeiam o reservatório.

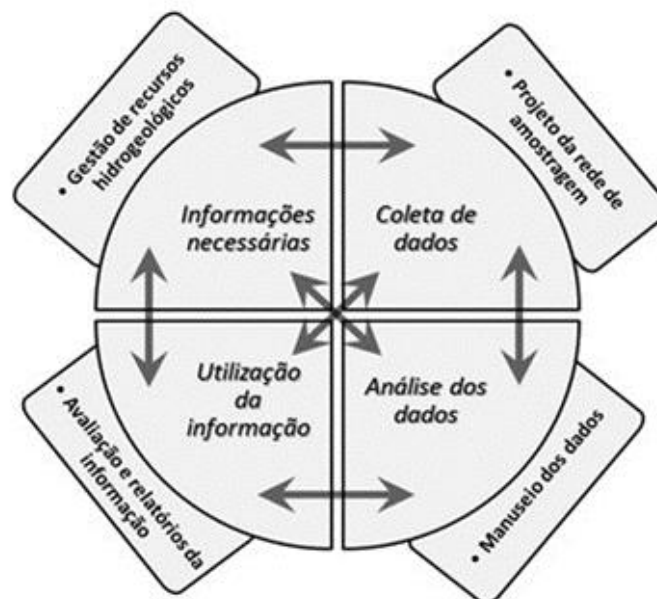


Figura 1. Proposta do Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica em sistemas UHE-reservatório.

A informação necessária deve ser especificada, de tal maneira que, os critérios para o sistema de monitoramento e avaliação devem ser derivados dele (UN/ECE, 2000). Para isso o modelo Forças motrizes-Pressões-Estado-Impacto-Respostas (*Driving Forces, Pressures, State, Impact, Responses* - DPSIR) é um instrumento usado para este fim, pois detecta e define processos

e interações no sistema humano-ecossistema. D é o sistema Usina-Reservatório; P - variação do nível d'água do reservatório; S - nível d'água do nível freático; I - perda de captação subterrânea; e R - realocação ou reconstruir os poços perdidos.

O próximo componente é a “Coleta de Dados”. Um projeto da rede amostral deve ser executado. A partir dessa premissa, o projeto deve

constar as variáveis, seleção dos locais, responsáveis pelos serviços, frequência, medições integradas, análises laboratoriais e no local, métodos de medições, custos, transporte e armazenamento.

Em suma, a rede amostral é constituída no modelo conceitual da área e deve conter as informações básicas e fundamentais para uma boa instalação do poço de monitoramento: perfil geológico, nível d'água, camada hidrogeológica de interesse e sentido preferencial do fluxo subterrâneo.

A seguir alguns pontos importantes para a concepção da rede amostral (Riyis & Riyis, 2011):

- Se não houver dados, o ideal é utilizar um método de sondagem, sendo possível citar como mais eficazes: o teste de penetração em cone tipo CPT (Cone Penetration Test), as sondagens de simples reconhecimento tipo SPT (Standard Penetration Test) e a instalação de poços de monitoramento.

- Para formações com mais de 50% de argila, a norma não prevê amostras de água isentas de turbidez. Nesses casos deve-se utilizar a mais fina possível ou considerar a instalação de um poço pré-montado.

- O método escolhido para a perfuração deve ser adequado ao projeto do poço.

- Avaliar o pistoneio do poço e a acomodação do pré-filtro. O objetivo dessa ação é estabilizar o pré-filtro exatamente no local onde se deseja que ele fique e estabelecer a conexão hidráulica deste com a formação.

- Deve-se elaborar um relatório de construção do poço, contendo todas as informações pertinentes, entre elas: profundidade da perfuração x profundidade do poço, tempo do pistoneio, produção, posicionamento do pré-filtro em relação à formação, comprimento da seção filtrante, entre outros. Esse relatório de construção deverá ser comparado com o projeto de construção do poço, para o gerenciamento das incertezas.

- Esses dados devem ser disponibilizados para a elaboração do plano de amostragem de água subterrânea.

A norma cita que o poço de monitoramento é uma obra de engenharia e que a sua instalação deve ser precedida de um estudo geológico e hidrogeológico. Desta forma, é necessário que se tenha informações suficientes sobre o meio para que seja construído um poço de monitoramento.

Outro princípio importante é obter amostras de água representativas da formação. Para isso um poço adequado deve ter as seguintes características:

- Possuir uma produção relevante, ou seja, que, ao ser purgado, não promova um rebaixamento maior que 25 cm do seu nível estático, de acordo com a NBR 15487 de 2010;
- Produzir amostras de água isentas de turbidez;
- Ter perda de carga pouco significativa;
- O poço e/ou sua construção não podem interferir nas amostras retiradas dele.

Para a proposição de um modelo conceitual de fluxo as seguintes variáveis devem ser considerar as:

- Espessura
- Espessura Saturada - b
- Porosidade - η
- Porosidade Eficaz ou Porosidade Efetiva - η_e
- Vazão Específica - V_e
- Retenção Específica - R_e
- Índice de fraturamento interconectado - Ifi
- Condutividade Hidráulica - K
- Transmissividade - T
- Coeficiente de Armazenamento - S

O modelo conceitual é um pré-requisito para se chegar à simulação numérica, pois é necessário identificar os aquíferos da região e todos os seus parâmetros dimensionais e hidrodinâmicos

Basicamente, o interesse está nos seguintes levantamentos para este estudo: altura da elevação da lâmina d'água do rio; declividade do terreno; profundidade original do nível freático; e natureza do material que compõe o aquífero (Figura 2).

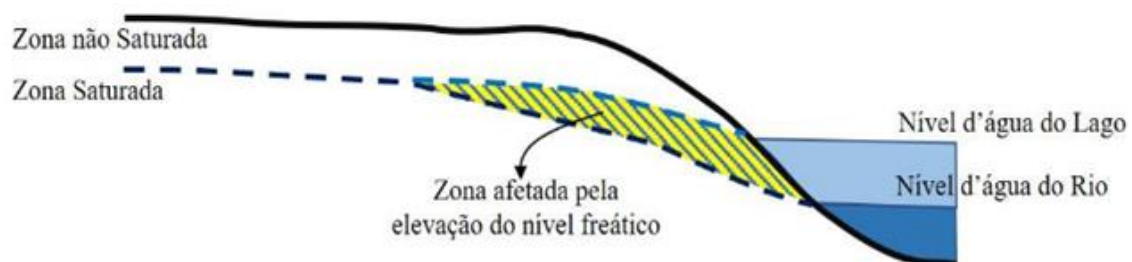


Figura 2. Ilustração esquemática mostrando a elevação do nível freático Campos et al., (2019).

A componente “Análise dos Dados” é onde o manuseio dos dados produzidos deve ser validado, arquivado e tornado acessível, e por

último, a “Utilização da Informação”, é o componente onde a avaliação dos usuários ou das audiências é analisada para elaboração dos

respectivos relatórios ou outras formas de apresentação dos dados e informações (tabelas, ilustrações, vídeos, entrevistas etc.).

Para que o sistema de monitoramento e avaliação tenha validade é indispensável instalar poços de monitoramento com características construtivas adequadas ao objetivo do estudo; definir a periodicidade das medições de níveis; avaliar a hidroquímica previamente à formação do reservatório; definir a largura da faixa marginal ao reservatório afetada pela elevação do nível freático e definir as variações sazonais dos níveis antes da formação do reservatório artificial.

Impactos associados à Hidrogeologia

Contaminação da água subterrânea pelas águas do reservatório

A formação de um reservatório de uma UHE pode impactar o nível freático ao longo do tempo, quando há conexão hidráulica entre esses corpos d'água. Este trabalho apresenta a possibilidade da qualidade d'água subterrânea adjacente ao reservatório a ser afetada.

Esse corpo d'água pode ser uma fonte potencial de intervenção das características do aquífero. Estudos da relação hidráulica entre estas unidades aquíferas devem ser realizadas antes da construção do empreendimento.

Os problemas poderão ser se cunho socioeconômico ou hidrogeológico. A sugestão de um projeto de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológico também é apresentada como uma alternativa factível para apoiar de forma sustentável as diferentes etapas da implantação de uma UHE, a fim de evitar desgaste perante a comunidade local e opinião pública, além de proporcionar ações para mitigação de impactos indesejáveis.

Albuquerque Filho (2002) e Campos et al., (2019) ressaltaram que no caso da elevação do nível freático diminuir a espessura do horizonte não-saturado, resultaria em aumento na vulnerabilidade desse aquífero a partir da maior exposição às contaminações oriundas da superfície do terreno.

Essa nova condição de interação entre estes corpos d'água gera instabilidades e diferentes equilíbrios ocorrerão ao longo do tempo, devido as mudanças no regime de fluxo, conjuntamente com

os diversos mecanismos de interação hidrogeológicas entre esses corpos d'água.

Vale ressaltar a importância da criação de um modelo conceitual adequado para esta situação. Ao levar em consideração a qualidade d'água, a massa de uma substância transportada do reservatório para a água subterrânea pelos meios porosos é submetida a mecanismos complexos, tais como: fluxos advectivos, dispersivos e difusos, interações sólido-soluto, reações químicas e fenômeno de decaimento (Feitosa et al., 2008).

Este novo ambiente formado em regiões que margeiam o reservatório ocasionado pelo preenchimento pode trazer para algumas áreas, impactos de qualidade d'água, do uso d'água e do solo e dos sistemas existentes que outrora não ocorriam. Portanto, devem ser considerados no planejamento dos recursos hídricos, hidrogeológicos e da infraestrutura desde a fase do inventário da UHE. A proposta neste trabalho já incluir uma estratégia metodológica, isto é, o Ciclo do Monitoramento e Avaliação.

Em regiões como o norte do Brasil o sistema de saneamento básico é ainda muito incipiente nas regiões de implantação de uma UHE. Para a implantação desses sistemas desses é fundamental que os responsáveis pela elaboração das informações sobre as áreas afetadas pelo reservatório no aquífero freático tenham conhecimento da magnitude dos impactos ao longo do tempo e no espaço.

A Figura 3 apresenta de forma esquemática as mudanças no fluxo de água nesses aquíferos. Observa-se que o aquífero freático que antes do reservatório variava de (a) para (b) passa de (c) para (d). Desta forma estudos hidrogeológicos dos fluxos preferenciais que forneçam estas informações devem ser incluídos. Estes estudos são de grande interesse para a hidrogeologia, engenharia civil e agronomia, botânica entre outras ciências. Por exemplo: i) a elevação do nível freático pode causar patologia geotécnica em edificações existentes nas áreas marginais aos reservatórios; ii) ou gramíneas exóticas poderão se desenvolver em função da maior disponibilidade da umidade do solo; ou ainda iii) a maior disponibilidade permanente de umidade no solo poderá possibilitar o plantio de lavouras anteriormente não viáveis (Hazas et al. 2022).

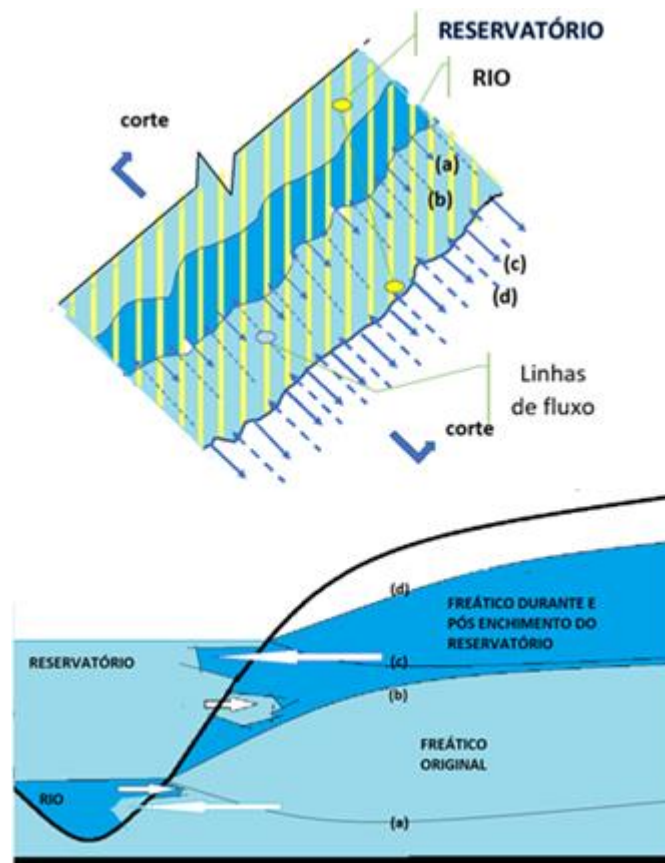


Figura 3. Planta e corte, esquemático, ilustrando as diversas mudanças de fluxo na implantação de um reservatório de uma UHE. Fase rio: (a) - rio alimenta o aquífero e (b) - rio drena o aquífero. Enchimento do reservatório: (c) - reservatório alimenta o aquífero e (d) - reservatório drena o aquífero.

Diminuição da capacidade de drenagem superficial e subterrânea

A drenagem superficial e subterrânea é caracterizada pelo perfil topográfico. O fluxo d'água segue por gravidade das terras altas, e pode ser considerada, de um modo geral, como área de recarga do aquífero, em direção aos vales, onde se encontram os rios e reservatórios. Essas áreas são consideradas as de descargas nos terrenos lindeiros aos reservatórios de uma UHE, em regiões como a Amazônia.

A identificação e modelagem da recarga não são assuntos deste trabalho, e podem ser encontrados em Ferdowsian et al., (2002), Gomes (2019), (Yihdego & Webb, 2011). O interesse neste trabalho é em relação à intervenção humana pela construção do sistema UHE-reservatório, que altera as capacidades de drenagem superficial e subterrânea nos terrenos vizinhos a esse novo corpo d'água formado.

De acordo com Campos et al., (2019), os casos que causam problemas de geração de áreas úmidas ou permanentemente encharcadas, em função da diminuição do gradiente hidráulico nas bordas do reservatório, são devido à elevação no nível d'água do rio durante a formação do reservatório de uma UHE.

Vale ressaltar que, se a água do rio permanecer dentro de sua calha original, a perturbação no nível do nível freático é insignificante (Campos et al., 2019).

Outro ponto relevante é tratado no trabalho de Gomes (2019) realizou uma pesquisa com duas estações pluviométricas e com 28 poços e obteve dados hidrodinâmicos (nível estático) e hidroquímicos (pH e Condutividade Elétrica). Com isso, o autor analisou a distribuição temporal pluviométrica no controle dos mecanismos de recarga.

Albuquerque Filho (2002) menciona este impacto e inclui a análise do balanço hídrico regional para subsidiar a parcela dos fluxos subterrâneos, que será barrada pela elevação da descarga de base do aquífero. Além disso, o autor recomenda que a sistemática de cálculo seja de acordo com as características do reservatório, do meio físico adjacente, do conhecimento prévio sobre o sistema aquífero afetado.

Esses ambientes topográficos, hidrogeológicos e hidrológicos, onde a construção de uma usina hidrelétrica é realizada apresentam características naturais, variações entre períodos chuvosos e secos, (Figura 4), e podem ser alteradas formando um ambiente mais complexo ainda.

Desta forma, estudos reforçados com auxílio de modelos temporais são um recurso a ser considerado, onde o tempo de resposta de recarga a partir da precipitação é identificado juntamente

com aspectos determinantes para a infiltração e escoamento superficial: porosidade e permeabilidade (Gomes, 2019; Hocking & Kelly, 2016).

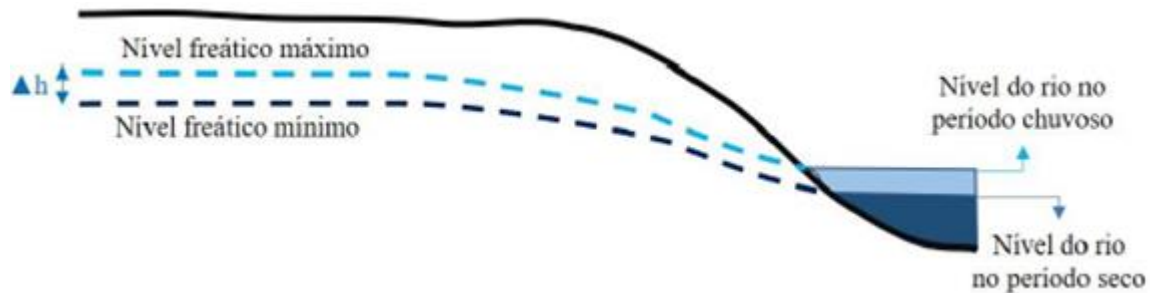


Figura 4. Seção que mostra que a variação sazonal do nível freático se comporta de forma homogênea com relação ao relevo local (considerando sistema homogêneo e isotrópico) (Campos et al., 2019).

Albuquerque Filho (2004) afirma que no Brasil os registros por meio de piezômetros indicam frequentes ascensões no nível freático na borda do reservatório com amplitudes desde poucos metros até maiores do que 20 metros.

As Figuras 5 e 6 apresentam ilustrações do nível freático e do nível médio da lâmina d'água do rio anteriormente e após o preenchimento do reservatório, ou seja, alterações dos fluxos possíveis tanto durante o enchimento como na operação do sistema UHE-reservatório.

A Figura 5 destaca os fluxos de escoamento superficial (*overland flow*), escoamento interno (*interflow*) e escoamento de base (*baseflow*). A Figura 6 ilustra a nova configuração após o preenchimento e a redução do

gradiente hidráulico, que resulta na diminuição da velocidade da descarga de base do aquífero para o reservatório.

Além das mudanças das cargas hidráulicas no interior do aquífero, também pode haver variações nos esforços nos maciços rochosos em função do aumento da massa de água que preenche o vale fluvial (Jiang et al. 2020).

A análise sobre as variações dos níveis freáticos em áreas marginais aos aquíferos também deve passar pela discussão sobre as possíveis mudanças climáticas que deverão ocorrer no futuro próximo (Pao-Shan et al., 2014; Dias et al. 2021 e Mello et al., 2021).

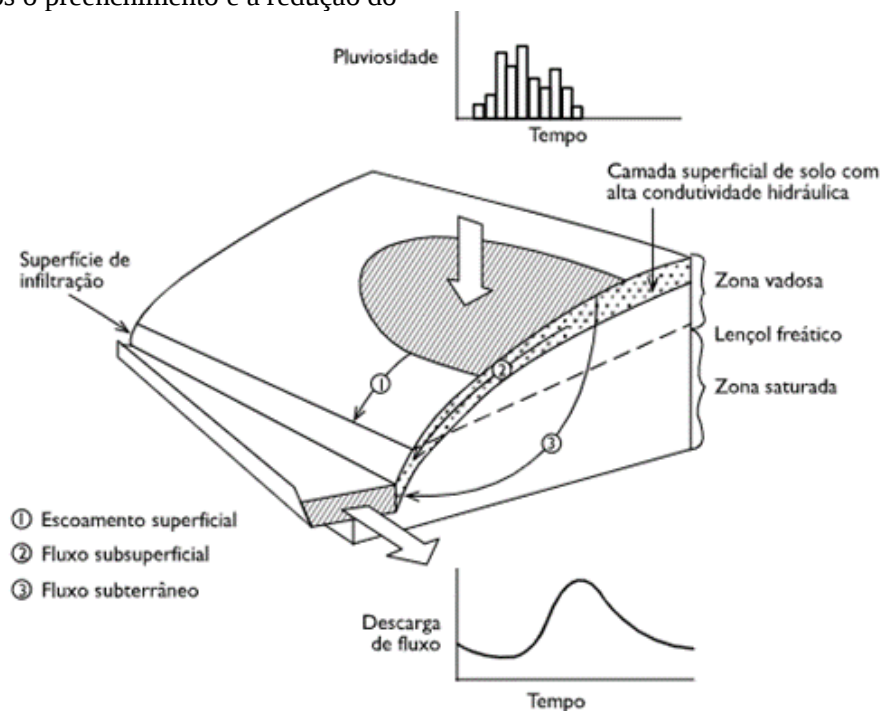


Figura 5. Mecanismos de entrega da chuva para um canal de rio a partir de uma vertente em um pequeno tributário de uma bacia hidrográfica (Freeze & Cherry, 2017).

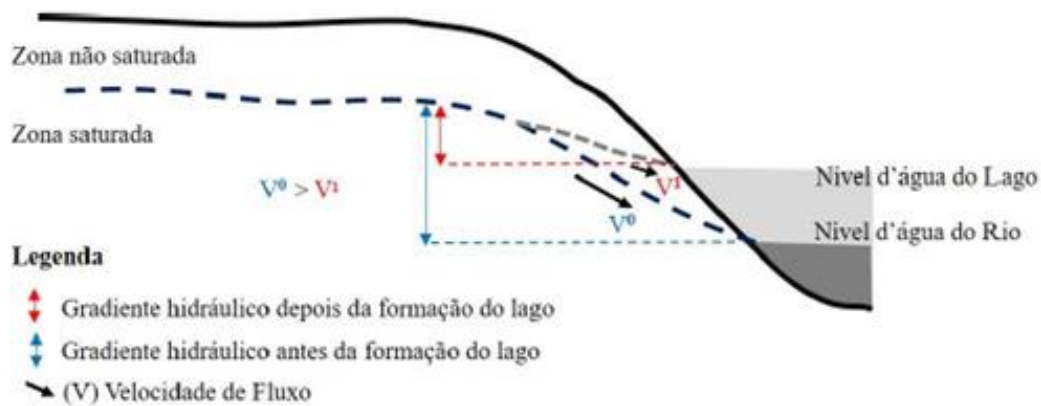


Figura 6. Ilustração da diminuição do gradiente hidráulico devido à elevação da cota do exutório (Campos et al., 2019).

Com a equação da velocidade linear média de fluxo subterrâneo para meios homogêneos e isotrópicos (Equação 3.2) é possível verificar que a velocidade do fluxo diminui quando há redução do gradiente da carga hidráulica, considerando que a porosidade efetiva e a condutividade hidráulica se mantêm constantes.

Equação 3.2: $V = K (\text{Grad } h)/\eta_e$, onde:

V = velocidade linear média de fluxo no aquífero;
 K = condutividade hidráulica do meio;
 $\text{Grad } h$ = gradiente da carga hidráulica ($\Delta h/\Delta s$); e
 η_e = porosidade efetiva.

Pode-se concluir com os destaques apresentados que, com a presença do reservatório as linhas de fluxo entre as áreas de recarga e descarga podem impactar o ambiente.

Nos estudos que envolvem nível freático os pontos potencialmente a serem considerados são as flutuações transientes no nível d'água em eventos críticos e nos casos de equilíbrio dinâmico (Freeze & Cherry, 2017).

Problemas de retenção de águas pluviais após eventos de precipitação críticos são observados em áreas urbanas impactadas por reservatórios, como em Carolina, MA e Babaçulândia, TO, que são cidades afetadas pela UHE Estreito no rio Tocantins.

Na condição inicial antes da existência do reservatório o nível freático varia de forma uniforme, conforme a variação sazonal das chuvas. A configuração do nível freático nas áreas de platôs segue aproximadamente a topografia do terreno, contudo, de forma suavizada (Freeze & Witherspoon, 1968 e Freeze & Cherry, 2017) (Figura 7).

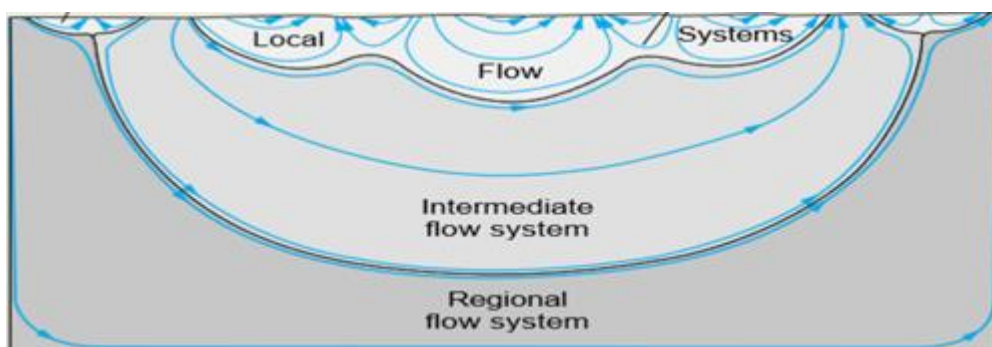


Figura 7. Efeito da topografia nos padrões regionais de fluxo de água subterrânea (Freeze & Cherry, 2017).

Quando há modificação do gradiente hidráulico (Figura 8), com diminuição da velocidade de fluxo, pode haver controle hidráulico no escoamento, o que altera as condições a montante e mantém os níveis d'água mais elevados por mais tempo. Isso resulta na inundação nas

áreas, principalmente, quando há coincidência de índices pluviométricos intensos.

É válido ressaltar que esse impacto pode, inclusive, ocorrer a distâncias significativas das bordas dos reservatórios e serem intensificados na complexidade dos efeitos caso existam aquíferos suspensos locais na região (Figura 8).

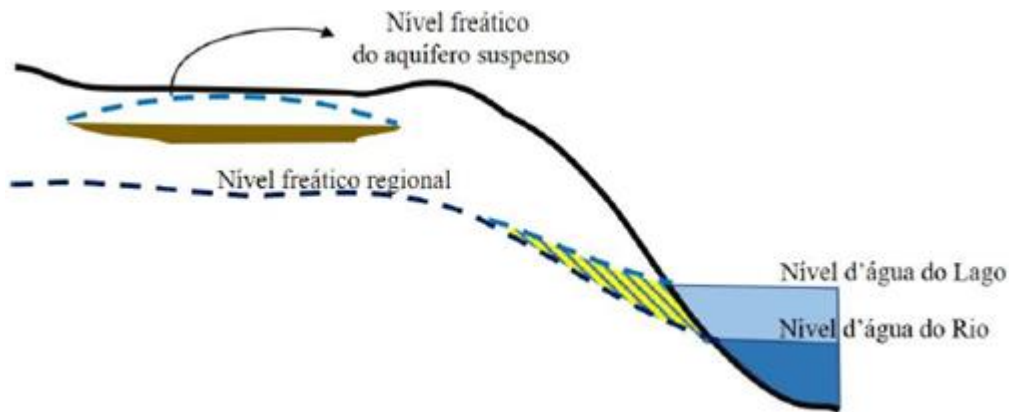


Figura 8. Exemplo de aquífero suspenso condicionado à camada de rocha impermeável na zona não saturada do aquífero regional, cujo exutório é o sistema rio-reservatório (Campos et al., 2019).

Informação necessária

Em relação à análise da diminuição do gradiente hidráulico é recomendada cautela com as interferências causadas pela diminuição da capacidade de drenagem superficial e subterrânea. As questões relativas às medidas associadas à mitigação dos impactos na bacia hidrográfica de implantação de um sistema UHE-reservatório devem ser ponderadas.

Diversas funções dos aquíferos e diferentes usuários podem ser prejudicadas, assim como o saneamento básico, principalmente, se for tipo *in situ* (com fossas e sumidouros). Questões vinculadas a inundações e alagamentos e medidas de reparação fazem parte da identificação dos assuntos principais da gestão de recursos hídricos e ambiental em áreas afetadas indiretamente pelos reservatórios.

Como já mencionado, um levantamento bibliográfico detalhado deve ser realizado a fim de aprimorar o conhecimento da região e de campos de conhecimento correlatos.

Os parâmetros para caracterizar a hidrogeologia podem ser facilmente encontrados na literatura, dando suporte para a obtenção dos valores médios da transmissividade, condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento, porosidade, cota de base do aquífero e espessura da zona não saturada. Características climatológicas, como a precipitação, taxa de infiltração, escoamento superficial e evapotranspiração também devem ser avaliadas.

A posição inicial ou natural do nível d'água subterrânea é uma das principais medições fundamentais para o estudo da interconexão hidráulica reservatório-nível freático para subsidiar informações hidrogeológicas. Os dados prévios à formação dos reservatórios devem ser de, no mínimo, dois anos hidrológicos, considerados suficientes para viabilizar a avaliação.

Albuquerque Filho (2004) propõe a confecção do “Mapa Potencial de Influência do

Preenchimento do Reservatório sobre o Sistema de Aquífero Livre”. Com isso os impactos são mais facilmente identificados e assim, é possível seguir para os próximos componentes do ciclo de forma eficiente.

A escala sugerida pelo autor é entre 1:25.000 a 1:1.000, que depende da disponibilidade do levantamento planialtimétrico e das informações hidrológicas e hidrogeológicas compatíveis.

A ideia do ciclo neste componente sugere a possibilidade de que as variáveis hidrogeológicas sejam organizadas e coletadas em uma etapa posterior, para posteriormente retroalimentar a análise e está de acordo com a proposta de Albuquerque Filho (2004).

O caso de gestão aqui tratado tem como objetivo subsidiar os casos de drenagem sobre as áreas adjacentes que possam interferir ou limitar o escoamento, que mantém terrenos inundados durante períodos de chuvas mais intensas, incluindo terrenos já ocupados e aqueles com possibilidade de ocupação.

Tendo isso em mente, o limite da bacia hidrográfica deve ser delimitado e seguir critérios estabelecidos para seleção das estações hidrometeorológicas a fim de estimar a características pluviométricas do local. Assim, a área de interesse pode ser construída com a topografia a partir do mapa potenciométrico ao longo de toda a área de represamento, ou de locais com maior risco de serem afetados.

A visita técnica prévia ao campo apoia a coleta de dados. Com essa investigação preliminar é possível ajustar os detalhes antes do próximo componente, onde os custos e o tempo são significativos para o projeto de monitoramento de avaliação.

Os dados hidrometeorológicos devem ser obtidos com a maior consistência possível, e no caso de necessidade, eventuais falhas podem ser

preenchidos com aplicação dos diversos métodos consagrados na literatura.

Coleta de dados

Medições podem ser complementares ou não. Um projeto de rede de amostragem fica condicionado à informação adequada para atender as componentes seguintes. A elaboração de um mapa hidrogeológico é bastante comum e caberá a um especialista definir esse projeto.

O período de medição necessário para o entendimento do comportamento antes e depois da formação do reservatório deve ser longo e suficiente para avaliação global das variações dos níveis, em função da sazonalidade climática e das variações devidas à presença do reservatório.

Ferdowsian et al., (2002) sugerem a utilização de séries maiores do que 10 anos. Entretanto, sabe-se que para a realidade brasileira esse período de dados, dificilmente, estará disponível e por isso, é proposto que quatro anos de dados acumulados são suficientes para uma avaliação preliminar.

O importante na coleta de dados são as variáveis que apoiam o entendimento do problema no tempo e no espaço, a dinâmica da recarga e descarga do aquífero, assim como a condição do escoamento superficial (Pujades et al., 2021).

Um levantamento da sazonalidade é importante, pois o que deverá ser analisado são

eventos hidrológicos que serão alterados com a nova dinâmica do nível freático proporcionado pela implantação da UHE.

Além da precipitação, as variáveis do solo como porosidade e condutividade hidráulica devem ser analisadas para as análises de alterações, ou para complementar o que já foi verificado.

Para este impacto a medição do nível do freático é fundamental, pois a partir do monitoramento será realizada a avaliação da elevação da carga hidráulica, que deve estar associada à topografia local. Este parâmetro deve ser ponderado no levantamento parcial topo batimétrico desde uma faixa da calha do rio avançando no terreno marginal ao reservatório, uma vez que o nível freático é controlado pela declividade (Figura 9).

Segundo Campos et al., (2019) esse avanço no terreno pode chegar a 200 metros a partir da margem do reservatório quando a declividade é pequena (Grad h menor do que 1 metro (Figura 9). A distância da margem é inversamente proporcional à profundidade do nível do freático.

A descrição do material presente na zona vadosa com a possibilidade de obtenção de amostras para ensaios laboratoriais é fundamental. Nesta etapa também se deve avaliar a possibilidade de realização de testes de infiltração durante a perfuração dos poços e sua amostragem.

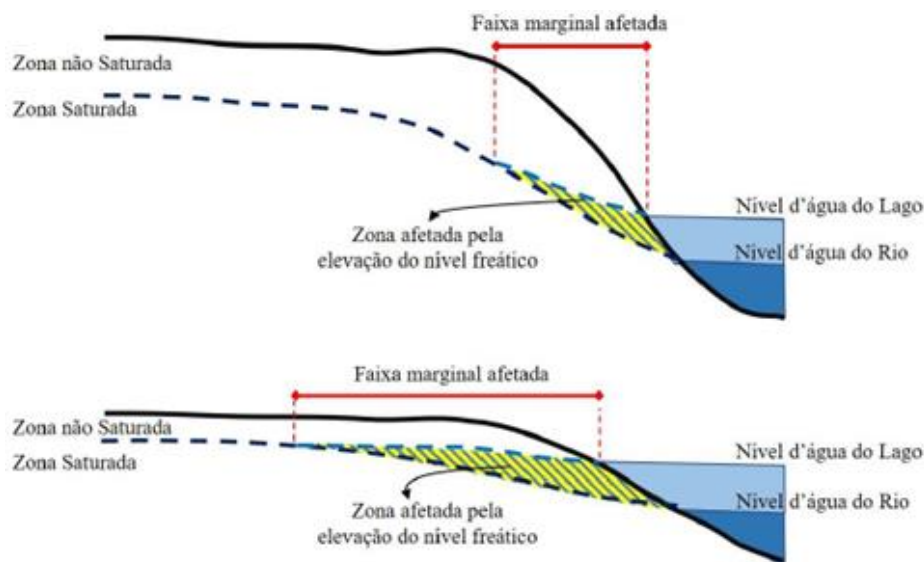


Figura 9. Apresentação gráfica do controle da declividade na determinação da faixa afetada pela elevação artificial do nível freático devido à formação do reservatório (Campos et al., 2019).

É imprescindível que durante a perfuração de poços de monitoramento seja estabelecida uma padronização local que atenda a todas as integrações sugeridas pelo ciclo. Entretanto sugere-se que a instalação dos poços siga as orientações

técnicas dos diferentes normativos CETESB, ABNT e demais órgãos.

Discussão

A perda de captação de um sistema de abastecimento d'água provavelmente é um dos impactos mais prejudiciais em diversos sentidos, principalmente à questão social. Um agravante ainda maior é no caso em que o manancial de abastecimento é representado por poços tubulares profundos. Isto porque a flexibilidade de tratamento considerando este manancial é geralmente limitada. Ele é considerado mais protegido do que o superficial, contudo caso seja inundado sua perda será total, sendo necessária a construção de novos poços em áreas emersas.

Uma metodologia de monitoramento e avaliação não só evitaria esse transtorno como também impediria surpresas negativas oriundas da operação da UHE.

Essa atividade pode ser sustentável caso se envolva de forma orientada aos diversos interessados localizados na bacia hidrográfica do empreendimento e, nesse sentido, um monitoramento com avaliação pode auxiliar, principalmente e for adotada na forma de ciclo. Casos de sucessos são relatados nas referências apresentadas neste trabalho.

O monitoramento e avaliação podem e devem ser utilizados em diferentes áreas do conhecimento com aplicações diversas, desde políticas públicas até a verificação da qualidade de um produto manufaturado.

Os ciclos de monitoramento e avaliação devem verificar: a efetividade e eficácia, a qualidade, a relação de causa-efeito, mudanças em processos de produção, dentre outros. O monitoramento e avaliação devem ser baseados em dados obtidos de forma adequada e seu tratamento deve ser realizado visando os objetivos de sua aplicação.

No caso específico de projetos de monitoramento e avaliação de águas subterrâneas afetadas por reservatórios de UHE, devem ser considerados três pontos chaves:

- Caracterização dos aquíferos e enquadramento adequado no modelo conceitual. Esta ação é fundamental para as tomadas de decisões técnicas. Nesta etapa inicial as unidades hidroestratigráficas e os parâmetros hidrogeológicos associados a cada unidade são estabelecidos.
- A parceria com órgãos e entidades responsáveis proporciona sustentabilidade e credibilidade ao projeto de monitoramento e avaliação. Este tipo de integração pode minimizar conflitos comumente observados entre órgãos dos setores hidroenergéticos e ambientais.
- Os sistemas de monitoramento e avaliação devem ser direcionados para atender objetivos comuns entre os envolvidos a partir da caracterização do aquífero de interesse. O intuito do projeto é

aprimorar o conhecimento acerca do recurso hídrico, de tal forma que seja viável a sua gestão.

A base da construção de um projeto que utilizar o sistema cíclico proposto ocorre a partir de informações requeridas, que são relacionadas com os usos e resultados que representam o aquífero em questão.

O ciclo documenta como os dados e informações serão coletadas e como as informações serão analisadas, interpretadas e utilizadas.

Revisões periódicas devem ser realizadas a partir de falhas identificadas entre os componentes.

Dessa forma, o projeto é aprimorado pela melhoria de uma tarefa não comprometendo todos os componentes do ciclo, previamente levantados.

A seguir segue um resumo executivo de cada componente dessa estratégia metodológica reforçando alguns aspectos como comentários finais.

Informações Necessárias

As funções e os objetivos de usos das águas dos aquíferos devem ser identificados e prioridades devem ser estabelecidas. A identificação adequada das necessidades requer atenção. Os processos de tomada de decisão pelos usuários de informações devem ser definidos com antecedência.

Neste sentido, o enquadramento do aquífero de interesse no modelo conceitual adequado é fundamental antes da definição das demais informações necessárias (projeto do poço de monitoramento, número de poços, periodicidade de amostragem e medição, substâncias a serem analisadas etc.).

Coleta de dados

Estabelecido o que se deve informar, um projeto da rede amostral deve ser realizado e em seguida a coleta dos dados para geração de informações. Além destes aspectos, deve-se avaliar o tempo e o financiamento necessários para todo o monitoramento e avaliação. As instituições envolvidas devem avaliar periodicamente as atividades propostas e confirmar se estão cumprindo os objetivos da forma mais efetiva e econômica.

O projeto poderá se desenvolver gradualmente acompanhando as disponibilidades e restrições administrativas, orçamentárias e de pessoal. A alocação de recursos deverá seguir o fluxo previsto no projeto.

Para ampliar a integração do processo, esforços conjuntos devem ser dirigidos para problemas comuns, como por exemplo, estudos de fontes potenciais de poluição, onde o uso de águas subterrâneas é identificado. Neste caso, a

associação entre o consórcio construtor da UHE e as companhias de saneamento deve ser intensificada.

Uma característica dos sistemas de avaliação e monitoramento é que a rede deve ser exequível. Não existe um critério único e por isso o ciclo, não deve ser padronizado, por exemplo, com aplicação direta de um projeto de monitoramento de outro órgão ou de outro estado em um caso específico.

Por exemplo, para o caso de hidrelétricas, o ideal é que seja obtido um ciclo completo de oscilação natural ou sazonal do nível freático com frequência mensal totalizando, pelo menos, 24 medições na fase pré-reservatório.

Durante o preenchimento a frequência deve ser em uma frequência adequada para identificar alterações significativas nas variáveis de interesse, não sendo inferior a 15 dias até que a cota atinja a de operação final do reservatório. Posteriormente, a frequência mensal deve ser considerada para períodos variáveis de operação (em função das questões específicas de cada caso).

Análise dos dados / Utilização da informação

O resultado do ciclo pode servir para usuários de diferentes formações e para objetivos distintos. O uso das informações produzidas em sistemas de monitoramento e avaliação podem ser aplicados em campos de conhecimento correlatos e de competências complementares, bem como alternativas de intervenção nos seus efeitos.

Os procedimentos de uma ou mais instituições envolvidas nas tarefas descritas no ciclo devem ser compatíveis (atendendo a normas e buscando participação com laboratórios reconhecidos). Os dados devem ser validados, armazenados e acessíveis, atendendo às necessidades de formações específicas e aos objetivos associados ao projeto de monitoramento e avaliação.

Também é conveniente ponderar a instalação de poços pioneiros, amostragem de água e solo em complemento às atividades de gestão, o que é designado de *Survey* (com duração finita, programa de medição intensiva, avaliação e relatório do estado de um ou mais elementos do meio ambiente para uma proposição específica).

A legislação tende a estabelecer atividades engessadas, principalmente para o Brasil com suas dimensões continentais. Assim, devem-se desenvolver esforços para que os resultados sejam mais amplamente utilizados, para ações além do mero cumprimento de legislações, como por exemplo, em pesquisas acadêmicas ou para a gestão integrada de recursos hídricos e do meio ambiente.

A renovação da Licença de Operação de uma UHE requer que se resolvam os impactos causados pela implantação do sistema reservatório-UHE. Caso o sistema de monitoramento e avaliação não seja adequado e bem direcionado poderá ocasionar outros problemas ou mesmo intensificar os existentes.

Campanhas antecedentes ao empreendimento não executadas ou executadas de forma inadequada, eliminam as referências para analisar se realmente o reservatório afetou o nível freático no enchimento ou mesmo durante a operação.

A integração das atividades, como os dados para análise de recarga podem ser utilizados para fins científicos e para outras finalidades, como por uma companhia de saneamento. O ciclo fortalece essa possibilidade e pode ser adaptado por meio das tarefas e componentes, bem identificadas.

As companhias de saneamento, normalmente, possuem laboratórios nas proximidades dos reservatórios. Com uma participação conjunta com a concessionária de energia o laboratório pode servir para ambos os órgãos, evitando até mesmo duplicidade das ações.

Outros benefícios podem ser atingidos com esta estratégia metodológica, como o simples acréscimo de uma variável como o nitrato no conjunto de substâncias a serem analisadas, que seria interessante para uma companhia de saneamento, por exemplo.

Pode ocorrer que o consórcio construtor da UHE já realize trabalhos em determinado reservatório onde está a companhia de saneamento, e a partir das tarefas direcionadas pode-se acrescentar mais variáveis para atender outro usuário.

A mudança dos parâmetros pode ser inclusa no ciclo em um determinado componente para a integração dos esforços, mesmo depois de iniciado o processo de monitoramento e avaliação.

Um forte apoio para ampliar a aplicabilidade do monitoramento e avaliação é o convencimento da priorização pelos tomadores de decisão. O ciclo serve também como integrador entre órgãos. Com a produção de informações relevantes e com o esforço distribuído entre os participantes, o cancelamento desta atividade não estaria em risco.

Normalmente o monitoramento é executado por uma empresa de forma isolada para atender determinada legislação de maneira sustentável. Para isso, a produção de dados e informações proporcionam o entendimento do meio ambiente, sendo necessário completar vários ciclos de forma integral ou parcial.

Os custos mais acessíveis viabilizam as administrações responsáveis para garantir a continuidade do monitoramento e avaliação.

Neste contexto há possibilidade de propor novos participantes no ciclo, além dos anteriormente mencionados nos exemplos. Uma pesquisa acadêmica pode correr em paralelo ao ciclo, com sua própria geração de dados e, ainda, aproveitando dados gerados nos ciclos de monitoramento.

No caso de uma pesquisa acadêmica, como um doutorado que tem duração de até 4 anos, mais dados podem ser obtidos se acrescentados estudos realizados por um agente de uma UHE por períodos mais longos ou com maior frequência.

Não é recomendada a utilização de dados derivados de laboratórios não certificados. Porém, nos casos em que houver um investimento, para a utilização desses dados seria necessário acrescentar estudos de incertezas.

Com o ciclo estabelecido há uma tendência de buscar coletas de dados padronizadas e com laboratórios de referência, pois outros usuários teriam interesse nesses dados e informações. Esse acréscimo valorizaria o trabalho e proporciona melhor credibilidade, enriquecendo o processo de monitoramento e avaliação como um todo.

A amostragem e a coleta de dados requerem atenções específicas. Deve-se evitar contaminação durante a amostragem, armazenamento de amostras ou transporte.

Na prática, a infraestrutura amostral não é só uma questão que envolve maior atenção com relação à demanda econômica, mas inclui também otimização do tempo e disponibilidade de especialistas e de equipamentos.

No entanto é importante que essa discussão seja considerada na proposta do projeto, pois, cada tipo de aquífero se confinado, semiconfinado ou livre exige cuidados específicos.

Os órgãos ambientais exigem qualidade na informação gerada. Registros são solicitados a partir do conhecimento adquirido, também impulsionados pela evolução tecnológica e avanços e técnicos.

Uma visita técnica, por exemplo, deverá realizar referências ao último trabalho de campo no local. Essa exigência descarta informações aleatórias nas sucessivas visitas e medições. Se uma imagem fotográfica foi tirada em um local e em determinado ângulo, na próxima inspeção no mesmo local, deverá ser tirada uma nova foto de outra posição. Inclusive, as datas das fotografias são novas exigências para se evitar repetições.

Análise estatística é uma ferramenta que foi incluída pelos órgãos com o intuito de verificar

anomalias de interesse do meio ambiente ou de mudanças da qualidade dos recursos hídricos.

A construção do poço de monitoramento é peça chave em todo o processo quando envolve água subterrânea e deve seguir rigorosamente os padrões da ABNT. A partir dos dados obtidos é possível entender o ambiente subterrâneo.

Apesar de existirem normas de construção de poços sua instalação nem sempre é adequada e uma das razões é a falta de entendimento específico do aquífero em estudo. Inicialmente, é necessário identificar o tipo de aquífero e, então, instalar os poços de acordo com a natureza do aquífero.

Em situações em que há duas superfícies potenciométricas, é necessário construir poços multiníveis ou alternativamente dois poços para monitoramento. Alguns outros erros podem ocorrer como o posicionamento da seção de filtros ou definição da profundidade a ser alcançada.

Com a necessidade de conhecer antecipadamente o aquífero, surge a importância de definir o modelo conceitual, termo que não abrange só a construção do poço, mas vai mais além com o envolvimento de um profissional especializado na área de hidrogeologia.

Nessa etapa ocorrem todos os outros estudos, pois é identificado o tipo de aquífero e suas características envolvidas juntamente com os reguladores de fluxo (materiais geológicos envolvidos).

Com isso estabelecido, o projeto de monitoramento e avaliação deve definir as questões como frequência, período, substâncias e elementos a serem medidos. Essas são tarefas a serem definidas previamente à coleta de dados.

Devido a sua importância é admissível que se estabeleça implantação de poços para apoiar no levantamento do modelo conceitual (dentro do definido anteriormente como *survey*), que podem ser inseridos na rede amostral posteriormente.

Portanto, o poço associado ao projeto de monitoramento e avaliação pode ser o mesmo que foi utilizado para a caracterização do aquífero numa etapa antecedente. Com uma estratégia metodológica é possível viabilizar esse processo.

Um estudo de caso interessante que envolve o tema desta pesquisa ocorreu no Rio Xingu. O problema associado aos alagamentos em residências não teve relação com a elevação do nível freático do aquífero livre da região e com o reservatório, mas foi associado às chuvas anômalas observadas no ano de 2017 com acúmulo de mais de 1500 mm nos primeiros 3 meses do ano.

O parecer conjunto ANA-IBAMA constatou que a população em Altamira ocupou uma área de lagoa natural, com a presença local de um aquífero suspenso. Essa conclusão foi

alcançada após instalação de pares de poços de monitoramento durante um ano hidrológico, que mostrou níveis independentes e ausência de causalidade entre os níveis do reservatório no Rio Xingu e na lagoa.

Referências

- ACWI. 2022. National Water Quality Monitoring Council - The Monitoring Framework. Disponível em: https://acwi.gov/monitoring/about_the_framework.html. Acessado em: 6/5/2022.
- Albuquerque Filho, J.L. 2002. Previsão e análise da elevação do nível do nível freático na Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) de reservatórios hidrelétricos. Rio Claro (Tese de Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro. 222 p.
- Albuquerque Filho, J.L.; Bolzachini, E.; Kitahara, S.M. 2004. Monitoramento hidrogeológico do aquífero livre nas margens do reservatório de Porto Primavera implantado no rio Paraná, divisa dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.
- Bessa, M.R.M. 2012. Monitoramento e modelagem em reservatórios. In: CAMPAGNOLI, F e DINIZ, N. C. (org.). Gestão de Reservatórios de Hidrelétricas. São Paulo: Oficina de Textos, p. 75 – 86
- Bessa, M.R.M., Campos, J.E.G. 2022. Monitoramento e avaliação hidrogeológica e da suscetibilidade de desenvolvimento de processos instabilizatórios em decorrência da formação de reservatórios de usinas hidrelétricas. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA), Vol. 12, no 1, 13p.
- Borowski, P.F. 2022. Water and Hydropower - Challenges for the Economy and Enterprises in Times of Climate Change in Africa and Europe. Water 2022, 14, 3631. <https://doi.org/10.3390/w14223631>
- Campos, J.E.C., Bessa, M.R.M. 2022. Perda de captações subterrâneas e monitoramento e avaliação hidrogeológica em áreas afetadas pelo enchimento e operação de reservatórios de hidrelétrica. XXII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo, SP.
- Campos, J.E.G., Bessa, M.R.M.; Augusto, V.A., Gomes, A.W., Oliveira, G.N.R. 2019. Ascensão do nível freático no entorno de reservatórios em hidrelétricas: impactos e propostas de medidas mitigadoras. In: XIII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Código: XXIII-SBRH1171. Tema: 05 - Águas subterrâneas. 24 à 28/11/2019. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu - PR. 9p.
- Dias, V.S., Luz, M.P., Medero, G.M. Nascimento, D.T.F. 2018. An Overview of Hydropower Reservoirs in Brazil: Current Situation, Future Perspectives and Impacts of Climate Change. Water, 10, 592; doi:10.3390/w10050592.
- Feitosa, F.A.C., Filho J.M., Feitosa E.C., Demétrio J.G.A. 2008. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3a edição. Revisada e ampliada. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Laboratório de hidrogeologia (LABHID). 812p.
- Ferdowsian, R., Ryder, A., George, R., Bee, G., Smart, R. 2002. Groundwater level reductions under lucerne depend on the landform and groundwater flow systems (local or intermediate). Australian Journal of Soil Research. 40(3):381-96.
- Freeze, A.R., Cherry, J.A. 2017. Águas Subterrâneas, tradução de Groundwater, Everton de Oliveira (coord.), Edição Instituto Água Sustentável. São Paulo. 698p.
- Freeze, RA, Witherspoon, PA. 1968. Análise Teórica do Caudal Regional de Água Subterrânea: 3. Interpretações Quantitativas. Water Resources Research, 4 , 581-590.
- Gomes, A.W. 2019. Impactos da variabilidade temporal do regime pluviométrico na recarga de aquíferos: estudo de caso em Caetité-BA. 2019. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Universidade de Brasília, Brasília. 108 f., il.
- Hazas, B.M., Marcolini, G., Castagna, M., Galli, M., Singh, T., Wohlmuth, B., Chiogna, G. 2022. Drought conditions enhance groundwater table fluctuations caused by hydropower plant management. Water Resources Research, 58, e2022WR032712. <https://doi.org/10.1029/2022WR032712>
- Hocking, M., Kelly, B.F.J. 2016. Groundwater recharge and time lag measurement through Vertosols using impulse response functions. J Hydrol 535, 22–35, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.042>.
- Jiang, H., Zhang, C.H., Zhou, Y.D., Pan, J.W., Wang, J.T., Wu, M.X., Fan, Q.X. 2020. Mechanism for large-scale canyon deformations due to filling of large reservoir of hydropower project. Scientific Reports, 10(1), 12155.
- Jones C., Palmer R.M., Motkaluk S., Walters M. 2002. Watershed health monitoring. Ed. Boca Raton, EWIS Publishers. Florida. 227p.
- Kos, Z.; Durin, B.; Dogancic, D., Kranjcic, N. 2021. Hydro-Energy suitability of rivers

- regarding their hydrological and hydrogeological characteristics. *Water* 2021, 13, 1777. <https://doi.org/10.3390/w13131777>
- Li, M., Zhou, Z., Zhuang, C., Xin, Y., Chen, M., Wu, J., 2020. The Cause and Statistical Analysis of the River Valley Contractions at the Xiluodu Hydropower Station, China. *Water*, 12 (3), 791.
- Maldaner K.L.S., Lima A.M.T., Akama A, Marques E.E. 2019. A avaliação ambiental integrada e os cenários socioeconômicos de municípios impactados pelas usinas hidrelétricas Peixe Angical e São Salvador no rio Tocantins. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais* (Online). 119-34. <https://doi.org/10.5327/z2176-947820190094>.
- Mello, C.R.; Vieira, N.P.A.; Guzman, J.A.; Viola, M.R.; Beskow, S.; Alvarenga, L.A. 2021. Climate Change Impacts on Water Resources of the Largest Hydropower Plant Reservoir in Southeast Brazil. *Water*, 13, 1560. <https://doi.org/10.3390/w13111560>.
- Pao-Shan, Y., Tao-Chang, Y., Chen-Min K., Jung-Chen C., Hung-Wei T. 2014. Climate change impacts on reservoir inflows and subsequent hydroelectric power generation for cascaded hydropower plants, *Hydrological Sciences Journal*, 59:6, 1196-1212, DOI: 10.1080/02626667.2014.912035.
- Pujades, E., Poulain, A., Orban, P., Goderniaux, P., & Dassargues, A., 2021. O impacto das características hidrogeológicas no desempenho da Hidrelétrica de Armazenamento Subterrâneo (UPSH). *Ciências Aplicadas*, 11 (4), 1760.
- Silva, S.N., Castillo, J.A.D., 2021. An approach of the hydropower: Advantages and impacts. A review. *Journal of Energy Research and Reviews*, 8(1), 10-20.
- THEMAG. 1996. EIA - Estudo de Impacto Ambiental. Caracterização do Empreendimento. Companhia de Energia Elétrica do Estado do Tocantins. Volume I.
- Timmerman, J., Boer, J.; Hisschemoller, M., Mulder, W. 2001. Specifying information needs: improving the working methodology. *Regional Environmental Change*, v. 2(2):77-84. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1007/s101130100030>>.
- UN/ECE. 2006. Guidelines on monitoring and assessment of transboundary groundwaters. International groundwater resources assessment Centre. Editorial assistance was given by the UN/ECE Secretariat, members of the Core Group on Groundwater and Ilonka Záborszky, Utrecht-The Netherlands. 166p.
- Veronez, F., Dias Lima, F. R., Tshibangu, G. M. 2022. Environmental impacts of hydropower plants in Brazil: identification guide. *Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate*, 13(1).
- Yihdego, Y., Webb, J.A. 2011. Modeling of bore hydrographs to determine the impact of climate and land-use change in a temperate subhumid region of southeastern Australia. *Hydrogeology Journal*, 19(4), 877-887.
- Zhou, Y. 2001. Groundwater monitoring (Apostila do curso de pós-graduação) IHE-Delft. Países Baixos. 156p. Il.