



Universidade de Brasília - **UnB**
Instituto de Geociências - **IG**
Programa de Pós Graduação - **Geociências Aplicadas e Geodinâmica**
Área de Concentração - **Recursos Hídricos e Meio Ambiente**

TESE DE DOUTORADO

Nº 75

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA EM HIDRELÉTRICAS: A QUESTÃO DO INFLUXO DO RESERVATÓRIO PARA O SISTEMA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

MARCIO DA ROSA MAGALHÃES BESSA

Orientador:
Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos

Brasília, DF, Outubro de 2022.



Universidade de Brasília - **UnB**
Instituto de Geociências - **IG**
Programa de Pós Graduação - **Geociências Aplicadas e Geodinâmica**
Área de Concentração - **Recursos Hídricos e Meio Ambiente**

TESE DE DOUTORADO

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA EM HIDRELÉTRICAS: A QUESTÃO DO INFLUXO DO RESERVATÓRIO PARA O SISTEMA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

MARCIO DA ROSA MAGALHÃES BESSA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos (Universidade de Brasília - Orientador)

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges (Universidade de Brasília - Membro Interno)

Prof. Dr. Luiz Antônio de Oliveira (Universidade Federal de Uberlândia - Membro Externo)

Prof. Dr. Gandhi Giordano (Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Membro Externo)

Brasília, DF, Outubro de 2022.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

BB557p Bessa, Marcio da Rosa Magalhães
Proposta metodológica para monitoramento e avaliação hidrogeológica em hidrelétricas: a questão do influxo do reservatório para o sistema de águas subterrâneas / Marcio da Rosa Magalhães Bessa; orientador José Eloi Guimarães Campos. -- Brasília, 2022.
97 p.

Tese(Doutorado em Geociências Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2022.

1. Hidrogeologia. 2. hidrelétrica. 3. nível freático. 4. rede de fluxo. 5. reservatório. I. Eloi Guimarães Campos, José, orient. II. Título.

Este trabalho é dedicado à minha mãe Ruth e ao meu pai José (*in memoriam*).

“Há uma experiência inicial que é implicada em todas as outras e que dá a cada uma delas a sua gravidade e a sua profundidade: é a experiência da presença do ser. Reconhecer esta presença é reconhecer ao mesmo tempo a participação do eu no ser.”

Louis Lavelle

AGRADECIMENTOS

Inúmeros agradecimentos não seriam suficientes ao Professor José Eloi Guimarães Campos pela condução profissional e pela amizade durante a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, ao Instituto de Geociências - IG e à Universidade de Brasília - UnB pelo apoio institucional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À minha querida esposa Edna e à minha filha Luiza.

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. Foram utilizados estudos de casos de impactos ocasionados pela elevação do nível freático nas áreas marginais de reservatórios e hidrelétricas na região amazônica, além de outras que podem ser relevantes ao tema em estudo. Os impactos decorrentes da elevação artificial do nível freático incluem dentre outros: aumento de risco geotécnico em edificações existentes, perda de captações de recursos hídricos subterrâneos, contaminação da água subterrânea pelas águas do reservatório, diminuição da capacidade de drenagem superficial e subterrânea, saturação de sistemas de saneamento *in situ* e cemitérios, saturação de cavernas vadosas, aumento do custo para instalação de infraestrutura urbana e diminuição da proteção dos aquíferos freáticos. Ao longo desses casos são indicados aspectos institucionais e técnicos, 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-chaves: Hidrogeologia; hidrelétrica; nível freático; rede de fluxo; reservatório.

ABSTRACT

This research proposes a methodological strategy throughout a monitoring and assessment cyclic system in the area of hydrogeology applied to the hydroelectric power plant-reservoir system 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 assessment cycle is composed of components that have respective tasks to be fulfilled in a way that an integration and optimization of services is sought, as well as the use of instruments already consolidated in the hydrogeological monitoring of artificial reservoirs. Case studies of impacts caused by the elevation of the water table in marginal areas of hydroelectric reservoirs in the Amazon region were used, as well as others that may be relevant to the topic under study. The impacting problems presented due to the artificial elevation of the water table are: hydrogeologic monitoring and assessment of geotechnical processes related to the formation of reservoirs, loss of groundwater resources pumping wells, contamination of groundwater by reservoir waters, decreased surface and ground drainage capacity, saturation of on-site sanitation systems and cemeteries, saturation of karst caves, increased cost for the installation of urban infrastructure, and decreased protection of phreatic aquifer. Throughout these cases, institutional, management and technical aspects are indicated that should be surveyed and measured in an integrated and rational way to improve monitoring and evaluation activities. In the end, it is concluded that a strategic methodology is an important way to obtain information that will provide improvements in the effectiveness and efficiency of the tasks that 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.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Apresentação do Problema e Hipótese.....	3
1.2. Justificativa	3
1.3. Objetivos	6
1.4. Materiais e Métodos.....	7
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1. Evolução do Processo de Monitoramento de Água Subterrânea	9
2.2. Definições e Tipos de Monitoramento	10
2.3. Modelos Previsionais de Elevação do Nível Freático	12
2.4 Caracterização dos Aquíferos.....	16
2.4.1. Modelagem dos Aquíferos.....	19
2.4.2. Comportamento Hidroquímico.....	19
2.4.3. Informações Necessárias	20
2.4.4. Estratégias de Monitoramento e Avaliação.....	21
2.4.5. Rede Amostral (Programas de Monitoramento e Coleta de Dados).....	22
2.4.6. Gestão de Dados e Informações (Manuseio e Análise de Dados).....	24
2.5. Monitoramento Hidrogeológico em Usinas Hidrelétricas.....	25
2.5.1. Instalação dos Poços de Monitoramento.....	26
2.5.2. Monitoramento de Níveis.....	27
CAPÍTULO 3 - IMPACTOS AMBIENTAIS DE USINAS HIDRELÉTRICAS.....	30
3.1 Ciclo de Monitoramento e Avaliação em Hidrogeologia.....	30
3.2. Elevação do Nível do Nível Freático	34
3.3. Aumento de Risco Geotécnico em Edificações Existentes	36
3.3.1. Introdução.....	37
3.3.2. Contextualização do Problema.....	39
3.3.3. Constituição da Informação: Monitoramento e Avaliação do Nível Freático	42
3.3.4. Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica em Processos Instabilizatórios	44
3.3.5. Informações Necessárias	45
3.3.6. Coleta de Dados.....	46
3.3.7. Análise dos Dados	47
3.3.8. Utilização da Informação	48
3.3.9. Conclusões.....	49
3.4. Perda de Captações de Recursos Hídricos Subterrâneos.....	50

3.4.1. Introdução.....	50
3.4.2. Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológico.....	51
3.4.3. Contaminação da Água Subterrânea pelas Águas do Reservatório.....	52
3.4.4. Contextualização do Problema.....	53
3.4.5. Diminuição da Capacidade de Drenagem Superficial e Subterrânea.....	54
3.4.6. Informação Necessária.....	58
3.4.7. Coleta de dados	59
3.4.8. Saturação de Sistemas de Saneamento in situ e Cemitérios.....	61
3.4.9. Projeto de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica Visando à Contaminação do Aquífero.....	61
3.4.10. Estudo de Caso	63
3.4.11. Saturação de Cavernas Vadasas – Estudo de Caso	67
3.4.12. Aumento do Custo para Instalação de Infraestrutura Urbana.....	71
3.4.13. Estudo de Caso	71
3.4.14. Monitoramento Hidrogeológico na Prevenção de Aumento de Custos de Implantação de Infraestrutura Urbana	73
3.4.15. Diminuição da Proteção dos Aquíferos Freáticos.....	75
3.4.16. Estudo de caso	76
CAPÍTULO 4 - DISCUSSÕES.....	81
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Três estratégias metodológicas de monitoramento e avaliação, consideradas como bases para a presente pesquisa. a - Framework for Water Quality Monitoring (NWQMC, 2019); b - Monitoring Cycle (UN/ECE, 2000); e c - The Closed-Loop Watershed Health Monitoring Model (Jones et al., 2002).	5
Figura 1. 2. Principais atividades e etapas de desenvolvimento da pesquisa.	7
Figura 2. 1. Variação da espessura da lâmina d'água ao longo do rio após o barramento, segundo seção longitudinal à borda do reservatório. Condições de contorno $F(y) = 0$ se $y < 0$ ou $y > a$ e $F(y) = H - Hy/a$, se $0 < y < a$. (Albuquerque Filho, 2002).	13
Figura 2. 2. Medidor de nível para medição manual do NF e transdutor de pressão (diver) para medições automáticas do NF.....	18
Figura 2. 3. Diferentes modalidades de poços de monitoramento multiníveis A - única seção de perfuração com instalação de filtros a diferentes profundidades; B - única seção de perfuração com maior diâmetro e instalação de seções de revestimento com filtros a diferentes profundidades e C - bateria de poços, com uma seção para cada seção de filtro-revestimento (neste caso, o conjunto dos três poços corresponde a um único ponto de monitoramento do tipo multinível). (Campos, 2017).....	26
Figura 2. 4. Construção de poços de monitoramento e problemas relacionados a instalação e operação inadequada da rede de poços.	27
Figura 2. 5. Apresentação gráfica do controle da declividade na determinação da faixa afetada pela elevação artificial do nível freático devido à formação do reservatório (Ceste & Ambiental Tecnologia, 2013).....	28
Figura 3. 1. Proposta do Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica em sistemas UHE-reservatório.....	31
Figura 3. 2. Etapas do processo de AIA no Brasil (Lima, 2022).	34
Figura 3. 3. Modelo esquemático da evolução do processo de elevações induzidas no nível freático nas bordas de reservatórios (Albuquerque Filho, 2002).	35
Figura 3. 4. a e b. Patologias geotécnicas em residências margeando a UHE de Peixe Angical/TO não vinculadas à sobrelevação do NF (CDT/UnB, 2008a); c e d: patologias em edificações em Pereira Barreto, SP causadas pela elevação do nível do nível freático (Vilar & Rodrigues, 2011).	38
Figura 3. 5. Exemplos de patologias geotécnicas que podem ser desenvolvidas em função da elevação artificial do nível freático de aquíferos rasos devido à formação de reservatórios artificiais.	40
Figura 3. 6. Ilustração esquemática da relação de causa-efeito vinculada à elevação do nível freático. ..	40
Figura 3. 7. Cidade Pereira Barreto/SP antes e após represamento, 1- cemitério; 2- Matadouro municipal; 3 - Fazenda Dr. Aurazil de Campos; 4 - Cidade; 5 - Rio Tietê; 6 - Ponte Novo Oriente; e 7 - Nível atual do rio (Bruno, 2019).	40
Figura 3. 8. Efeito no aquífero livre com a formação do reservatório.	41
Figura 3. 9. Ilustração esquemática mostrando a elevação do nível freático Campos et al. (2019).	52

Figura 3. 10. 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.	54
Figura 3. 11. 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).....	55
Figura 3. 12. 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).....	56
Figura 3. 13. Ilustração da diminuição do gradiente hidráulico devido à elevação da cota do exultório (Campos et al., 2019).	56
Figura 3. 14. Efeito da topografia nos padrões regionais de fluxo de água subterrânea (Freeze & Cherry, 2017).....	57
Figura 3. 15. 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).	58
Figura 3. 16. 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).	60
Figura 3. 17. Relação entre da questão sanitária com a eventual elevação artificial do nível freático (Holdren et al., 2001).	61
Figura 3. 18. Foto antes do preenchimento apresentando pela seta uma caverna em rochas calcáreas antes do alagamento em Serra da Mesa (Cruz & Piló, 2019).	67
Figura 3. 19. Representação do relevo cárstico (Auler, 2005).	68
Figura 3. 20. UHEs e reservatórios da bacia do rio Tocantins (ONS, 2022).	68
Figura 3. 21. Municípios com ocorrências de estruturas cársticas e zona de influência da UHE Serra da Mesa (Almeida, 2012).	69
Figura 3. 22. Colônia mista de morcegos em uma caverna arenítica, Araripe (CE). No centro da foto a espécie: <i>Carollia perspicilata</i> . (Cruz & Piló, 2019).	70
Figura 3. 23. UHE Luís Eduardo Magalhães ou Lajeado – Imagem superior: localização (fonte Google Earth) e vista do reservatório e imagem inferior: imagem da barragem com vistas para jusante e montante. Disponível em: https://turismo.to.gov.br/regioes-turisticas/serras-e-lago-/principais-atrativos/lajeado/usina-hidreletrica-luis-eduardo-magalhaes/ , acesso em 25 de abril de 22).....	72
Figura 3. 24. Sistema de monitoramento e avaliação hidrogeológica em reservatórios de UHE seguindo o fluxo de informação (adaptado de Ward et al., 1990).	75
Figura 3. 25. Métodos de coleta de dados para identificar fontes potenciais de contaminação da água subterrânea (USEPA, 1991 citado por Foster et al., 2006).....	77
Figura 3. 26. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster et al., 2006).....	78
Figura 4. 1. Diagrama de Piper como exemplo de representação de das campanhas de amostragem hidroquímica em Paranã / TO. Área urbana impactada pela UHE Peixe Angical (Souza, 2008).	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1. Classificação de materiais de acordo com os valores de condutividade hidráulica (K) adaptado de Freeze & Cherry (2017) e Fetter (2001).....	18
Tabela 2. 2. Exemplos de objetivos técnicos para caracterização do fluxo do sistema de água subterrânea (Uil et al., 1999).	20
Tabela 2. 3. Ligação entre objetivos de gestão e informações necessárias (técnicas).....	21
Tabela 2. 4. Fatores que determinam a rede amostral (Chilton et al, 1996 in: UN/ECE, 2000).....	22
Tabela 2. 5. Etapas do Planejamento do setor elétrico (Brasil, 2007a).	25

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas - UHEs se mantêm como a principal fonte de energia elétrica no Brasil, apesar de fontes de geração eólica, nuclear e térmica estarem alcançando patamares mais elevados de contribuição na matriz energética.

O Brasil é o terceiro país com maior potencial hidrelétrico, atrás da China e da Rússia. A potencialidade estimada é de 260 GW, porém apenas 30% é aproveitada atualmente. Os outros 70% estão concentrados principalmente nas bacias hidrográficas do Tocantins/Araguaia e do Amazonas (Brasil, 2007b).

Uma usina hidrelétrica é um empreendimento que passa por diversas etapas para sua implantação e operação, como: planejamento de barragem e reservatório, construção, operação e manutenção. O conjunto, barragem-reservatório contribui de forma efetiva para a qualidade de vida da sociedade com benefícios além da produção de energia, como controle de enchentes e inundações. Indiretamente auxilia no surgimento de novas rodovias e hidrovias, desenvolvimento de novas comunidades, áreas industriais e ampliação da produção agropecuária.

A energia de fonte hidrelétrica é limpa e o reservatório formado desenvolve a região, o que amplia a importância socioeconômica do seu entorno (EPE, 2021). Entretanto, a região de implantação é submetida a diferentes impactos que podem ser positivos ou negativos e que afetam os meios biótico, físico e social.

O alagamento de um reservatório pode ter impactos significativos nos vários sistemas ambientais existentes em uma bacia hidrográfica. O regime hidrológico é afetado de maneira mais direta, uma vez que, os padrões de *runoff* são influenciados tanto a montante quanto a jusante do reservatório e as vazões desses cursos d'água são alteradas no tempo e no espaço (Freeze & Cherry, 2017).

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 necessita de uma estratégia dinâmica ao longo do tempo. Somente por meio do monitoramento e avaliação periódica e sistemática os avanços concretos serão alcançados para uma melhor qualidade ambiental (Bessa, 2012).

A introdução de um reservatório em um vale que atua como área de descarga regional produz tanto um reajuste transitório quanto uma mudança permanente no sistema hidrogeológico. Durante a elevação inicial do nível do reservatório, um sistema de fluxo transiente é induzido aos aquíferos que estão distribuídos às margens do reservatório.

À medida que as cargas hidráulicas são elevadas no limite do reservatório, 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).

O resultado do reajuste transitório inicial é um conjunto de mudanças permanentes de longo prazo no regime hidrogeológico local e regional. O nível freático é elevado, a carga hidráulica é aumentada nos aquíferos e as taxas de descargas do sistema de fluxo subsuperficial no vale são reduzidas.

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 da eventual evaporação direta.

Em aquíferos mais profundos, o aumento das cargas hidráulicas poderá ampliar as vazões de bombeamento. Portanto, as análises preliminares que levam ao projeto de um reservatório devem incluir previsões de impacto hidrogeológico (Albuquerque Filho, 2012).

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 é recíproco (Freeze & Cherry, 2017).

O Brasil é beneficiado com o Sistema Integrado de Energia Elétrica que possibilita aproveitar os regimes hidrológicos de todo o país, o que garante a regularização da oferta de energia. Entretanto, o uso do recurso hídrico precisa de cuidados e de fortalecimento nas integrações entre os estudos dos diversos elementos que o constitui. Dessa forma, este trabalho propõe contribuir com a questão vinculada à hidrogeologia.

Com o barramento há a possibilidade da formação de um reservatório cuja superfície livre é maior que a do antigo curso d'água original. Com isso, o conhecimento apurado do novo ambiente é fundamental no que se refere à influência da elevação do nível freático, devido a construção e operação dos lagos artificiais ou reservatórios.

Esta tese apresenta princípios técnico-científicos conectados ao tema associado à Geologia e Engenharia para subsidiar a escolha das tecnologias adequadas para o monitoramento de áreas afetadas por reservatórios de usinas hidrelétricas.

Portanto, será proposta uma estratégia metodológica de monitoramento e avaliação nas etapas de estudos do sistema barragem e reservatório, de tal maneira que, o conhecimento das causas e efeitos dos impactos seja conhecido antecipadamente e medidas mitigatórias possam ser implantadas.

A estratégia metodológica desta tese teve, principalmente, como base uma sequência de atividades relacionadas ao monitoramento e à avaliação, que foram aplicados a questão do influxo do reservatório para o sistema de águas subterrâneas.

1.1. Apresentação do Problema e Hipótese

O tema da pesquisa é gestão hidrogeológica e o principal problema inclui sistemas de monitoramento e avaliação em questões associadas às águas subterrâneas. Destacam-se as informações necessárias para subsidiar as fases de inventário, viabilidade, projeto e operação de empreendimentos hidrelétricos.

A hipótese aplicada à pesquisa envolve a proposição de uma estratégia metodológica a partir de levantamentos bibliográficos. Assim, o intuito é equacionar a integração das atividades em cada etapa de implantação dos empreendimentos da geração hidrelétrica.

Tal estratégia metodológica deverá subsidiar o processo de licenciamento ambiental e estudos de implantação de hidrelétricas com um projeto de monitoramento e avaliação sob medida.

Desta forma subtende-se que, podem estar inclusas melhorias no custo-benefício nas atividades do monitoramento e da avaliação, de maneira geral. Para isso, essa pesquisa busca estudos de casos e identifica, analisa e organiza formulações e instrumentos utilizados ou propostos em estudos nacionais e internacionais bem-sucedidos aplicáveis ao ciclo de monitoramento e avaliação.

Portanto, o produto dessa tese contribui 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.

1.2. Justificativa

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).

Um sistema de monitoramento da qualidade da água é composto de amostragem, análises laboratoriais, manuseio de dados, análises de dados, relatórios e utilização da informação. Seu projeto terá que, necessariamente, incorporar uma ampla variedade de conceitos científicos e de gestão (Ward *et al.*, 1990).

Com a vasta quantidade de metodologias, instrumentos e ferramentas envolvidos nas práticas de sistemas de monitoramento e avaliação é importante selecioná-los e utilizá-los sob uma estratégia metodológica, a fim de desviar das possibilidades de fracasso e ao mesmo tempo extrair melhor proveito. (Santos *et al.*, 2001).

Adicionalmente, existe um consenso atual de executar monitoramento e avaliação baseado em aproximações sob medida, ao contrário dos projetos tradicionais padronizados ou construídos a partir de conceitos preestabelecidos (Helsinki, 1992).

Dentro desse contexto, a proposta de um projeto de monitoramento e avaliação engloba, de forma cíclica, componentes da área da hidrogeologia. Essa metodologia trará diversos benefícios já citados. Um destaque é o aprendizado adquirido com a realização de cada componente do ciclo. Assim, em cada rodada é possível verificar o quanto se atendeu à gestão de águas subterrâneas inicialmente solicitadas, identificando com precisão onde melhorar.

Usinas hidrelétricas representam um empreendimento de grande destaque no Brasil. O potencial hidrelétrico brasileiro, que está entre os cinco maiores do mundo, é estimado em cerca de 260 GW e 40% está localizado na Bacia Hidrográfica do Amazonas.

Para efeito de comparação, a Bacia do Paraná responde a 23%, a do Tocantins 10% e a do São Francisco 10%. Contudo, apenas 63% do potencial foi inventariado. A Região Norte, em especial, tem um grande potencial ainda a ser explorado (Brasil, 2007b). A contribuição da pesquisa é vinculada à possibilidade clara de se integrar as diversas atividades das etapas de implantação de uma hidrelétrica.

A forma cíclica disposta em componentes proporciona essa dinâmica e flexibilidade, e atende a rápida evolução tecnológica e ao mesmo tempo os acelerados impactos antrópicos associados aos empreendimentos hidrelétricos.

Essa pesquisa terá como base três práticas apresentadas na Figura 1.1, incluindo os seguintes trabalhos: *Framework of Water Quality Monitoring - National Water Quality Monitoring Council - NWWMC / USA*; *Monitoring Cycle - UN/ECE* e *The Closed-Loop* (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.

Esta entidade, desde 1996, agrupou diversas experiências e demonstra que atividades como: campanhas de campo, mapeamento, análises laboratoriais entre outras são mais bem racionalizadas com a elaboração de um projeto de monitoramento customizado para as especificidades de cada empreendimento. Esses trabalhos de Monitoramento e Avaliação podem ser encontrados em documentos como:

- National Water Quality Monitoring Council (NWQMC, 2019).
- UN/ECE Task Force on Monitoring & Assessment (UN/ECE, 2000).
- The Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and the Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ANZECC & ARMCANZ, 2000).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, 2003).
- Outros autores: MacDonald (1994); Sanders *et al.* (1983); Ward *et al.* (1990).

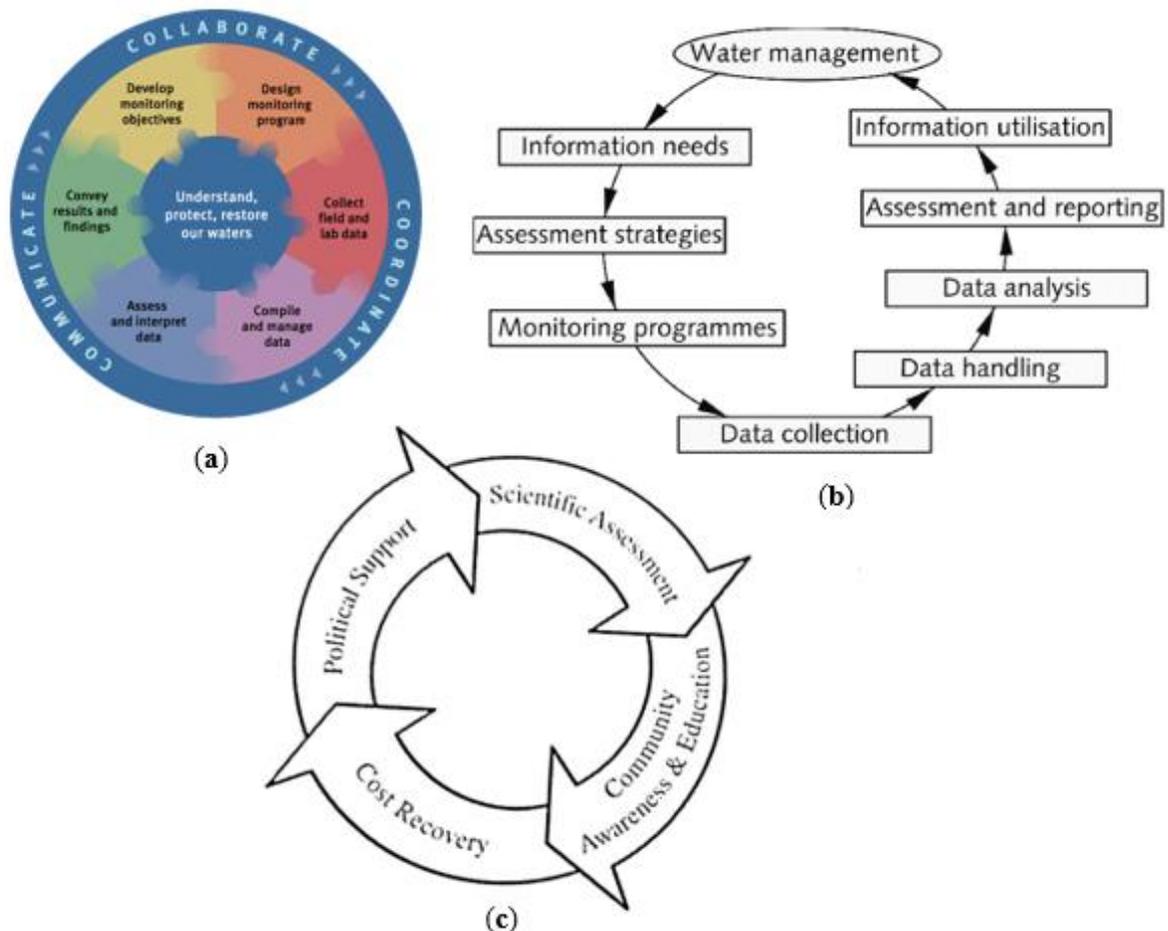


Figura 1. 1. Três estratégias metodológicas de monitoramento e avaliação, consideradas como bases para a presente pesquisa. **a** - *Framework for Water Quality Monitoring* (NWQMC, 2019); **b** - *Monitoring Cycle* (UN/ECE, 2000); e **c** - *The Closed-Loop Watershed Health Monitoring Model* (Jones *et al.*, 2002).

Neste contexto, esta pesquisa propõe avaliar o fluxo subterrâneo com base em um monitoramento direcionado para o levantamento do regime hidrogeológico, antes e depois do estabelecimento do barramento, com a aplicação do processo de modelagem matemática (quando viável), como também verificação para cada fase de estudo de implantação de uma UHE (inventário, viabilidade e projetos).

São notórias as diversas exigências dos órgãos fiscalizadores na elaboração de relatórios de avaliação, entretanto, alguns questionamentos na área em monitoramento e avaliação incluem:

- Como se pode ter convicção de que as informações necessárias são providas?
- É necessário coletar mais dados (menor periodicidade)?
- Como se esquivar de rotinas rígidas e viciadas em busca de um aperfeiçoamento nas análises dos dados, interpretação e divulgação das informações?
- O conjunto de dados obtidos é suficiente e realmente necessário para se alcançar os objetivos pretendidos?

Somado a isso, o conhecimento que será adquirido, possibilitará consubstanciar as ações de emergência e inspeção de segurança do barramento, útil para os novos procedimentos de gestão de recursos hídricos no Brasil, como também, melhoria no atendimento das exigências ambientais, devido ao surgimento do reservatório, e realizações de estudos econômicos mais precisos.

1.3. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é propor uma estratégia metodológica de um projeto de monitoramento e avaliação, a fim de suprir as necessidades de dados e informações. Assim, será possível atender de forma efetiva e eficiente às demandas da gestão hidrogeológica na implantação e em revisões dos projetos hidrelétricos, com especial atenção aos desenvolvidos e a serem desenvolvidos na Amazônia.

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- Propor um ciclo de integração das ferramentas e instrumentos utilizados no monitoramento e avaliação de questões hidrogeológicas nas etapas de implantação de uma usina hidrelétrica. Assim, será possível subsidiar a seleção de áreas potenciais para barramentos em projetos futuros ou mesmo auxiliar a revisão dos projetos existentes;
- Levantar o estado da arte das atividades de monitoramento e avaliação no âmbito nacional e internacional;
- Organizar os critérios e tarefas em componente do monitoramento e avaliação;
- Especificar pontos de integração da hidrogeologia com atividades da hidrologia e hidráulica superficial;
- Apresentar técnicas e normas para a construção de poços de monitoramento e avaliação em hidrogeologia;
- Levantar impactos ambientais causados pela elevação do nível.

1.4. Materiais e Métodos

Esta pesquisa deverá seguir etapas de atividades sequenciais esquematizadas no fluxograma apresentado na Figura 1.2. As etapas incluem:

- Escolha do tema em que foram trabalhadas a formulação da hipótese, definição de objetivos e levantamento do referencial teórico (EIA/RIMA/PBA, artigos, livros e dissertações);
- Avaliação dos impactos ambientais, da implantação do sistema barragem e reservatório hidrelétrico na dinâmica e qualidade das águas subterrâneas;
- Avaliação das práticas de monitoramento em âmbito nacional e internacional;
- Seleção de sistemáticas e respectivas formulações matemáticas, para utilização em estudos de prognósticos de elevação do nível freático induzida pela instalação de reservatórios.

Essa estratégia metodológica complementa outras que demonstram a necessidade de integrar diversas tarefas sequencialmente, como é visto no trabalho de Magrini (1992) e Albuquerque Filho (2002), que apresentam um esquema para a elaboração da avaliação de impacto ambiental de projetos hidrelétricos envolvendo monitoramento.

As atividades propostas para a pesquisa são: revisão da literatura, preparação da proposta de pesquisa (analisar e comparar estudos para avaliação dos benefícios gerados pelo projeto de monitoramento e avaliação), contatos com diferentes profissionais, capacitação, visitas ao campo, apresentações em eventos e elaboração da tese de doutorado.

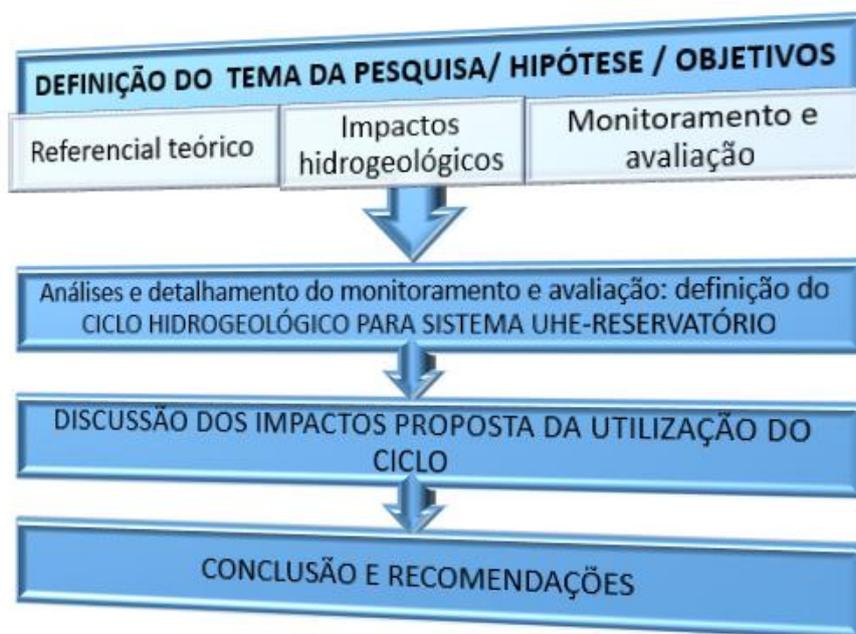


Figura 1. 2. Principais atividades e etapas de desenvolvimento da pesquisa.

Na visão funcional os componentes do ciclo de monitoramento e avaliação se destacam:

- **Informações Necessárias e Estratégias de Avaliação:** representam os objetivos específicos a serem alcançados.

- **Programas de Monitoramento e Coleta de Dados:** componente de importância particular para o contexto da pesquisa. Trata-se do estabelecimento de uma estratégia metodológica e critérios de integração das ferramentas de monitoramento e modelagem.

A coleta de amostras com seus guias, práticas e técnicas amplamente conhecidos não fazem parte desta pesquisa. Instrumentos com capacidade, além dos requisitos necessários para o monitoramento, não devem ser recomendados (Santos *et al.*, 2001).

- **Manuseio e 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.

A Agência Nacional de Águas realiza a consistência de dados com o objetivo de identificar e corrigir erros e preencher vazios nas suas séries por meio de diversos métodos (por exemplo: método da ponderação regional e da regressão linear). Poderão ser realizadas análises de escassez do número de estações que seriam necessárias segundo o planejamento que atenda a gestão hidrogeológica.

Uma possibilidade é considerar o planejamento de uma rede mínima de estações de monitoramento hidroclimatológico que é realizada conforme níveis de precisão preestabelecidos.

As variáveis de projeto utilizadas no planejamento, controle e gerenciamento dos recursos hídricos (com destaque para as hidrogeológicas) podem ser perfeitamente caracterizadas em qualquer ponto da bacia hidrográfica (e hidrogeológica), por meio indireto, através de correlação e regionalização.

A rede mínima implica no conceito de rede primária e secundária. A primária, coleta dados por longos períodos e os postos de monitoramento são estabelecidos em locais de grande representatividade.

As estações secundárias são instaladas em locais selecionados e monitorados por um tempo determinado, de forma a permitir que se estabeleçam correlações com a rede primária, após o que serão removidas e reinstaladas em outros locais (Mongin, 1998).

O levantamento de informações e variáveis hidrogeológicas deve considerar, dentre outras fontes de informações, os dados disponíveis no Sistema de Informações Sobre Águas Subterrâneas (SIAGAS) mantido pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

- **Relatórios e Utilização da Informação:** devem ser vistos como o meio de interconexão de representação das informações necessárias e exibição dos resultados do ciclo de integração.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Evolução do Processo de Monitoramento de Água Subterrânea

Aos profissionais da área de hidrogeologia cabe subsidiar os tomadores de decisão na gestão de recursos hídricos e sempre de posse de resultados de monitoramento e avaliação e de informações sobre as águas subterrâneas.

No que tange as usinas hidrelétricas, esses subsídios podem ser solicitados nas etapas de estudos desse tipo de empreendimento que inclui as fases de inventário, avaliação, projeto, construção/implantação e operação e manutenção do sistema barragem-reservatório.

Devido à complexidade associada a esta questão, é importante apresentar a natureza evolutiva do monitoramento de assuntos relativos à água subterrânea. Não podem ser considerados casos exclusivos da hidrogeologia, devem ser integrados as demais questões ambientais estabelecidas ao longo do tempo pelas exigências legislativas.

Importante destacar que os estudos científicos em usinas hidrelétricas foram percussores do surgimento da legislação, que servem como modelos. Por outro lado, parte da evolução científica nacional sobre questões hidrogeológicas, é devido os trabalhos aplicados nesses empreendimentos.

No Brasil a tarefa de análise de dados hidrogeológicos e hidrológicos ainda é difícil e normalmente ocorre apenas em áreas específicas em função do tipo de empreendimento (atividade de mineração, usinas hidrelétricas, complexos industriais etc.).

Na primeira metade do século XIX os trabalhos de hidrologia de águas subterrâneas foram realizados quase sempre a partir de viagens de reconhecimento regional. Já na segunda parte desse século, com o desenvolvimento de empresas e ampliação dos corpos técnicos em universidades, os trabalhos técnicos foram expandidos e o conhecimento dos aquíferos ampliado.

Albuquerque Filho *et al.* (2004) descrevem que a percepção, a valorização e a preocupação com o problema dos impactos hidrogeológicos de reservatórios, surgiram no estado de São Paulo. Tais processos foram observados a partir de solicitações ou depoimentos isolados, porém frequentes, o que inclui: subida de nível d'água em cacimbas, encharcamentos de terrenos, afogamento de fossas sépticas ou negras, desmoronamentos de poços, dentre outros.

No caso dos Estados Unidos, a necessidade de ampliar o conceito do monitoramento surgiu a partir da pressão pela gestão de recursos hídricos no início do século XX, com o propósito de manter os cursos d'água livres de resíduos flutuantes e odores para viabilizar a navegação, o que levou à elaboração das primeiras leis com este objetivo.

A relação da qualidade da água com a saúde pública também influenciou na proposição da legislação dos Estados Unidos por meio da US EPA (agência de proteção ambiental americana), bem como o controle da poluição.

Essas legislações iniciaram na década de 1930, onde leis federais foram estabelecidas, embora muitos estados já tivessem as suas próprias. Em 1965, a legislação focou em gestão da qualidade da água em águas superficiais e demandou que os estados iniciassem seus trabalhos de monitoramento.

Na década de 1970, as primeiras questões sobre o uso das informações foram levantadas. Durante meados dessa década, a quantidade e qualidade da água no ciclo hidrológico atraiu a atenção da sociedade e novas leis focaram na qualidade da água para abastecimento humano, qualidade da água subterrânea e das chuvas ácidas.

Nos anos de 1980 houve um esforço para a redução de pontos de amostragem e novas questões surgiram, o que provocou o melhor entendimento dos motivos das exigências da legislação. Também nessa década, o Conselho de Qualidade do Meio Ambiente dos EUA chamou atenção para mais coordenação no monitoramento de qualidade da água, aludindo que há uma quantidade demasiada de dados e insuficiência de informações (Ward *et al.*, 1990).

Várias solicitações de melhoras sugeriram de diversas entidades, tanto legislativas quanto técnicas, tais como: melhoria do projeto de sistema de monitoramento e necessidade de avaliação das tendências. Estes questionamentos apontaram que as informações ao longo do tempo são essenciais para os tomadores de decisão e mostraram a restrita quantidade de projetos de monitoramentos sistemáticos.

Em 1987 a EPA elaborou uma estratégia para iniciar o monitoramento de águas superficiais, cujo objetivo era a geração de informação e melhoria do projeto de monitoramento. Quando o comportamento d'água é mais bem compreendido, novas questões surgem requerendo modificações no projeto do sistema (Bloem & Glicker, 1989).

Por fim, Ward *et al.* (1990) mostram que o monitoramento nos EUA surgiu com as imposições das leis dos anos 1960. Os autores comentam que, apesar da elaboração da lei de exigência do monitoramento, não explicava porque era obrigatório ou como seria realizado, levando os profissionais a “aprender fazendo”. Desta forma, com o conhecimento adquirido, eram identificadas as falhas e assim, iniciados novos procedimentos nos projetos de monitoramento.

2.2. Definições e Tipos de Monitoramento

Um exemplo interessante foi o ocorrido em 1980 na Califórnia, em que foi descobertas contaminações por TCE (tricloroetileno) e PCE (tetracloroetileno,) que levaram à interdição de 20 poços num raio de 10 km (Feitosa *et al.*, 2008).

Entretanto, o termo monitoramento, de maneira geral, é usado para fazer uma simples amostragem ou para centenas delas. Também pode ser aplicado na prática de monitoramento permanente para caracterização dos aquíferos. Fica evidente a possibilidade de vulgarização de tão importante atividade. A disponibilidade de tecnologia deve ser utilizada da melhor forma para não levar um desserviço à sociedade.

De maneira geral, existem muitas formas de monitoramento dos aquíferos e das águas subterrâneas. Para se aperfeiçoar as atividades de monitoramento e avaliação de águas subterrâneas e proporcionar maior sustentabilidade aos projetos, estes sistemas serão definidos pelo fim que proporcionam.

Esses processos podem ser categorizados a partir de diferentes pontos de vistas, o que inclui: extensão da vida do projeto do sistema de monitoramento e avaliação; tipos de medições a serem realizadas; localização da água no ciclo hidrológico; e tipo de ferramenta de gestão de água subterrânea a ser suportada.

Quanto a extensão, o monitoramento, em geral, seguem o esquema geral utilizado pelas medições em hidrogeologia, qualidade da água no aquífero, variações sazonais dos níveis d'água e medições de vazões.

Os tipos de monitoramento podem ser enquadrados numa visão macro em parâmetros físicos, químicos ou biológicos. Existindo subclassificações que oportunamente serão comentadas neste trabalho.

Com relação à localização da água no ciclo hidrológico, podem ser consideradas as medições na atmosfera, nos sistemas de águas superficiais e nos aquíferos climatológico, hidrológico hidrogeológico, respectivamente).

O tipo de ferramenta de gestão deve se referir ao objeto do monitoramento. Pode ser aplicado à emissão de outorga de direito de uso, à mudança da qualidade da água pela ação antrópica, por mudanças de níveis devido ao bombeamento, às inversões de fluxo, dentre várias outras.

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

- Monitoramento: 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: 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.

A Resolução CONAMA Nº 01 trata de impacto ambiental no Brasil. Contudo, não deixa explícito, no conjunto de atividades consideradas modificadoras, todas as possibilidades impactantes, devido ao empreendimento de uma usina hidrelétrica.

Essa Resolução foi complementada ainda no ano de 1986 (MMA, 1999), em relação aos tipos de atividades modificadoras do meio ambiente que deveriam ser submetidas ao Processo de Avaliação de Impacto Ambiental. As atividades mínimas exigidas para o Estudo de Impacto Ambiental - EIA, compreendem os seguintes itens (Brasil, 1986):

- Diagnóstico ambiental completo da área de influência do projeto, considerando-se os componentes meio físico, biológico e socioeconômico e suas inter-relações;
- Análise qualitativa e quantitativa, espacial e temporal e possíveis decorrências;
- Definição e avaliação da eficiência de medidas mitigadoras;
- Elaboração de programas de acompanhamento e monitoramento dos impactos.

Como apresentado no item 1.2, referente à justificativa da pesquisa, três estudos de monitoramento e avaliação serão considerados neste trabalho. O “*The Closed-Loop Watershed Health Monitoring Model*” que ressalta que o sucesso dos programas de monitoramento depende de quatro componentes inter-relacionados: suporte político, avaliação científica, consciência da comunidade e mecanismo de recuperação de custos de longo prazo (Jones *et al.* 2002).

Esse modelo propõe que a avaliação das águas e da bacia hidrográfica tenha como base trabalhos colaborativos e que as atividades sejam por métodos e coleta de dados compatíveis para se viabilizar sua comparabilidade. Assim, os resultados tendem a ser mais precisos e, estabelecidos de forma efetiva e eficiente.

Os outros dois, da UN/ECE e do NWQMC, destacam fatores tais como: diferenças críticas nos projetos de monitoramento e avaliação entre os participantes, importância de protocolo nas amostragens e nos métodos analíticos e necessidade de melhor gestão e acessibilidade aos dados.

2.3. Modelos Previsionais de Elevação do Nível Freático

A seguir são apresentados modelos apresentados por Albuquerque Filho (2002). Sistemática de Reed e Bedinger considerara que a forma e a posição do nível freático na porção saturada de um aquífero livre compreendem a soma de dois componentes: o primeiro, basal o qual denominaram de componente do limite de carga hidráulica natural. E o outro, superior, foi chamado de componente da carga hidráulica por elevação.

Segundo os autores da sistemática, a componente basal pode ser determinada por meio elétrico-analógico. As elevações do nível freático, por sua vez podem ser determinadas por intermédio de medições pós-enchimento, a partir de cálculos gráficos, efetuados descontando-se dos valores da primeira componente (Equação 2.1).

Equação 2.1:

$$\Delta h = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x F(y) dz}{x^2 + (z - y)^2}$$

$$\Delta h = \frac{1}{\pi} \left[\left(H - \frac{Hy}{a} \right) \left(\arctan \frac{a - y}{x} + \arctan \frac{y}{x} \right) + \frac{Hx}{2a} \ln \left(\frac{x^2 + y^2}{x^2 + (k - y)^2} \right) \right], \text{ onde:}$$

Δh = variação de carga hidráulica do aquífero;

$F(y)$ = variação na cota do nível d'água ao longo do limite do curso d'água/reservatório;

y = distância ao longo do curso d'água/reservatório;

x = distância perpendicular desde a borda do curso d'água/reservatório;

z = variável de integração;

a = extensão da represa (L).

A Figura 2.1 mostra as variáveis da equação e como são apresentadas no reservatório.

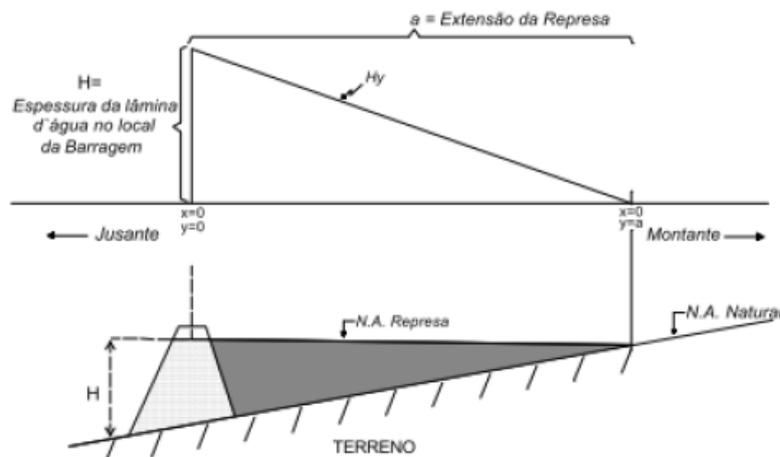


Figura 2. 1. Variação da espessura da lâmina d'água ao longo do rio após o barramento, segundo seção longitudinal à borda do reservatório. Condições de contorno $F(y) = 0$ se $y < 0$ ou $y > a$ e $F(y) = H - Hy/a$, se $0 < y < a$. (Albuquerque Filho, 2002).

Para aplicação devem-se considerar as seguintes premissas:

- O sistema de fluxo se encontra em equilíbrio (fluxo estacionário);
- A recarga se dá a partir da precipitação pluviométrica;
- A descarga ocorre pela evapotranspiração e escoamento de base;
- A exploração de água através de poços deve ser conhecida;
- Quando não retilíneos os canais dos rios poderão resultar em erro se for aplicada em área com meandros. Os erros são minimizados à medida que se afasta da margem do reservatório.

Reed e Bedinger descreveram uma equação para estimar variações de carga hidráulica no aquífero semi-infinito ou extensivo, adjacente a reservatórios. Assim, para o cálculo das elevações no nível freático, considera-se que a variação no nível d'água do rio, após o barramento e no rumo montante, a partir do corpo da barragem, tem comportamento aproximadamente linear.

Essa variação linear na lâmina d'água, resultante do enchimento do reservatório, decresce continuamente ao longo de todo o canal do curso d'água até o extremo do lago formado, quando atinge o valor nulo.

As amplitudes de ascensão no nível d'água para distintos pontos no aquífero adjacente são calculadas a partir de formulações propostas e em função da altura da lâmina d'água resultante em cada ponto da margem do reservatório, da distância do ponto em relação à barragem e a partir da borda do lago.

Medovar e Akhmeteya citam que a percolação da água dos reservatórios, alimenta e cria outros aquíferos podendo, inclusive, superar o volume d'água do reservatório superficial represado pela barragem. Ressalva-se que, a água infiltrada não significa perda d'água do reservatório, e sim, uma zona saturada artificial que poderá ser utilizada para abastecimento e irrigação.

Cruz e Versiani constataram que reservatórios condicionam uma nova posição do nível de descarga do aquífero livre acima do nível freático. Quando há infiltração e armazenamento nos bancos laterais e trocas de água reservatório-aquífero há elevação no nível freático regional. Com isso ocorre o surgimento de novas nascentes, zonas úmidas e problemas de drenagem.

Desta forma, para efeito de cálculo estes autores propõem usar a nova espessura saturada para o determinar a transmissividade do aquífero, como também o uso do coeficiente de armazenamento para o cálculo da difusividade hidráulica.

Guo, 1997 propôs uma solução analítica sob as condições em que o movimento da água subterrânea é descrito pela equação não-linear de Boussinesq, e que as soluções analíticas para esta são limitadas a alguns casos.

Um destes casos tem como prerrogativa as hipóteses de Dupuit-Forchheimer, e inclui: que não existem poços de bombeamento ou de injeção de água no aquífero; que a recarga ou evapotranspiração são desprezíveis; que a reposição de água no aquífero é instantânea a partir do nível de água; que o aquífero homogêneo e isotrópico; que não existe de face de umedecimento ao longo da parede do reservatório; que a base do aquífero horizontal; e que a franja capilar é negligenciável.

Lockington (1997) descreve que o fluxo d'água subterrânea em um aquífero livre pode ser modelada pela equação não-linear de Boussinesq, assumindo as hipóteses simplificativas de Dupuit para fluxo horizontal.

Dessa forma, propôs a utilização de método residual ponderado para solucionar a equação unidimensional de Boussinesq, tanto para recarga, como extração de água de aquífero livre, homogêneo e de extensão semi-infinita e apresenta equações algébricas para estimativa de recargas, descargas e para determinar a posição do nível freático ao largo de drenos totalmente penetrantes no meio aquífero.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) estuda a avaliação de impactos hidrogeológicos de reservatórios e utiliza técnicas para caracterização quantitativa da distribuição espacial e temporal das elevações induzidas do nível freático do aquífero livre adjacente, e representar cartograficamente áreas ou zonas atingidas, com suas respectivas magnitudes dos efeitos.

Albuquerque Filho (2002) menciona que, o IPT utiliza três formas de abordagem, que contemplam complexidades diferenciadas e níveis de precisão distintos, sendo:

- Mapa do potencial de influência do preenchimento do reservatório sobre o aquífero livre adjacente;
- Cálculo das elevações do nível d'água do aquífero livre nas margens do reservatório;
- Modelagem matemática das elevações induzidas.

O poço de monitoramento de fundo cego é o mais indicado para situações em que a oscilação sazonal do nível freático compromete a coleta, por falta de água no interior do poço (Feitosa *et al.*, 2008).

O sucesso do monitoramento depende da seleção adequada dos pontos e do número de poços, considerando as condições de vulnerabilidade, focos de contaminação, propriedades dos contaminantes, regime de fluxo e características químicas da água.

É comum local poços próximos e a jusante das fontes de poluição, sem considerar a direção do fluxo subterrâneo e a evolução diferenciada da pluma para contaminantes específicos, como no caso dos compostos orgânicos.

Em função da dinâmica do fluxo, para fins de qualidade, a frequência de coleta deve ser, ao menos, semestral no aquífero livre, anual, no confinado e mensal em zonas piloto. É importante avaliar a entrada dos poluentes através do próprio poço, por infiltração de água superficial contaminada ou migração vertical de água ao longo do espaço anelar selado.

Cada poço de monitoramento deve ser registrado em fichas apropriadas contendo informações sobre localização, condições físicas e hidrogeológicas, fontes de poluentes, uso da água, dados da extração e coleta, medidas *in situ* etc.

O poço de monitoramento é mais eficiente para detectar contaminação nas suas proximidades. Em áreas mais extensas, a rede de monitoramento deve estar direcionada para as fontes dispersas ou multipontuais, nas áreas de maior risco de contaminação ou com mananciais importantes, e deve considerar os objetivos e as limitações técnicas e financeiras.

Na interpretação dos resultados é importante reconhecer algumas particularidades como:

- Em aquíferos freáticos é frequente desconsiderar a capacidade de atenuação natural da zona não saturada. O movimento horizontal do fluxo é tratado com exclusividade, admitindo-se que as zonas de recarga com fluxo vertical multifásico ocorrem apenas localmente;
- A extração nos poços pode induzir a mistura de águas provenientes do fluxo profundo, ascendente, com constituintes, às vezes, mais tóxicos que aqueles trazidos pelas águas de infiltração ou de recarga local.

A ausência de anomalias hidroquímicas não significa, necessariamente, a ausência de comprometimento da água. Por exemplo, nos sistemas não confinados, a qualidade da água de infiltração e o quadro climático alteram a origem natural dos constituintes. Por outro lado, o efeito de uma recarga rápida pode promover mudanças na direção da pluma.

2.4 Caracterização dos Aquíferos

Segundo Feitosa *et al.* (2008) a caracterização dos aquíferos pode ser geral, para análise de viabilidade ou de detalhamento. Essa divisão vem ao encontro das etapas de estudos de implantação de usinas hidrelétricas.

A caracterização geral visa uma primeira descrição e enquadramento dos aquíferos e envolvem trabalhos de campo, inventariando pontos d'água nos diversos ambientes presentes na região de estudo.

Além dos pontos d'água devem se obter dados de testes de aquífero, realização de ensaios de infiltração *in situ*, cadastramento de trincas e rachaduras em eventuais estruturas existentes (prédios institucionais, residências etc.), cadastramento das áreas de risco e análise química das águas (Campos, 2017 e Lousada & Campos, 2005).

Juntamente com dados e informações secundárias, esse primeiro levantamento hidrogeológico é expresso sob a forma de mapas litológicos, estruturais, potenciométricos, de isópacas dos aquíferos, de concentrações iônicas, entre outros.

Em geral, em estudos de reconhecimento são utilizadas as bases geológicas existentes e feitas saídas de campo para esclarecimento de questões julgadas importantes e detalhamentos das áreas de maior interesse (Feitosa *et al.*, 2008).

Por outro lado, nas etapas de projeto e execução os estudos mais detalhados são necessários e incluem as áreas de núcleos urbanos e rurais, industriais, uso do solo, entre outros.

Adicionalmente, pode haver a necessidade de utilização de recursos para a definição mais segura do objetivo desejado como: inclusão de estudos geofísicos de detalhe, instalação de poços de monitoramento, piezômetros, poços exploratórios etc. Essas atividades estão relacionadas com o tipo de aquífero estudado.

A primeira parte está relacionada com a confirmação de modelo conceitual. Lousada & Campos (2005) sugerem a aplicação de estudos hidrogeológicos, hidroquímicos e hidrológicos. Os autores destacam para avaliação química isotópica os elementos $d^{18}O$, Deutério, CFCs, Trítio e ^{14}C ; estudos de monitoramentos com medições automáticas dos níveis potenciométricos em poços especificamente construídos; aplicação de estudos de traçadores químicos e monitoramento hidrológico de bacias preservadas.

Um estudo foi realizado no trabalho de Campos (2017) em que a evolução do nível freático é verificada para avaliação de risco geotécnico na Via do Retiro e Paranã - TO. As variáveis hidrodinâmicas e dimensionais incluindo: porosidade, transmissividade, condutividade hidráulica, e coeficiente de armazenamento que foram utilizados para definição dos quatro sistemas aquíferos, tendo sido obtidos por diferentes metodologias de estudo.

A construção dos poços de monitoramento segundo as normas é fundamental para que os dados obtidos do monitoramento ou de ensaios desenvolvidos em sua estrutura sejam realistas. Nesse estudo, para tratamento de dados sugere-se utilização de planilhas eletrônicas do programa Microsoft Excel, incluindo os métodos da vazão, Hvorslev e Bouwer & Rice.

Os aquíferos podem ser classificados de acordo com a pressão das águas nas suas superfícies limítrofes e, também, em função da capacidade de transmissão de água dessas respectivas camadas. Em relação à pressão, os aquíferos podem ser classificados em: confinados e livres.

Aquíferos livres, também chamados de freáticos ou não confinados, são aqueles cujo limite superior é a superfície de saturação ou freática na qual todos os pontos se encontram à pressão atmosférica.

As áreas de recarga dos aquíferos confinados correspondem a aquíferos livres, através dos quais os excessos de água de precipitação conseguem penetrar por infiltração.

Os aquíferos confinados por camadas denominadas de aquitardes se classificam em drenantes (quando há contribuição de água armazenada na camada confinante) e não drenante (quando não há contribuição do aquitarde).

Métodos para estabelecimento de modelos conceituais e obtenção de variáveis hidrodinâmicas incluem: teste de bombeamento, (método de Hvorslev, teste escalonados ou de recuperação), curvas granulométricas (método de Hazen), ensaios *in situ*, (para zonas saturadas e não saturadas: em cava, perda d'água sob pressão).

Um dos ensaios mais comuns realizados na zona saturada inclui o conjunto o *Slug* e *Bail test*. São geralmente utilizados em monitoramento, onde é feito um estímulo instantâneo de mudança de nível do aquífero e observa-se o retorno ao nível estático.

Esse estímulo pode ser por meio de bombeamento ou introdução de água no poço. No desenvolvimento do teste tipo *Slug* o nível é elevado e no do tipo *Bail* e rebaixado.

Os valores de condutividade hidráulica podem ser classificados em função de intervalos de ordem de grandeza (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Tabela 2. 1. Classificação de materiais de acordo com os valores de condutividade hidráulica (K) adaptado de Freeze & Cherry (2017) e Fetter (2001).

K (m/s)	Magnitude	Exemplos de material
$> 10^{-4}$	Muito Alta	Cascalho clasto-suportado / Fratura com abertura > 1 mm.
10^{-4} a 10^{-5}	Alta	Arenito grosso, puro e bem selecionado / Fratura com abertura de 0,5 a 1 mm
10^{-5} a 10^{-6}	Moderada	Arenito fino a médio, com pequena quantidade de matriz / Fratura com abertura $< 0,5$ mm
10^{-6} a 10^{-7}	Baixa	Siltito pouco fraturado / Gravaca / arenito cimentado / Fratura com abertura submilimétrica
$< 10^{-7}$	Muito Baixa	Siltito argiloso / solos argilosos em estruturação / Folhelho

Os equipamentos e aparelhos utilizados para aquisição de dados utilizando *Slug Test* são apresentados na Figura 2.2.



Figura 2. 2. Medidor de nível para medição manual do NF e transdutor de pressão (*diver*) para medições automáticas do NF.

2.4.1. Modelagem dos Aquíferos

Os modelos conceituais compõem uma simplificação das condições naturais de circulação das águas ou representam o entendimento das condições hidrogeológicas sobre bases tridimensionais.

Dessa forma, é possível explicar de forma didática o comportamento dos fluidos em subsuperfície, de tal maneira que apresentam subsídios para o conhecimento dos aquíferos e para sua gestão (Rosen & LeGran, 2000)

De modo geral, os modelos matemáticos são subsidiados pelos conceituais (Lousada & Campos, 2005). Atualmente há uma disponibilidade significativa de modelos matemáticos ou computacionais.

Sistemas cíclicos, aqui apresentado, pretendem auxiliar na seleção do melhor programa hidrogeológico a ser utilizado. Entre os mais comuns podem ser citados o MODFLOW e o FEFLOW, que contam com um grande número de usuários.

Com esses softwares é possível analisar fluxos locais e regionais e simular a distribuição piezométrica, estimar recargas, diferentes fluxos do balanço hídrico. (Diersch, 2014). Também podem ser utilizados para simular a evolução de plumas de poluição nas águas subterrâneas quando dados dos poços, tipos geológicos e flutuação do aquífero são disponíveis.

Entretanto, sua aplicação necessita de uma sequência de atividades como apresentado por Chapra (1997), ou seja, aplicação primária, calibração, confirmação, aplicação gerencial e *post-audit*.

O programa RASA analisa o sistema de escoamento da água subterrânea, que é caracterizado pela área de recarga para o nível freático e descarga da água subterrânea para o rio (San Juan, 2004).

2.4.2. Comportamento Hidroquímico

A hidroquímica é usada para definir a qualidade da água e classificar quanto ao uso (consumo humano, dessedentação animal, irrigação, industrial, piscicultura, aquicultura, recreação e urbano).

As análises de água normalmente utilizadas são físico-químicas, bacteriológicas, microbiológicas, radioativas e ambientais (Feitosa *et al.*, 2008). Além disso, determina-se os constituintes maiores e menores, as propriedades físicas, alcalinidade.

Devem ser verificadas também a demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, carbono orgânico total, hidrocarbonetos totais de petróleo, benzeno, tolueno, etil benzeno, xileno total, carbono orgânico volátil, bifenis policlorinados, fenóis e metais.

Os constituintes são considerados maiores quando comumente atingirem teores superiores a 5 mg/L; menores quando atingirem teores entre 5 e 0,01 mg/L; e traços quando atingirem teores inferiores a 0,01 mg/L (Feitosa *et al.*, 2008).

Após a realização da análise química das águas segue-se a etapa de classificação hidroquímica que pode ser realizada através de técnicas gráficas, como diagramas colunares, radial de Ticket, circulares, triangular simples, de Piper, de Stiff, semilogarítmico de Schoeller, hidrogramas, perfis hidroquímicos e mapas hidroquímicos.

Os padrões de qualidade das águas são definidos pela aplicação a que se destina, como o consumo humano, agricultura, uso industrial e outros usos. Além disso, é importante mencionar a existência dos padrões de referência de qualidade ambiental. Esses padrões são utilizados como referência para proteção da saúde pública e o controle de substâncias potencialmente prejudiciais à saúde do homem (Vargas, 2010).

2.4.3. Informações Necessárias

Neste item as questões envolvem: Quais objetivos técnicos podem ser definidos? E quais dados devem ser coletados? Para prover a informação necessária e ao final, após a conclusão dos componentes do ciclo, utilizá-la.

Alguns exemplos entre essa ligação da informação necessária (objetivos técnicos) e dados a serem coletados definidos em certo nível de detalhamento são ilustrados na Tabela 2.2.

Tabela 2. 2. Exemplos de objetivos técnicos para caracterização do fluxo do sistema de água subterrânea (Uil *et al.*, 1999).

Gestão Hidrogeologia	Informações Necessárias		Dados a serem coletados
Caracterização do sistema de fluxo das águas subterrâneas	Contornos das águas subterrâneas.	- Tendência temporal; - Média anual; - Média da estação úmida; - Média da estação seca.	- Vários anos de níveis de águas subterrânea; - No mínimo um ano, frequentemente.
	Distribuição da qualidade da água subterrânea não perturbada por um ponto de poluição.	- Distribuição do parâmetro macro dentro das águas subterrâneas.	- e.g. Ca, Mg, K, Na, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , NO ₃ , no mínimo uma amostra e campanhas de análises.
	Extração de diferentes aquíferos.	- Extração anual; - Variações na extração.	- Localização, profundidade e extração mensal.

Para essa pesquisa uma minuta a ser desenvolvida é apresentada na Tabela 2.3, onde são indicados os objetivos da gestão hidrogeológica e as respectivas informações técnicas, necessárias e tipos de dados para atender aos objetivos.

Tabela 2. 3. Ligação entre objetivos de gestão e informações necessárias (técnicas).

Objetivos da Gestão	Informações Necessárias		Tipo de Dados
Caracterização do sistema do fluxo da água subterrânea, legislação, problemas.	Caracterização do aquífero	- Livre; - Confinado; - Intergranular; - Fissurado.	- Ensaio hidráulico <i>in situ</i> ; - <i>Slug test</i> .
Atendimento à legislação, classificação qualitativa	Monitoramento qualitativo	- Variáveis a serem analisadas; - Indicadores; - Classificação das águas.	- NO ₃ , Cl ⁻ , Na ⁺ , Mg, pH, Eh; - Medições <i>in situ</i> ; - Piper e outros.
Patologias geotécnicas	Monitoramento de trincas e rachaduras	- Comparação após cruzamento com áreas que sofreram sobrelevação.	- Rachaduras antes do enchimento; - Após o enchimento; - Avaliação da zona capilar.
Saturação de sistemas de saneamento	Mapeamento de fossas	- Cruzamento com áreas que sofreram elevação	- Cadastramento prévio
Risco erosivo e geotécnico	Álgebra de mapas - SIGs.	- Solos; - Declividade; - Uso e cobertura vegetal.	- Profundidade do nível freático; Declividade; Material geotécnico.
Saturação de Cavernas Vadasas	Avaliação de risco em associação com aquíferos cársticos.	- Avaliação da cota de inundação com relação à cota das cavidades vadasas.	- Área inundada; - Faixa marginal que sofreu sobrelevação.
Controle de inundação	Mudança do gradiente hidráulico.	- Em associação com a condutividade hidráulica e porosidade efetiva.	- Levantamento do nível do nível.
Aumento do custo para instalação de infraestrutura urbana	Águas pluviais; Redes de esgotamento sanitário; Cemitérios; Postos de combustíveis.	-	- Levantamento da hidrogeologia.
Processos erosivos em encostas marginais	Ampliação pela elevação da zona de capilaridade.	-	- Estudo da capilaridade.

2.4.4. Estratégias de Monitoramento e Avaliação

As estratégias de monitoramento devem servir como um guia no estabelecimento de prioridades de monitoramento realista, não apenas em termos do que deve ser monitorado e onde, mas também em termos de tempo e financiamento.

Organismos conjuntos devem avaliar periodicamente suas atividades de monitoramento para confirmar se estão atingindo seus objetivos da maneira mais eficaz e econômica (UN/ECE, 2000).

Os programas de monitoramento e avaliação de águas subterrâneas se desenvolverão gradualmente, devido a restrições administrativas, orçamentárias e de pessoal. A alocação de recursos de monitoramento deve seguir uma abordagem feita sob medida.

As áreas de classificação e corte, onde as fontes potenciais de poluição estão localizadas ou onde o uso de água subterrânea é alto, tornarão o programa mais eficaz.

O poço de monitoramento deve ser baseado em informações do sítio investigado e não para se estudar a geologia e a hidrogeologia de uma área (Riyis & Riyis, 2011).

2.4.5. Rede Amostral (Programas de Monitoramento e Coleta de Dados)

Um relatório de construção de poço deve ser elaborado e apresentado junto com o projeto. Para a escolha do diâmetro do poço os objetivos do estudo devem ser previamente especificados (e.g. medição de nível e amostragem de água). Ao fim da obra deve ser integrada as informações da sondagem e da construção do poço de monitoramento.

Nesta etapa, após os objetivos técnicos terem sido estabelecidos, assim como estratégias específicas, uma rede amostral pode ser projetada. O projeto da rede amostral inclui a determinação de itens como:

- A densidade da rede e a locação dos pontos de medição;
- Variáveis de monitoramento e avaliação;
- Tipos de pontos de monitoramento e avaliação;
- A frequência de medição e amostragem.

A Tabela 2.4 apresentam os principais fatores que influenciam na determinação da rede amostral (Chilton *et al.* 1996).

Tabela 2. 4. Fatores que determinam a rede amostral (Chilton *et al.*, 1996 *in*: UN/ECE, 2000).

Ponto de amostragem / medições		Amostragem / frequência de medições	Escolha de variáveis / carga hidráulica
Tipo	Densidade		
Hidrogeologia	Hidrogeologia	Hidrogeologia	Usos da água
-	Geologia	Hidrologia	Questões da qualidade da água
-	Uso do solo	-	Requerimentos estatutário
-	Considerações estatísticas	Considerações estatísticas	
Custo	Custo	Custo	Custo

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 rede amostral (Riyis & Riyis,2011):

- Se não houver dados, o ideal é utilizar um método de *screening*, como os mais eficazes, pode-se citar: *Cone Penetration Test* (CPT), sondagens de simples reconhecimento (SPT), 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 deve-se considerar as seguintes variáveis:

- 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 - I_{fi}
- 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.

Outro problema pode ser o aumento do risco de contaminação devida à diminuição da espessura da zona vadosa com a elevação do nível, resultando em exposição da zona saturada do aquífero. Assim a zona não saturada perde parte de sua capacidade de filtro, facilitando a chegada do contaminante.

Para gerar dados de hidrogeotecnia pode-se utilizar o cruzamento de mapas de materiais geotécnicos, com declividade, com profundidade do nível, para definir áreas com menor ou maior risco de desenvolvimento de processos erosivos ou patologias em edificações.

Para o monitoramento instalam-se poços ou, também, pode optar-se por estruturas existentes como, por exemplo, cisternas.

Como ponto de partida para o trabalho de coleta de dados, é recomendável recorrer, dentre outras, às instituições, que centralizam informações específicas pertinentes às suas áreas de atuação:

2.4.6. Gestão de Dados e Informações (Manuseio e Análise de Dados)

A gestão de dados e informações reúne os últimos componentes do ciclo, ou seja: manuseio de dados, análise de dados, avaliação e relatórios e utilização da informação.

Os dados coletados devem ser comparáveis, disponíveis para integração com as informações de uma variedade de fontes e facilmente agregáveis espacialmente e no tempo.

Dados produzidos pelos programas de monitoramento e avaliação devem ser validados, armazenados e feitos acessíveis. O intuito dessa gestão é converter dados em informações que e contribuir para objetivos associados ao projeto de monitoramento e avaliação (UN/ECE, 2000).

Em critérios gerais, as principais etapas de implantação de empreendimentos hidrelétricos com suas respectivas características são apresentadas na Tabela 2.5.

As informações geológicas e geotécnicas, juntamente com dados cartográficos, hidrometeorológicos, sedimentométricos, socioambientais e de custos, permitem analisar os levantamentos e investigações de campo necessárias para as etapas posteriores, indicar prováveis locais de barramento, propor alternativas de divisão de queda e estimar o potencial energético.

A hidrogeologia é importante para identificação de regiões contíguas semelhantes aos estudos de regionalização onde não há informações suficientes de hidrometeorologia.

Tabela 2. 5. Etapas do Planejamento do setor elétrico (Brasil, 2007a).

Etapas	Características
Estimativa do Potencial Hidrelétrico	Primeira avaliação (feita em escritório) do potencial, do número de locais de barramento, do custo do aproveitamento desse potencial, definição das prioridades, prazos e custos dos estudos de inventário.
Inventário	Determinação do potencial energético da bacia, estabelecendo a melhor divisão de queda e estimativa do custo de cada aproveitamento.
Viabilidade	Definição da concepção global de um dado aproveitamento, incluindo seu dimensionamento e obras de infraestrutura para sua implantação.
Projeto Básico	Definição das obras civis e dos equipamentos permanentes, com vistas às respectivas licitações, adjudicações e construção do empreendimento.
Projeto Executivo / Construção	Detalhamento do projeto básico do aproveitamento para a sua construção e montagem dos equipamentos.

2.5. Monitoramento Hidrogeológico em Usinas Hidrelétricas

A estruturação do programa de monitoramento para cada aquífero ou local selecionado exige que seja feita uma caracterização hidrogeológica a partir da integração, análise e interpretação de dados existentes.

Além disso, deve-se considerar a integração dos dados de monitoramento hidrometeorológico. Neste caso, devem ser incluídas estações existentes no domínio dos aquíferos, juntamente com estudos hidrológicos e climatológicos realizados na região.

A integração e a interpretação dessas informações visam subsidiar a seleção dos locais para o monitoramento, bem como a avaliação da viabilidade de emprego conjunto dos dados das estações fluviométricas e pluviométricas.

A finalidade dessa etapa é interpretar os resultados do monitoramento quanto à representatividade do aquífero nas bacias hidrográficas monitoradas, densidade e localização (Feitosa *et al.*, 2008).

O monitoramento e a avaliação destacam o aspecto hidrogeológico em reservatório de usinas hidrelétricas e tem por objetivo avaliar os processos naturais e modificadores do comportamento das águas subterrâneas na área de influência do futuro reservatório da usina.

Tendo em vista compreender o processo como um todo, a partir das características específicas da área de estudo e do comportamento das águas subterrâneas e do ambiente, em particular aquelas vinculadas ao nível freático.

2.5.1. Instalação dos Poços de Monitoramento

Poços de monitoramento, específicos para a zona saturada, devem ser construídos conforme as normas da ABNT (NBR 13.895). As modalidades de poços mais conhecidas são: escavados (cisternas / cacimbas), a trado, cravados e a jato d'água.

Os poços de monitoramento (Figura 2.3) para os objetivos previstos nesta pesquisa devem permitir levantamento qualitativo, potenciométrico e de caracterização do aquífero.

Os problemas relacionados a instalação e operação de poços de monitoramento incluem: risco de contaminação cruzada, contaminação *in situ*, medição de nível instantâneo e determinação incorreta de parâmetros do aquífero (Figura 2.4).

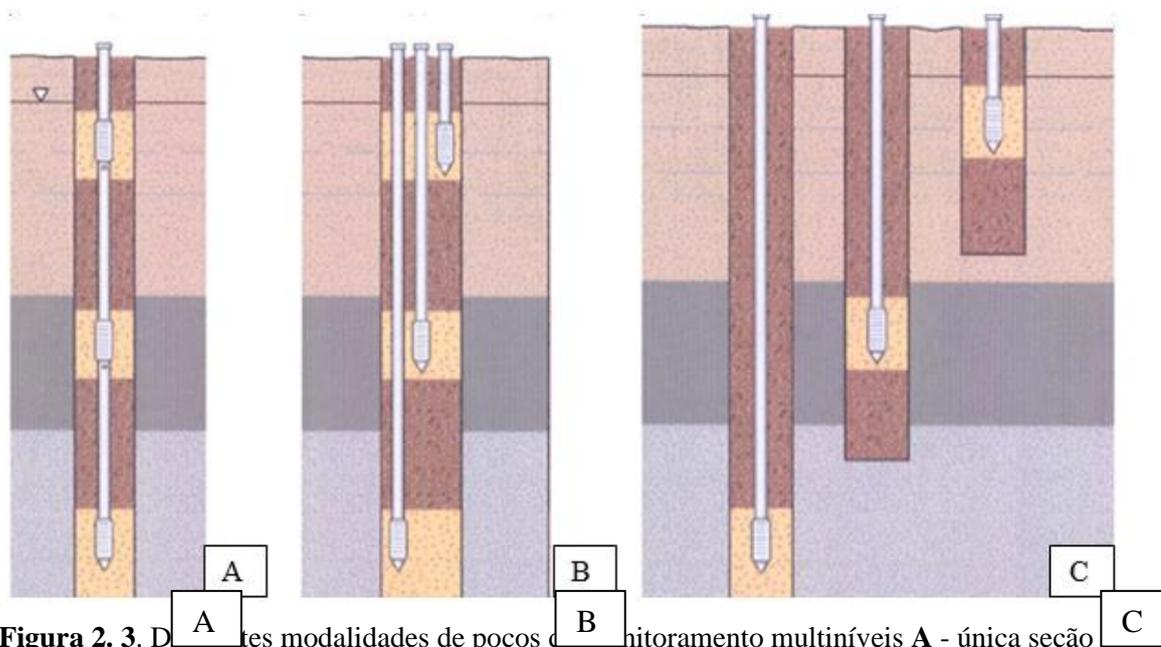


Figura 2. 3. Diferentes modalidades de poços de monitoramento multiníveis **A** - única seção de perfuração com instalação de filtros a diferentes profundidades; **B** - única seção de perfuração com maior diâmetro e instalação de seções de revestimento com filtros a diferentes profundidades e **C** - bateria de poços, com uma seção para cada seção de filtro-revestimento (neste caso, o conjunto dos três poços corresponde a um único ponto de monitoramento do tipo multinível). (Campos, 2017)

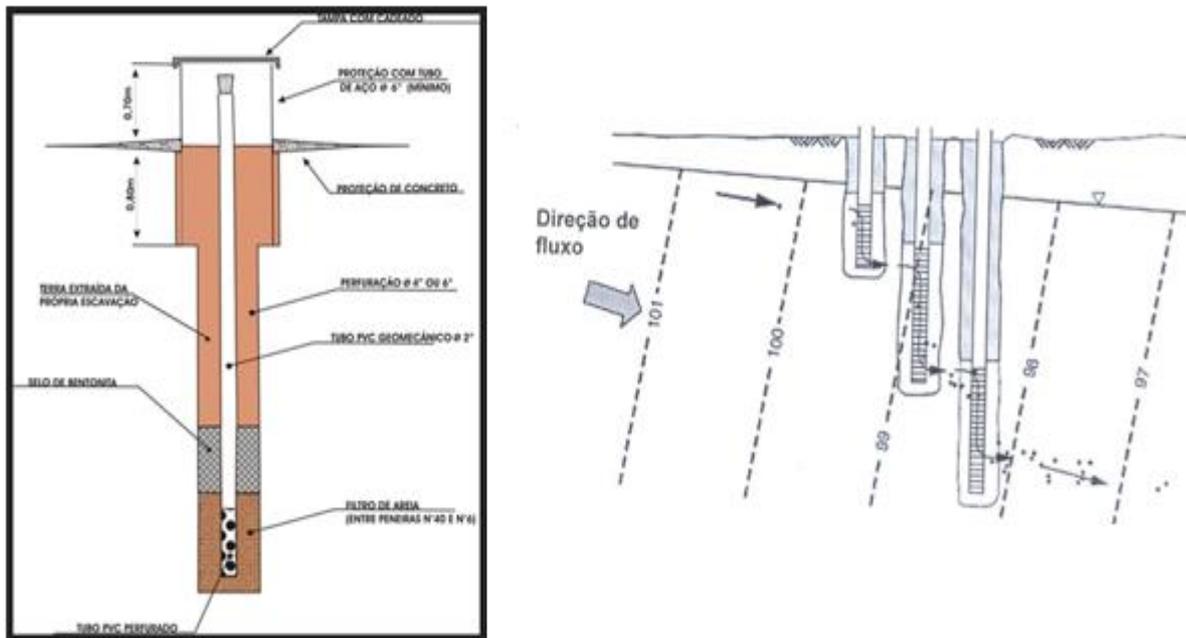


Figura 2. 4. Construção de poços de monitoramento e problemas relacionados a instalação e operação inadequada da rede de poços.

O tipo de poço de monitoramento comum é o de seção filtrante plena, que permite, inclusive, o controle da fase livre móvel de hidrocarbonetos. Os poços multiníveis são adequados para a caracterização tridimensional da pluma ou de variações verticais da hidroquímica e da carga hidráulica, evidenciando estratificação do aquífero.

Aspectos importantes são a locação, proteção e desinfecção desses poços. O revestimento e filtro têm a função de dar suporte estrutural, permitir a entrada d'água e interligar zonas aquíferas. O revestimento é, em geral, de PVC, uma vez que os de aço galvanizado são muito reativos e podem causar contaminação da água.

O isolamento sanitário é essencial para a proteção do poço e, conseqüentemente do aquífero. O ideal é que o espaço anelar seja de 4" a mais que o revestimento para que o material de impermeabilização do espaço anelar entre o revestimento e a parede da perfuração seja facilmente instalado. Pode ser utilizada pasta de cimento, concreto e material argiloso com alto índice de expansão.

O desenvolvimento inclui as seguintes metodologias: pistoneio, jateamento, *air lift*, uso de escova de aço, bombeamento e uso de produtos químicos.

2.5.2. Monitoramento de Níveis

Os equipamentos utilizados para medição do nível estático (NE) e acompanhamento dos níveis dinâmicos (ND) podem ser divididos em medidores manuais e automáticos (Feitosa *et al.*, 2008).

Monitoramento de poços para verificação de nível de aquíferos livres não depende somente dos objetivos do projeto da rede amostral e da variação temporal, mas também dos aspectos como acessibilidade do local, disponibilidade de equipe, campanhas de amostragem, organismos ou instituições responsáveis pelo monitoramento, restrições financeiras entre outros aspectos que serão aprofundados até o final dessa pesquisa.

A boa prática, entretanto, é medir níveis da água subterrânea uma ou duas vezes por mês. Na maioria dos casos, procedimentos de medição manual serão estabelecidos. Operações de controle automático, utilizando dispositivos como transdutores ou conversores de pressão serão previstos nas seguintes situações (Sánchez & Varela, *In*: UN/ECE (2000):

- Aquíferos cársticos, sujeitos às respostas rápidas aos episódios de precipitação;
- Áreas de difícil acesso;
- Poços integrados de abastecimento de água e irrigação em sistemas de operação e controle integrados.

A conexão hidráulica com o reservatório é restrita à faixa marginal do reservatório e a faixa que sofre elevação é função da interação de quatro fatores principais:

- 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.

A Figura 2.5 ilustra como a declividade do terreno funciona de forma inversa a da subida do nível. Observe que em regiões planas as áreas afetadas pela elevação podem superar 200 metros da orla (Ceste & Ambiental Tecnologia, 2013) e em terrenos com maior declividade a faixa afetada é menor.

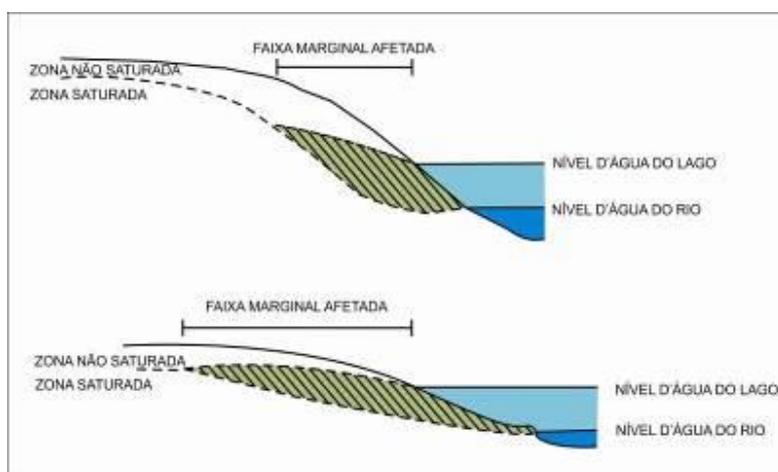


Figura 2. 5. Apresentação gráfica do controle da declividade na determinação da faixa afetada pela elevação artificial do nível freático devido à formação do reservatório (Ceste & Ambiental Tecnologia, 2013).

Idealmente, um sistema de monitoramento e avaliação deveria conter dados prévios ao início de operação do empreendimento, de forma a facilitar a determinação da magnitude da mudança ou do impacto de determinada ação.

Esta afirmação é baseada no modelo de avaliação determinado de “PER” Pressão-Estado-Resposta que aplica o conceito de causalidade em resposta a uma alteração sofrida no meio (Macêdo & Torres, 2018; Carvalho *et al.* 2007; Carvalho *et al.* 2008).

Em uma perspectiva de aplicar conceitualmente este modelo, o “Estado” deve representar a condição natural do parâmetro em análise. A “Pressão” se refere à mudança sofrida a partir de diferentes processos e a “Resposta” as ações para se minimizar ou remediar as alterações sofridas.

De forma mais objetiva, como exemplo pode-se citar a contaminação do aquífero devido à elevação do nível freático, em decorrência da formação de um reservatório de hidrelétrica.

A qualidade da água do aquífero freático, previamente à formação do reservatório, representaria o “Estado”. A diminuição da espessura da zona vadosa, com potencial inversão de fluxo e carreamento de contaminantes, corresponderia à “Pressão”. E as medidas mitigadoras estariam associadas à “resposta”.

Mesmo para casos em que não existam dados prévios sobre o estado natural, o modelo PER pode ser aplicado a partir de métodos próprios. Em caso de análise de eventual contaminação de um aquífero, em que não existam dados de *background* ou de *baseline* sobre a qualidade das águas freáticas, estas informações podem ser obtidas a partir de um sistema com meio físico similar e em seguida aplicadas ao caso concreto.

Por exemplo, um arenito ou solo arenoso, com espessura similar de zona não saturada, com declividade baixa na mesma faixa de isoietas, pode ser considerado o “Estado” para um aquífero aluvionar submetido à elevação do nível freático.

Em outra perspectiva, um aquífero fraturado composto por um granito, por exemplo, pode ser considerado o *background* para sódio e cloreto para um caso similar. Se as concentrações ocorrem na faixa de 10 mg/L e os valores do sistema fora da pressão de modificação indicarem estimativas na faixa de 1 mg/L destes íons, pode-se afirmar que o caso em estudo apresenta modificação a partir de uma “Pressão” externa e deve ser submetido a ações de “Resposta” para sua recuperação aos valores, neste caso, considerados *baseline*.

Além do modelo PER, ainda existem outros que podem ser aplicados para os processos de monitoramento e avaliação para estudos em hidrelétricas. Dentre estes se destacam os modelos: PEIR Pressão-Estado-Impacto-Resposta, empregado pelo Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas e Meio Ambiente (PNUMA); FER Força Motriz- Estado-Resposta, utilizado pela Comissão de Desenvolvimento das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (UNCSD) (Souza & Silva, 2014).

CAPÍTULO 3 - IMPACTOS AMBIENTAIS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

3.1 Ciclo de Monitoramento e Avaliação em Hidrogeologia

A possível comunicação hidráulica do aquífero livre com o reservatório de uma UHE de grande porte é diferente nas zonas superior, média e inferior de uma bacia hidrográfica ou hidrogeológica.

Dessa forma, uma rede amostral assim como as metodologias devem ser adaptadas para essas condições. Importante reforçar que um modelo conceitual da bacia deve ser desenvolvido para que essa interação possa ser considerada (UN/ECE, 2006).

Outro aspecto a ser abordado é que, geralmente, essas bacias onde estão localizados esses reservatórios abrangem diferentes unidades administrativas e geográficas. Portanto, uma visão integradora e de cooperação de forma organizada é imprescindível para se desenvolver um processo de monitoramento e avaliação adequado.

É importante destacar a vulnerabilidade do aquífero tratada nesta pesquisa. Se altas taxas de infiltração são combinadas com alta permeabilidade e pequena capacidade de retardamento de contaminantes, e o aquífero for poluído pela infiltração do contaminante, os poluentes serão rapidamente transportados, o que ocasionará dificuldade em se executar medidas de remediação.

Faz-se necessário, portanto, distinguir as características naturais dos aquíferos e dos rios dos efeitos antropogênicos. Informações de ambos os lados das margens do reservatório serão necessárias, tanto na fase rio quanto após o enchimento do reservatório.

Sendo assim, esta estratégia metodológica proposta pretende organizar as tarefas de monitoramento e avaliação hidrogeológicas para reservatórios hidrelétricos em componentes bem definidos, numa sequência lógica e cíclica (processo passo a passo), dispostas de forma que ao mesmo tempo tenha pré-requisitos, receba *feedback* e tenha conexões com os demais componentes, onde forem pertinentes.

Uns dos pontos interessantes dessa disposição é que os estudos passarão por listas de verificação (*check list*) no momento oportuno e são fundamentais nas atividades de hidrogeologia, sempre levando em consideração o questionamento da disponibilidade profissional e financeira (importante para a região Amazônica).

Um dos destaques dessa proposta é a integração com as diversas disciplinas afins, pois ficará claro onde poderão ser incluídas. Ao final, espera-se atender a busca de trabalhos eficientes, dinâmicos e flexíveis, pois é uma demanda da prática da hidrogeologia moderna.

Ainda melhor, na possibilidade da existência de alguma tarefa fragilizada (ou com uma necessidade de fortalecimento) esta será facilmente identificada.

Dessa forma, mais pesquisadores, profissionais do ramo, em geral, gestores, instituições e órgãos poderão usufruir desse sistema de monitoramento e avaliação, tornando-o sustentável e econômico.

Logo, a informação produzida, baseada em programas de monitoramento, bem organizados, é o pré-requisito para avaliações precisas da situação dos recursos hídricos (superficiais e hidrogeológicos) e o levantamento da magnitude dos problemas.

Neste contexto o monitoramento e avaliação hidrogeológica em reservatórios de UHEs deve começar com a definição das informações necessárias e terminar com o uso das informações produzidas.

Dentro desse contexto a Figura 3.1 apresenta a proposta do Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica em sistema de UHE-reservatório apresentada pela presente pesquisa.

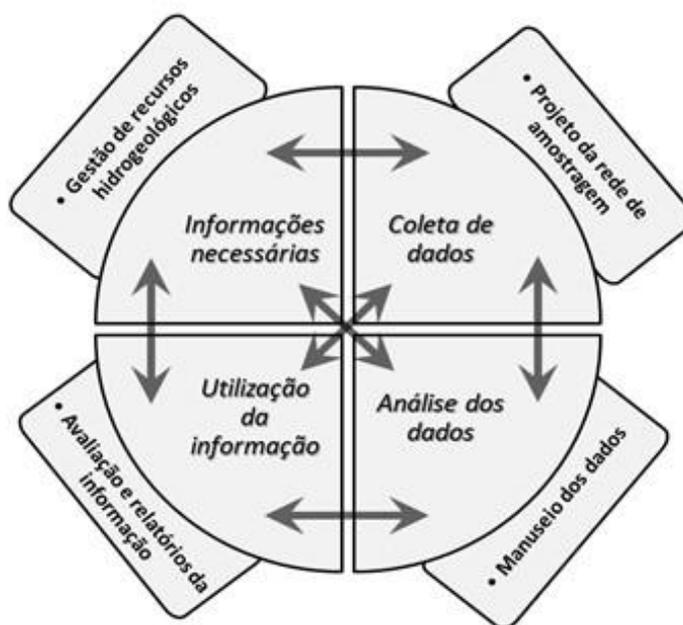


Figura 3. 1. Proposta do Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica em sistemas UHE-reservatório.

Destaca-se que esta pesquisa trata de atividades já estabelecidas pelo EIA/RIMA. Entretanto, com o ciclo proposto (Figura 3.1) um melhor proveito será obtido dessas atividades, principalmente com a implantação de reservatórios a exploração antrópica é exponencial.

Na parte de gestão, as demandas são mais do estilo: detectar alterações do nível freático ou da qualidade ao longo do tempo. Para habilitar a especificação de dados para serem coletados esses objetivos de gestão devem ser traduzidos dentro de “objetivos técnicos”. Esses são formulados quantitativamente como exemplo pode-se citar: “detectar a mudança de 10% ao longo de 5 anos a concentração anual de nitrato com uma precisão de 95%”.

O levantamento de dados e informações necessários permite identificar a Província Hidrogeológica, onde se pode obter as características gerais e estudos comparativos / descritivos com objetivo de estabelecer as prováveis características das grandes ocorrências de água subterrânea (Feitosa *et al.*, 2008)

Yost & Naney (1975) a partir de observações de campo nas circunvizinhanças de barragens de terra instaladas na bacia do rio Washita (Oklahoma, EUA), constataram que a percolação de água subterrânea pode causar ou agravar uma ou mais das condições limitantes para o uso do solo ou dos recursos hídricos.

Albuquerque Filho (2002) sistematizou os impactos associados à formação de reservatórios de água para UHE. Além dos impactos sociais, econômicos e ao meio biótico muitos problemas são associados à formação de lagos para geração hidrelétrica.

A seguir são destacados aqueles direta ou indiretamente vinculados às mudanças induzidas aos aquíferos:

- Contaminação da água subterrânea e superficial quando o reservatório de superfície apresenta águas de baixa qualidade ou contaminadas;
- Afogamento de sistemas de saneamento *in situ* e cemitérios a partir da elevação do topo da zona saturada;
- Perda de captações de recursos hídricos subterrâneos por submersão de poços tubulares;
- Diminuição da proteção dos aquíferos freáticos;
- Diminuição da capacidade de drenagem, devido à redução do gradiente hidráulico;
- Aumento do risco de contaminação das águas subterrâneas por redução da espessura da zona não saturada;
- Aumento de risco geotécnico em edificações existentes, decorrente da elevação do nível freático e da zona capilar;
- Aumento do custo de implantação de obras de infraestrutura, em função da elevação do nível freático dos aquíferos rasos;
- Saturação de cavidades cársticas vadosas, com consequentes mudanças nos habitats de organismos; e
- Aumento da susceptibilidade de desenvolvimento de processos instabilizatórios nas porções marginais dos reservatórios.

Além destes impactos associados ao próprio aquífero ou à condição de qualidade das águas, outros problemas indiretos também são observados, dentre os quais: proliferação de plantas de freatófitas indesejáveis (em porção emersa na orla dos reservatórios); proliferação de plantas hidrófitas indesejáveis (na lâmina d'água em zonas de remanso dos reservatórios); perda de solos férteis; perda de jazidas minerais, dentre outros.

Adicionalmente é importante destacar que o estudo que inclui esses impactos é o Estudo de Impacto Ambiental (EIA). Entretanto, ainda merece uma melhor atenção relacionado à esses impactos.

Um exemplo do que se trata de uma maneira geral esse estudo é do AHE Belo Monte. Esse estudo objetivou caracterizar um retrato real da região de inserção do empreendimento, levando em conta as diferentes abrangências espaciais, de cunho físico, biótico, socioeconômico e cultural, delimitadas como as áreas de influência para os estudos ambientais.

Teve como objetivo, também, apresentar uma análise prospectiva de seu comportamento para diferentes cenários futuros, a saber: a tendência de delineamento da qualidade ambiental da região de inserção do empreendimento sem considerar a perspectiva de sua implantação; e a sua resposta frente a uma possível materialização do AHE Belo Monte, quando da concessão das devidas licenças ambientais por parte do IBAMA.

Com relação a este último cenário, observa-se que são consideradas duas situações: a primeira não leva em consideração as diferentes medidas de cunho preventivo (denominadas “ações antecipatórias”), mitigador, de monitoramento e compensatório voltados para fazer frente aos impactos de natureza negativa a serem gerados pelo empreendimento.

A segunda, que incorpora o extenso conjunto dessas ações resultantes deste EIA sob a forma de Planos, Programas e Projetos inter-relacionados, traz, muitas vezes, alterações na avaliação dos impactos feita no cenário anterior (Leme, 2011).

Neste sentido, ressalta-se que este EIA buscou, prioritariamente, a integração dessas ações, tanto as voltadas para impactos negativos, quanto, aquelas direcionadas para os positivos, com Planos, Programas e Projetos colocados, já previstos ou mesmo em curso para a região onde se pretende inserir o empreendimento.

Estas ações devem ser desenvolvidas nas esferas federal, estadual e municipal. Objetiva-se, assim, colaborar potencialmente para uma alavancagem das oportunidades de desenvolvimento regional do território que poderão ser advindas dessa integração de medidas.

Tem-se como intuito, também, preparar esse território para o eventual recebimento do AHE Belo Monte, resultando em amenização dos efeitos negativos dele derivados, ou mesmo buscando evitá-los.

A Figura 3.2 mostra os processos associados ao licenciamento ambiental de empreendimentos hidrelétricos.

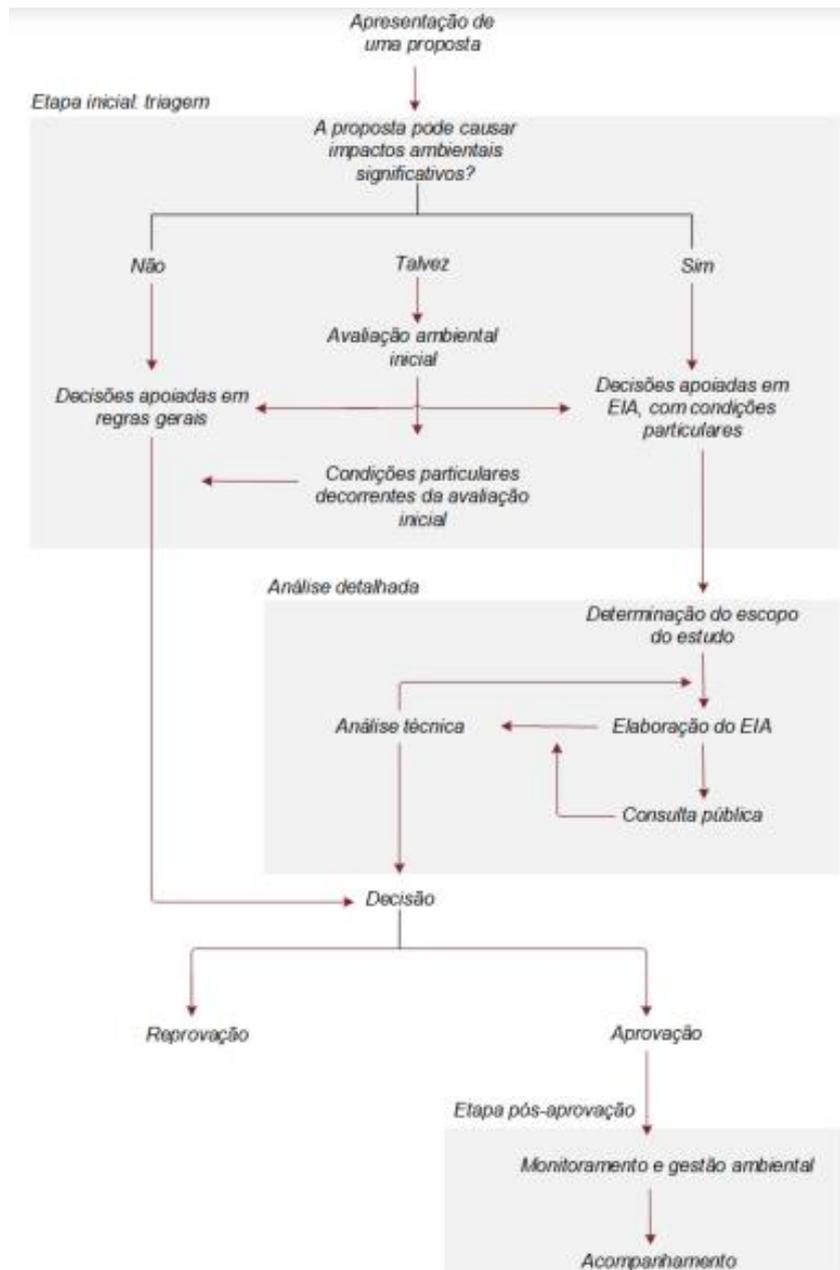


Figura 3. 2. Etapas do processo de AIA no Brasil (Lima, 2022).

3.2. Elevação do Nível do Nível Freático

Este trabalho apresenta as consequências das alterações do nível freático ao longo do tempo, devido ao represamento de um rio por uma barragem e a consequente formação, a montante, de um reservatório d'água que servirá para geração de energia hidrelétrica.

Na Figura 3.3 observa-se que o rio serve como coletor da descarga de base no tempo zero. Na transição, $0 < t < \infty$, ocorre uma inversão, ou seja, o rio alimenta o aquífero adjacente. Posteriormente, em numa fase de equilíbrio, $t \rightarrow \infty$, há o retorno para as condições iniciais, todavia em diferente cenário.

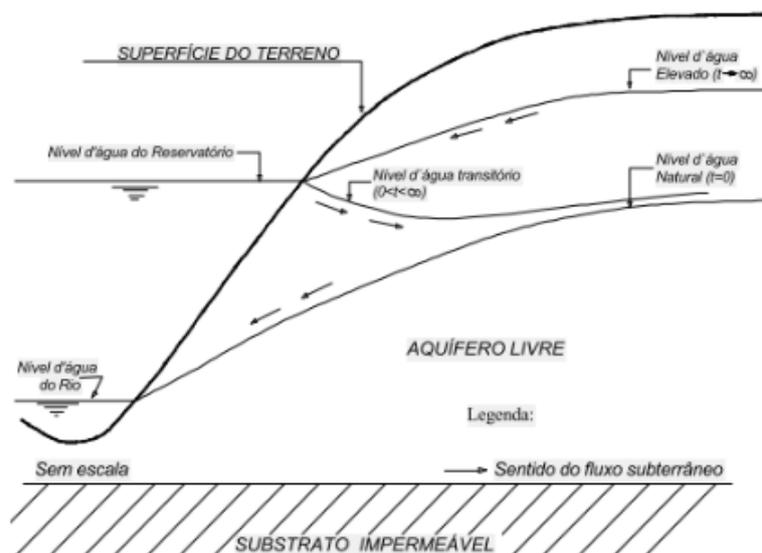


Figura 3. 3. Modelo esquemático da evolução do processo de elevações induzidas no nível freático nas bordas de reservatórios (Albuquerque Filho, 2002).

A magnitude e a distribuição espaço-temporal da elevação induzida no nível freático são condicionadas por uma série de aspectos hidrogeológicos, hidrológicos, climatológicos, geológicos, geomorfológicos e pedológicos, aliados às características construtivas e operacionais do reservatório hidrelétrico (Albuquerque Filho, 2002).

Um projeto de monitoramento e avaliação para esse empreendimento deve considerar que as elevações tendem a diminuir no sentido jusante-montante e da borda do reservatório rumo ao interior das áreas do entorno.

A elevação do nível freático tende, por sua vez, a ser mais rápida nas bordas do reservatório, alcançando as porções mais distantes após tempo mais longo, dependendo dos parâmetros hidráulicos de cada camada e locais através dos quais se processa a transmissão dos efeitos (Albuquerque Filho, 2002).

Ao considerar a proposta do ciclo de monitoramento e avaliação, as informações necessárias para esse caso específico são: amplitude, distribuição espacial e velocidade de propagação da elevação induzida no nível freático. Essas são as preocupações e os processos necessários para a tomada de decisão dos usuários ou mesmo subsidiar a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA).

Dessa forma, a contextualização desse evento dará subsídio à modelagem conceitual, que será importante para diversas atividades como, por exemplo, modelagem matemática ou computacional e para a grande quantidade de hidrelétricas que ainda estão por vir na região amazônica.

3.3. Aumento de Risco Geotécnico em Edificações Existentes

MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E DA SUSCEPTIBILIDADE DE DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS INSTABILIZATÓRIOS EM DECORRÊNCIA DA FORMAÇÃO RE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

HYDROGEOLOGIC MONITORING AND ASSESSMENT OF INSTABILIZATORY PROCESSES DUE TL THE FORMATION OF HYDROPOWER RESERVOIRS

¹Márcio da Rosa Magalhães Bessa; ²José Eloi Guimarães Campos

¹Centrais Elétricas do Norte do Brasil – Eletrobras Eletronorte, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília. m_bessa@hotmail.com

²Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. eloi@unb.br

RESUMO

Este trabalho propõe um sistema cíclico para monitoramento e avaliação de empreendimentos de geração hidrelétrica que requerem a formação de reservatórios artificiais. Dentre os elementos considerados destacam-se a definição de informações necessárias, a coleta adequada de dados, a análise dos dados e a utilização apropriada da informação. Mais especificamente para o monitoramento de processos instabilizatórios e aspectos hidrogeológicos em áreas marginais de reservatórios de hidrelétricas algumas variáveis são fundamentais, incluindo: a declividade na orla do reservatório, os tipos de materiais que compõem o aquífero/coberturas e a taxa de elevação do nível freático. O sistema cíclico de monitoramento e avaliação concebido pode ser aplicado com retorno em diferentes fases, desde que os técnicos envolvidos considerem a necessidade da obtenção de novos dados, ou retorno às análises dos dados com mudança de estratégias ou métodos. O objetivo final do sistema de monitoramento proposto é a gestão territorial e dos recursos hídricos subterrâneos, visando à mitigação de impactos e o ordenamento da ocupação das áreas marginais aos reservatórios.

Palavras-Chave: Usina hidrelétrica, monitoramento, hidrogeologia, engenharia geotécnica.

ABSTRACT

This work proposes a cyclical system for monitoring and evaluating of hydroelectric generation projects that require the formation of artificial reservoirs. Among the elements considered there are the definition of necessary information, adequate data collection, data analysis and appropriate use of information. More specifically for the monitoring of erosive process and hydrogeological aspects in marginal areas of hydroelectric reservoirs, some variables are fundamental, including the slope at the edge of the reservoir; the types of aquifers and geotechnical materials; and the rate of elevation of the groundwater level. The cyclic system of monitoring and evaluation designed can be applied with return in different phases, since the technicians involved consider the need to obtain new data or return to data analysis with changing of strategies or methods. The final objective of the proposed monitoring system is the management of territorial and groundwater resources, aiming to mitigating impacts and planning the occupation of marginal areas of the reservoirs.

Keywords: Hydroelectric Power Plant, monitoring, hydrogeology, geotechnical engineering.

3.3.1. Introdução

A susceptibilidade do desenvolvimento de processos instabilizatórios relacionados aos solos é potencializada quando os sistemas são afetados pela elevação artificial do nível freático, devido à formação de reservatórios de UHEs (Rodrigues & Vilar, 2013).

Esse processo de ascensão do nível freático no solo se deve à percolação das águas do reservatório em direção ao aquífero. É uma das mais importantes modificações que impactam as regiões adjacentes ao corpo d'água, seja pela formação de novos aquíferos ou pela elevação do nível freático existente (Albuquerque Filho *et al.*, 2004; Rodrigues & Vilar, 2013; Campos *et al.*, 2019).

Como consequência da elevação da umidade, os solos metaestáveis, os estruturados e os com baixos pesos específicos podem ser submetidos a eventos instabilizatórios. Estes processos são decorrentes do aumento de volume por saturação e posterior redução por secagem nas porções do perfil que anteriormente não estavam em condição de saturação permanente (Vilar & Ferreira 2015).

Desta forma, há a possibilidade de ocorrência de patologias geotécnicas nas fundações das edificações previamente existentes nas áreas submetidas à elevação do nível freático, que após a formação dos reservatórios tenderá a permanecer em nível mais alto.

Edificações da cidade de Pereira Barreto, São Paulo, por exemplo, apresentaram patologias geotécnicas em razão da colapsividade dos solos que foi ampliada em função da elevação do nível freático causado pelas águas do reservatório da UHE de Três Irmãos (Rodrigues & Vilar, 2013).

Por outro lado, a identificação da causa deste impacto é decisiva para os processos e iniciativas de mitigação, pois podem ser causas relacionadas ou não à elevação do nível freático.

Neste sentido, pode-se citar o caso de patologias geotécnicas desenvolvidas nas áreas urbanas de Paranã, Tocantins e São Salvador do Tocantins, em que as trincas e rachaduras não apresentavam relação de causa-efeito com a elevação do nível d'água vinculado ao Aproveitamento Hidrelétrico Peixe Angical (CDT/UnB 2008a).

A Figura 3.4 expõe exemplos de patologias geotécnicas associadas e não associadas à elevação do nível freático, sendo importante destacar que a geometria das estruturas é muito similar, independentemente do seu fator desencadeante ou processo genético.

Campos *et al.* (2019) chamam atenção para os casos em que diferentes tipos de patologias são observados em edificações em cidades situadas no sul do estado do Tocantins antes do início da formação dos reservatórios aquela região. Os autores concluem que estes problemas são decorrentes das próprias estruturas não convencionais, sem projetos de engenharia, sem pilares, vigas ou cintas de sustentação que tornam as edificações naturalmente vulneráveis.

Nessa região é comum a construção de pequenas residências com uso de adobe sobre um baldrame de pedra, sem amarração, com uso do concreto armado.

Em outros locais há clara relação de causa-efeito entre as patologias e a presença de solos colapsáveis. Com a elevação do nível freático, há saturação dos solos que, submetidos à carga axial das edificações existentes, colapsam, causando o recalque das fundações e o desenvolvimento de trincas e rachaduras na porção superior das edificações.



Figura 3. 4. a e b. Patologias geotécnicas em residências margeando a UHE de Peixe Angical/TO não vinculadas à sobrelevação do NF (CDT/UnB, 2008a); c e d: patologias em edificações em Pereira Barreto, SP causadas pela elevação do nível do nível freático (Vilar & Rodrigues, 2011).

Além das edificações (residências e prédios comerciais), estes problemas são também observados em sistemas de abastecimento de água, instalações de esgotos, redes de eletrificação e telefonia, pavimentos de ruas e pátios de estacionamentos (Leite, 2005).

Ainda há o caso das estações de tratamentos de efluentes, aterros sanitários e cemitérios, em que a mitigação ou recuperação do impacto é difícil ou tecnicamente inviável.

É relevante, portanto, que as avaliações, diagnósticos e projeções dos impactos potenciais sejam incluídos nos relatórios, ou seja, inventários, viabilidade e de impactos do meio ambiente nas diversas etapas de implantação de uma usina hidrelétrica.

A restrita integração e alinhamento entre os setores do sistema hidroenergético e do meio ambiente e a necessidade de se avançar nos fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, com destaque para os usos múltiplos da água (Siqueira & Santos, 2021) são entraves para a sustentabilidade das atividades técnicas de monitoramento e avaliação.

Portanto, é imprescindível que se estabeleça uma estratégia metodológica, pois caso contrário todos os recursos envolvidos, incluindo, projetos, equipamentos, instalações, viagens de campo, dentre outros, não serão aplicados da forma mais adequada.

Este trabalho compreende a apresentação de uma proposta de estratégia metodológica de um Ciclo de Monitoramento e Avaliação em Hidrogeologia, desde a construção da informação até a sua utilização final, de forma a possibilitar a mitigação dos impactos da formação do reservatório artificial aos aquíferos e aos ambientes associados.

Desde já, destaca-se entre as inúmeras vantagens, que essa estratégia metodológica promove o aprimoramento da geração de dados e informações, e sua aplicação. Deve-se também enfatizar a possibilidade da tradução dos objetivos da gestão de recursos hidrogeológicos em variáveis técnicas, o que tem sido considerado como um aspecto frágil nas discussões sobre este tema (UN/ECE, 2006).

3.3.2. Contextualização do Problema

O aumento da susceptibilidade de desenvolvimento de processos instabilizatórios tratado neste trabalho resulta em patologias geotécnicas como: recalques, abaulamento de vigas e pisos, fissuras, rachaduras e trincas em edificações (Figuras 3.5 e 3.6) e são os principais problemas constatados em residências em áreas urbanas e rurais que passaram a ter influência da elevação artificial do nível freático.

Esses problemas poderão ser um alerta para situações perigosas comprometendo a estabilidade, durabilidade e segurança das edificações e, naturalmente, com consequências na qualidade de vida das pessoas.

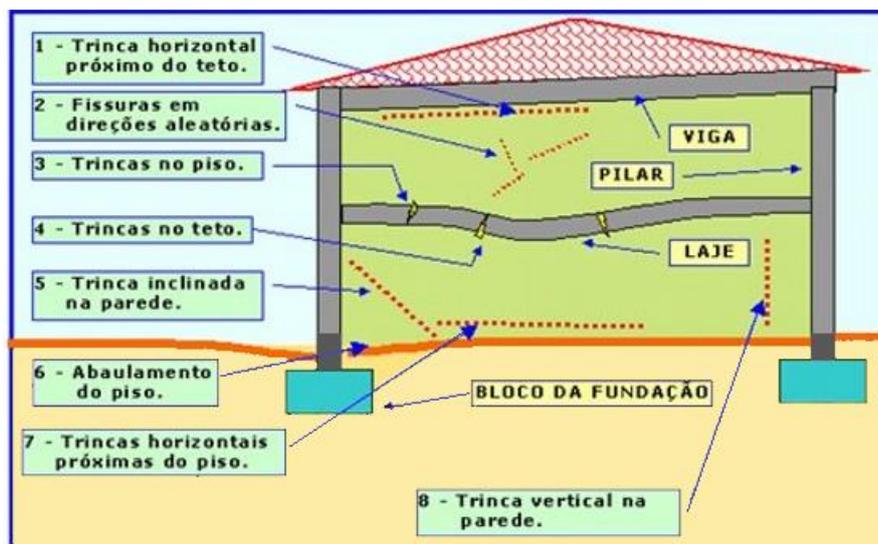


Figura 3. 5. Exemplos de patologias geotécnicas que podem ser desenvolvidas em função da elevação artificial do nível freático de aquíferos rasos devido à formação de reservatórios artificiais.

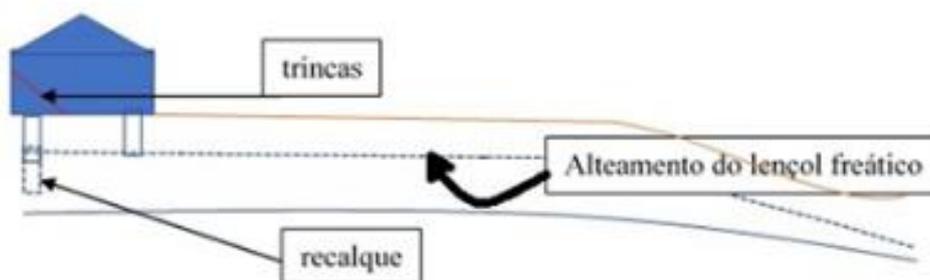


Figura 3. 6. Ilustração esquemática da relação de causa-efeito vinculada à elevação do nível freático.

Manzoli Júnior (1995) realizou estudos no município de Pereira Barreto, São Paulo, na margem do reservatório da UHE de Três Irmãos. O autor apresentou um trabalho em que se identificou correlação entre o preenchimento do reservatório, a elevação induzida do nível freático e o desenvolvimento de recalques em edificações situadas na área de risco delimitada pela Companhia Energética de São Paulo - CESP (Figura 3.7).

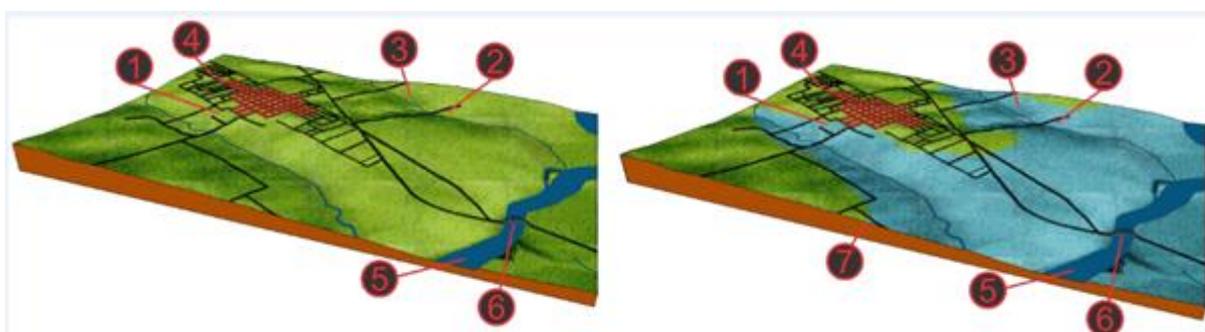


Figura 3. 7. Cidade Pereira Barreto/SP antes e após represamento, 1- cemitério; 2- Matadouro municipal; 3 - Fazenda Dr. Aurazil de Campos; 4 - Cidade; 5 - Rio Tietê; 6 - Ponte Novo Oriente; e 7 - Nível atual do rio (Bruno, 2019).

Devido à complexidade do novo ambiente subterrâneo estabelecido, algumas características devem ser ponderadas, compreendidas e acompanhadas. Um projeto de monitoramento e avaliação hidrogeológico surge como caminho para a mitigação desse problema para solucionar ou minimizar os possíveis e prováveis impactos negativos.

Para ressaltar a importância desse projeto em lidar com esses problemas e proporcionar segurança na elaboração do diagnóstico, cita-se o estudo de Albuquerque Filho (2002) para o caso do município de Terra Roxa, PR.

Neste caso os problemas geotécnicos observados em edificações e em equipamentos urbanos foram anteriormente definidos como causados por atividade sísmica induzida, em consequência do enchimento do reservatório de Itaipu.

Entretanto, a resposta, com bases nas observações e medições de campo, revelou que os problemas eram, de fato, devidos à excessiva umidificação a partir da infiltração das águas do reservatório e das chuvas (Albuquerque Filho, 2002).

Na realidade, a umidificação do solo proporciona adensamento volumétrico reduzindo a capacidade de suporte de carga e variação na estabilidade geotécnica, acarretando problemas nas estruturas das edificações urbanas (Albuquerque Filho, 2010).

A análise do aumento da susceptibilidade instabilizatória se baseia, principalmente, nos estudos das estruturas afetadas pela nova configuração do nível do freático, que, por sua vez, leva em consideração: a interação entre os materiais que compõem o aquífero; as elevações originais do nível freático; a elevação da lâmina d'água do rio e a declividade do terreno na orla do reservatório (CDT/UnB, 2008a).

O aquífero livre sofre elevação com a formação do reservatório, considerando que durante um tempo inicial ($0 < t < \infty$) ele alimenta a água subterrânea e a tendência é um novo equilíbrio no futuro ($t \sim \infty$) (Figura 3.8).

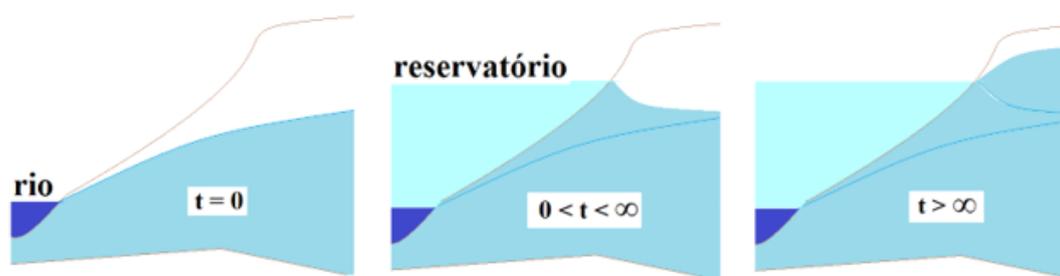


Figura 3. 8. Efeito no aquífero livre com a formação do reservatório.

Quando essa questão da elevação do nível freático é analisada desde a fase inicial de planejamento de uma UHE, sendo incluído na etapa inventário ou mesmo viabilidade, onde se coleta e analisa dados geológicos e geotécnicos disponíveis, poder-se-á antever consequências geotécnicas que a ascensão deste nível d'água poderá proporcionar.

Entende-se por inventário, o ponto de partida para o trabalho de coleta de dados (Brasil, 2007a), os estudos diversos (relatórios, artigos técnicos, dissertações teses etc.) que contemplam, parcial ou integralmente, a bacia hidrográfica, destacando-se os relativos aos seguintes temas e áreas do conhecimento: recursos minerais, sismicidade, fauna, cobertura vegetal, geologia, geotecnia, geomorfologia, pedologia, hidroclimatologia, hidrometeorologia, limnologia, ictiologia.

Alguns estados brasileiros exigem de forma prévia ao inventário, o Estudo Integrado de Bacia Hidrográfica - EIBH, de forma que, seja possível avaliar a cumulatividade e sinergia entre diferentes impactos.

Importante salientar que o inventário assume papel central na determinação da qualidade da expansão do setor elétrico, tanto em termos econômicos, quanto na fase de viabilidade, fundamentais para análise dos novos empreendimentos (Siqueira & Santos, 2021).

Dessa maneira, as áreas com susceptibilidade de desenvolvimento de processos instabilizatórios e patologias geotécnicas devem ser caracterizadas e identificadas desde o início do desenvolvimento dos estudos.

Os dados preliminares deverão ser integrados com as diversas ações mitigadoras, a fim de colaborar para o aperfeiçoamento dos recursos disponíveis com maior probabilidade de atingir a prevenção ou mitigação do impacto, objeto da gestão inicial.

Essas ações integradas devem contribuir, portanto, com a minimização de prejuízos econômicos e ações jurídicas, pagamentos de indenizações, além das inúmeras consequências negativas para a comunidade afetada.

3.3.3. Constituição da Informação: Monitoramento e Avaliação do Nível Freático

Uma estratégia metodológica é fundamental para orientar todas as atividades de um projeto de monitoramento e avaliação hidrogeológica, que é a chave para obtenção de uma base de dados devidamente contextualizada com os estudos ambientais das águas superficiais e subterrâneas contribuindo com as etapas de implantação de uma UHE.

O Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica compõe uma ferramenta que tem como objetivo solucionar de maneira eficaz o problema geotécnico específico apresentado neste trabalho.

A proposta abrange aspectos necessários para o monitoramento com a vantagem de poder ser integrado a outras atividades do empreendimento, o que resulta em benefícios mútuos dos estudos desde o planejamento, até a instalação e operação de uma UHE.

O ciclo proposto complementa os estudos em andamento e situa atividades propostas de forma providencial em um dos seus componentes, o que proporcionará incentivo, continuidade e organização como um todo. O mais interessante é o autoaprendizado com a possibilidade da retroalimentação que um ciclo proporciona.

Esta proposta é contrastante com os métodos de monitoramento existentes, que são lineares, isto é, apresentam dados iniciais e concluídos ao final dos empreendimentos sem clareza de como se pode melhorar na efetividade e eficácia do monitoramento e avaliação.

A forma cíclica conduz a verificação de quanto os objetivos da gestão foram atingidos, o que possibilita o retorno às etapas anteriores para se aproveitar de forma dinâmica as diferentes ações do monitoramento. Essa organização é racional e permite repassar tarefa de maneira minuciosa, a fim de identificar onde é possível aprimorar.

Diversas são as vantagens institucionais em implantar tal estratégia, pois pode possibilitar cooperações, convênios, contratos e parcerias entre diferentes órgãos gestores e o envolvimento destes com as tarefas que melhor lhes adaptar.

Dentre as organizações envolvidas destacam-se aquelas vinculadas ao licenciamento ambiental, de outorga de recursos hídricos, ministério público e associações de usuários.

Apesar de o ciclo deixar a critério do profissional por onde se deve iniciar o processo de monitoramento, o primeiro componente do ciclo, normalmente, é representado pelas Informações Necessárias.

Neste caso, a Gestão de Recursos Hidrogeológicos deve incluir as variáveis técnicas específicas que deverão ser trabalhadas.

Esse componente é a chave para o sucesso de um projeto e é ressaltado em diversas discussões técnicas, sendo o principal causador do fracasso em não alcançar a sustentabilidade ambiental quando as variáveis para o escopo da gestão não são adequadamente definidas (Chilton & Foster, 1996).

Após o estabelecimento adequado desta etapa, parte-se para o próximo elemento do ciclo, que é representado pela Coleta de Dados. Entretanto, para este componente é necessário um projeto da rede amostral, com avaliação da estratégia e programação das atividades antes de sair a campo para a coleta de dados.

Em seguida, o próximo componente é a Análise dos Dados com a organização em tabelas e diagramas etc., de tal forma que, possam ser manuseados de acordos com os interesses dos envolvidos e objetivos do monitoramento, nas diferentes etapas dos empreendimentos (projetos, instalação e operação).

O último componente é a Utilização das Informações que deve ser precedida pela preparação, e discussão e conclusão, sendo apresentada por meio de sumários executivos ou relatórios técnicos de forma que levem aos interesses da gestão.

3.3.4. Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica em Processos Instabilizatórios

Albuquerque Filho *et al.* (2004) reforçam que para avaliações das consequências da elevação do nível freático, devido ao surgimento do reservatório, duas intervenções são necessárias: a realização do planejamento e o estabelecimento de uma rede de monitoramento no bojo do processo da Avaliação de Impacto Ambiental do empreendimento.

Diante disto, serão apresentadas intervenções de monitoramento e avaliação práticas para um arranjo de tarefas que devem obedecer ao Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológico proposto.

Esse novo arranjo prestigia a rede de amostragem. Normalmente, a parte mais onerosa de um projeto de monitoramento e avaliação respeita as técnicas estabelecidas e conhecidas, em uma interface com as outras tarefas, o que garante a formatação ideal para a produção e utilização da informação para diversos usuários.

A sugestão é que o projeto acompanhe uma sequência de componentes do ciclo, cujo início é especificar as informações necessárias, que são dados e informações técnicas para serem encaminhadas para o próximo componente, que é coleta de dados.

Em outros termos, são questões traduzidas a partir dos objetivos da gestão que derivarão vários aspectos de planejamento, que envolvem: rede amostral, medições, amostragens entre outros.

Uma questão prática relacionada aos trabalhos de monitoramento e avaliação é a dificuldade de contratação dos serviços. Como se trata de ações não finalísticas dos empreendedores e investidores em geração hidrelétrica, esta etapa que se inicia no planejamento e migra até a operação dos empreendimentos é contratada por licitações ou cartas-convite.

Neste sentido, as ações a serem executadas devem estar claras nos editais ou termos de referência para contratação de empresas ou consultorias especializadas, de forma que todas as atividades essenciais sejam contempladas.

Normalmente os termos contratuais são concentrados na coleta de dados e cabe ao profissional responsável propor o ciclo de monitoramento para sua própria organização. Ao longo da evolução do cronograma, espera-se que o projetista possa mostrar a organização das tarefas por meio do ciclo, de forma a garantir sustentabilidade ao monitoramento e avaliação.

Ao considerar que a gestão é o objetivo central do monitoramento, devem ser destacados os seguintes aspectos: informações necessárias, coleta de dados, análise dos dados e utilização da informação.

3.3.5. Informações Necessárias

Quando a gestão de recursos hidrogeológicos tem como objetivo avaliar os impactos geotécnicos nas edificações vizinhas ao reservatório de uma UHE, os estudos técnicos devem focar na elevação do nível freático e como este fator impacta nas variáveis a serem consideradas.

Neste sentido, a elevação do nível da água subterrânea deve ser estudada e todas as suas dimensões: elevação total, taxa de elevação, separação da flutuação natural com relação à elevação devida à formação do reservatório, com relação à qualidade da água freática antes e depois da formação do reservatório, dentre outros aspectos.

Campos *et al.* (2019) destacam que as principais variáveis que controlam ou definem a elevação dos níveis das águas subterrâneas nas áreas marginais aos reservatórios incluem: declividade do terreno na orla do reservatório, tipos de materiais que compõem o aquífero e profundidade original nível do freático, bem como a elevação total da lâmina d'água do rio natural com relação ao reservatório atual.

Nas áreas identificadas como potencialmente impactadas a natureza do material que compõe o aquífero é fundamental. Os principais parâmetros que devem ser conhecidos são a condutividade hidráulica das zonas vadosa e saturada e a espessura.

Para a obtenção da condutividade hidráulica da zona não saturada os métodos sugeridos são ensaios de infiltração *in situ*, que inclui o método do infiltrômetro de anéis concêntricos em superfície e a técnica *open end hole* para diferentes profundidades (Oliveira *et al.*, 2021). Para a zona não saturada o ensaio tipo *Slug Test* em poços de monitoramento são os mais adequados.

Com relação às patologias geotécnicas, um caso de destaque é utilizado para exemplificar o tipo de informação necessária. O programa ambiental da UHE Peixe Angical (CDT/UnB, 2008b) cadastrou centenas de edificações e levantou as patologias existentes antes do início das obras de construção do barramento em três áreas urbanas situadas na futura orla do reservatório.

As fissuras, trincas e rachaduras em edificações foram monitoradas durante e depois do enchimento do reservatório, de forma que, se pudessem separar aquelas existentes que eventualmente sofressem reativações ou novos processos, após a formação do reservatório e operação da usina.

Além deste cadastramento, os solos passíveis de colapso com a elevação do nível freático foram estudados, gerando mapas de materiais com a caracterização física dos solos.

Poços existentes (cisternas e tubulares) podem ser utilizados como dispositivos para observação da variação do nível d'água com registro da piezometria ao longo do tempo. Contudo, a instalação de poços de monitoramento dedicados exclusivamente com o objetivo de medição periódica dos níveis deve ser sempre obrigatória.

É fundamental incluir no início dos estudos para a gestão hidrogeológica a modelagem conceitual do aquífero. Com isso, é possível caracterizar sua homogeneidade ou heterogeneidade, isotropia ou anisotropia, bem como os parâmetros dimensionais condutividade hidráulica, espessura, distribuição espacial das camadas e condições de recarga. Dessa forma, são identificadas as unidades hidroestratigráficas e os parâmetros hidrogeológicos associados a cada unidade identificada (Lousada & Campos, 2005).

No Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas (Brasil, 2007a), as informações geológicas, geomorfológicas, pedológicas e geotécnicas são requeridas nos estudos. No que se refere à instabilidade dos terrenos, o manual requer indicação das áreas com instabilidade natural de encostas nas adjacências do reservatório e definição das áreas com susceptibilidade à erosão.

3.3.6. Coleta de Dados

Componente do ciclo que inclui diferentes atividades, inclui: seleção das variáveis, locais, frequência, medidas em campo e análises laboratoriais, além da metodologia de obtenção dos dados e responsáveis técnicos pela execução.

Entretanto, tudo deve ser realizado sob um arcabouço de um projeto da rede de amostragem, chave para melhor aproveitamento do monitoramento e avaliação, pois com a informação necessária pré-definida o projeto se adequa de tal maneira que os resultados podem ser utilizados de forma global. Neste caso, o projeto de monitoramento tenderá a ser sob medida atendendo às particularidades locais e regionais.

Vale ressaltar que o projeto da rede de amostragem deve ser adequado para condições durante e pós-enchimento do reservatório, considerando o zoneamento do potencial de sua influência e as características do uso e ocupação de sua orla, (Albuquerque Filho, 2002).

Albuquerque Filho (2002) também enfatiza a realização das frequências de amostragens dentro do ciclo hidrológico na época da implantação da UHE, o que coincide com as recomendações das campanhas hidrológicas.

Assim, é possível definir a modelagem conceitual dos aquíferos locais, que não seria somente uma ferramenta para simular a elevação do nível freático, mas também apoio como para a caracterização da rede, e posterior operação.

Para a coleta de dados hidrogeológicos os poços de monitoramento são imprescindíveis. Segundo Feitosa *et al.* (2008), a depender dos objetivos dos estudos os poços podem ser de diferentes formas: poço estratigráfico, produtor, de pesquisa ou de observação.

De forma geral, os poços de monitoramento em estudos de usinas hidrelétricas devem ter seção curta de filtro e a máxima penetração possível na zona saturada do aquífero para ter funcionalidade a qualquer momento do ciclo hidrológico (de forma que sejam funcionais mesmo quando o nível freático for mais baixo).

A locação dos poços deve ser realizada na fase de implantação da UHE e deve levar em consideração a linha máxima da lâmina d'água após a estabilização do reservatório.

Os equipamentos e ferramentas que devem ser utilizadas durante as atividades de campo devem incluir: GPS portátil; máquina fotográfica; paquímetro; caderneta; cola araldite e lâmina de vidro (espessura 1 mm e comprimento 5 cm para monitoramento de trincas), medidor de nível (com sensor sonoro) e medidor portátil de pH e condutividade elétrica da água.

Com relação aos solos, dois tipos de informações são necessários: distribuição dos tipos de coberturas ou materiais geotécnicos e dados intrínsecos dos diferentes tipos de materiais.

Para o primeiro caso é necessário confeccionar mapas de solos ou de materiais geotécnicos segundo critérios específicos (pedológicos ou geotécnicos). Este mapa deve ter escala apropriada, em geral, de grande resolução espacial, com detalhamento suficiente para se compreender as mudanças laterais dos materiais e suas transições.

Com relação aos dados intrínsecos dos perfis de solos ou dos materiais em estudo, são necessárias coletas de amostras deformadas e indeformadas. As amostras deformadas são úteis para obtenção de dados como textura, estrutura, pegajosidade, plasticidade, dentre outras, a partir de análise tátil-visual de campo e de análises laboratoriais.

As amostras indeformadas são necessárias para produção de dados de erodibilidade, colapsividade, densidade, porosidade, e outras a partir de ensaios geotécnicos específicos.

Além destas, outras disciplinas como a hidrogeologia devem ser consideradas, para obtenção de importantes informações como a variação sazonal do nível freático, quantificação da recarga, porosidade total e efetiva do meio, vazão de descarga do aquífero e gradiente hidráulico (Scanlon *et al.* 2002).

3.3.7. Análise dos Dados

Esta componente converte os dados em informações necessárias, que por sua vez estão associadas com os objetivos da gestão hidrogeológica. A partir dessa etapa, é possível, então, validar, tornar acessível, arquivar, facilitar a análise espacial e temporal baseado em uma variedade de fontes (solos, relevo, hidrologia, clima, hidrogeologia, geologia).

Para os trabalhos de geotecnia produtos planialtimétricos e hidrogeológicos devem ser elaborados, tais como: mapa de profundidade do nível d'água subterrânea; mapa potenciométrico do aquífero livre e geológico com as principais estruturas cisalhantes (falhamentos); carta de zoneamento de potencial de influência do enchimento do reservatório sobre o aquífero livre adjacente (Albuquerque Filho, 2002); carta geotécnica, mapa de solos, e os mapas derivados (potencial de recarga, potencial de perda de solos, distribuição dos solos colapsíveis etc.).

Como já citado, a declividade, o nível d'água do reservatório e os tipos de materiais são parâmetros a serem avaliados, de forma a se evidenciar as principais feições geotécnicas.

Os dados obtidos na componente anterior devem ser analisados e avaliados a partir de ferramentas adequadas, que incluem o saneamento dos dados, plotagem em gráficos, confecção de diagramas específicos. A possibilidade do uso de softwares especializados comentados no referencial teórico para aplicações hidrogeológicas e geotécnicas.

3.3.8. Utilização da Informação

Este último componente é a parte de conexão com os usuários da informação. É fundamental que seja dirigida à audiência a que se destina. No caso deste trabalho, o maior interesse para os tomadores de decisão é onde implantar os reforços estruturais e preenchimento as fendas das edificações afetadas pela elevação do nível freático (Campos *et al.*, 2019).

Desta forma, não será uma mera lista de variáveis e concentrações ou níveis, mas interpretadas e avaliadas por equipe experiente com relevantes recomendações para ações gerenciais (UN/ECE, 2000).

Os usuários dessa informação poderão estabelecer critérios de mitigação diferenciados para as edificações convencionais e não convencionais. Outras medidas incluem: desapropriações caso constate-se comprometimento irremediável da edificação e planejamento para ocupação das margens do reservatório.

Comumente as informações e dados produzidos são utilizados em estudos ambientais ou para subsidiar audiências públicas. Dessa forma, surge a oportunidade para se verificar o quanto os objetivos foram contemplados e, além do mais, analisar outras possibilidades de mais usuários desfrutarem desse projeto, como, por exemplo, nas pesquisas acadêmicas.

Estudos de caso cujos resultados do modelo foram aferidos com os efeitos constatados (Albuquerque Filho, 2002) aprimoram a prevenção e mitigação dos efeitos da instalação do reservatório sobre as edificações da cidade. Neste caso, essa aferição independente do uso de ferramentas previsionais. É oportuno para se decidir em quais componentes do ciclo deve-se incluir ações de complementaridade das atividades.

3.3.9. Conclusões

O tipo de ação de monitoramento e avaliação proposto neste trabalho deve ser aplicado para o uso futuro e ocupação das terras no entorno dos reservatórios formados para UHEs. Além disso, sugere-se integrar os trabalhos de interesse geotécnico direto com outros estudos de cunho hidrogeológico, com execução de retroanálises dos efeitos do enchimento e quando necessário estender o período de monitoramento.

Os estudos hidrogeológicos e geotécnicos não são propriamente separados, e no caso de monitoramento em usinas hidrelétricas são inseridos em uma única ciência que pode ser denominada hidrogeotecnia.

Este trabalho propõe uma inversão da lógica atualmente aplicada em muitos projetos de UHEs, com relação aos solos colapsíveis em que as medidas preventivas são desconsideradas ou consideradas de forma insuficiente, para posteriormente investir em medidas corretivas, em geral muito mais onerosas. Neste sentido, os projetos de monitoramento e avaliação devem ter como objetivo antever os impactos geotécnicos e hidrogeológicos.

As soluções dos problemas geotécnicos e hidrogeológicos podem ser potencializadas com a aplicação adequada de uma metodologia estratégica que siga regras desde as etapas iniciais de implantação de uma usina hidrelétrica. A aplicação desta estratégia pode resultar na minimização do desenvolvimento de danos permanentes, conforme casos mencionados neste trabalho.

Para o caso de instalação de UHEs com reservatórios com dimensões significativas, os programas de monitoramento e avaliação devem ser permanentes com campanhas realizadas antes, durante e após o preenchimento do lago artificial. Os objetivos devem ser definidos inicialmente, antes do início das obras, já nas fases de projetos executivos e estudos ambientais prévios.

Na medida em que se estabelece um fluxo da aplicação ou uma sequência de uso do projeto de monitoramento e avaliação no formato cíclico, é possível proporcionar a vantagem de permitir a reavaliação de cada componente em qualquer momento em que se considere necessário.

Novas etapas de coletas de dados ou mudanças de periodicidade das medições podem ser propostas. Da mesma forma, pode-se mudar a estratégia para a análise dos dados incluindo, por exemplo, avaliações estatísticas do conjunto de dados amostrais.

O aprimoramento das ações preventivas deve ser prioridade. O diferencial dessa estratégia metodológica é a racionalidade no uso de soluções para se alcançar as soluções mitigadoras.

Evidentemente, a composição de equipes experientes com amplo conhecimento em geologia, geotecnia, pedologia, estruturas civis entre outras devem ser formadas. As equipes devem ter a máxima independência possível, de forma a não ceder às pressões que apresentam três origens principais: políticas (interesses do poder público), econômicas (interesses dos empreendedores) e sociais (interesses da população envolvida).

Para maximizar as vantagens da aplicação do sistema cíclico de monitoramento e avaliação deve-se definir uma rede amostral adequada, com a proposição de escalas de estudos que sejam compatíveis com os problemas geotécnicos e hidrogeológicos.

A escala deve ser pensada em termos espaciais (em geral 1:25.000 ou maiores) e em termos temporais (em geral com observações mensais). Para o caso das avaliações geotécnicas, deve se considerar, no mínimo, uma amostra e a descrição de um perfil para cada tipo de solo ou de material geotécnico mapeado. Importante destacar a caracterização do solo estudado.

Embora sejam importantes as análises de dados existentes (publicados ou não), os trabalhos de campo para coleta de dados são imprescindíveis. Sem as visitas periódicas às áreas de estudo não é possível alcançar nenhum dos objetivos enumerados no modelo de monitoramento e avaliação proposto.

Por fim, o conhecimento da amplitude de influência da elevação do nível freático será uma informação fundamental na decisão de implantar restrições geotécnicas à ocupação urbana nas áreas marginais ao reservatório.

3.4. Perda de Captações de Recursos Hídricos Subterrâneos

PERDA DE CAPTAÇÕES SUBTERRÂNEAS E MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO HIROGEOLOGICA EM ÁREAS AFETADAS PELO ENCHIMENTO E OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICA

Marcio da Rosa Magalhães Bessa ¹; José Eloi Guimarães Campos ²

¹ Centrais Elétricas do Norte do Brasil – Eletrobras Eletronorte, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, m_bessa@hotmail.com

² Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, eloi@unb.br

3.4.1. Introdução

Um dos impactos ambientais negativos devido a construção de UHE com preenchimento e operação do reservatório é a perda de captação subterrânea de sistema de abastecimento d'água municipal e das comunidades lindeiras, como exemplificado pelos casos de Porto Nacional e Palmas/TO (THEMAG, 1996).

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.

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 do rio Tocantins (Maldaner *et al.*, 2019).

Tendo isto em vista, elaborou-se o Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológico (Ciclo 2.1), com base nos diversos trabalhos de autores e entidades, tais como: ACWI (2022), Timmerman *et al.* (2001), Jones *et al.* (2002).

3.4.2. Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológico

A estratégia metodológica do Ciclo de Monitoramento e Avaliação apresentado na Figura 1.1 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 tomada 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 nos municípios ou comunidades margeando o 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 *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, medições laboratoriais e no local, métodos de medições, custos, transporte e armazenamento.

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 3.9).



Figura 3. 9. 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.

3.4.3. Contaminação da Água Subterrânea pelas Águas do Reservatório

A formação de um reservatório de uma usina hidrelétrica 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 cunhos socioeconômicos, hidrogeológicos, entre outros. 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 a elevação do nível freático diminui a camada do horizonte não-saturado, o que resulta em uma outra fonte de poluição pelo aumento na vulnerabilidade desse aquífero 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).

3.4.4. Contextualização do Problema

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 3.10 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. Sendo, portanto, um grande interesse na Hidrogeologia, Engenharia Civil e Agrônoma entre outras.

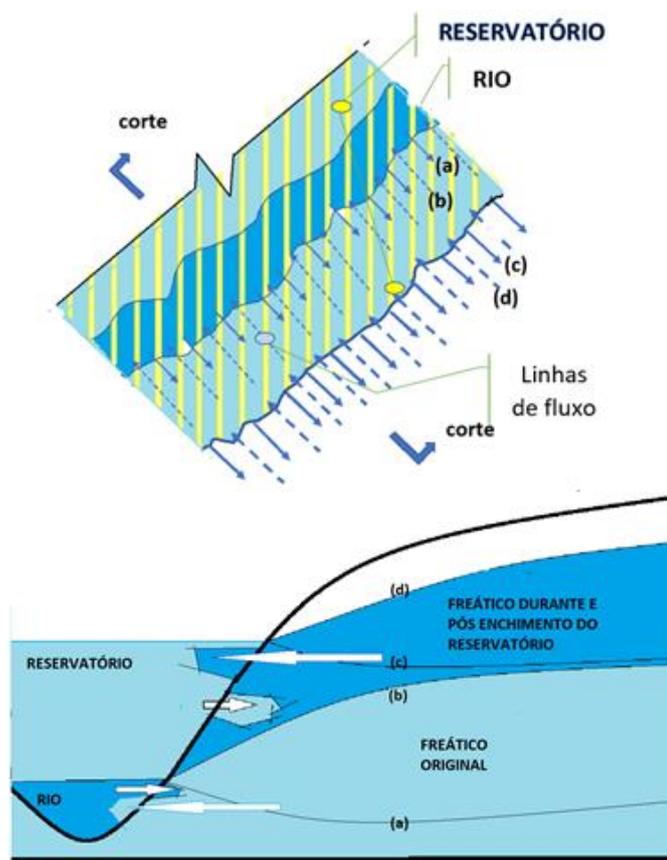


Figura 3. 10. Planta e corte, esquemático, ilustrando as diversas mudanças de fluxo na implantação de um reservatório de uma UHE. fase rio: (a) - rio alimenta o aquífero e (b) - rio drena o aquífero. Enchimento do reservatório: (c) - reservatório alimenta o aquífero e (d) - reservatório drena o aquífero.

3.4.5. 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 nesta tese 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 3.11), 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).

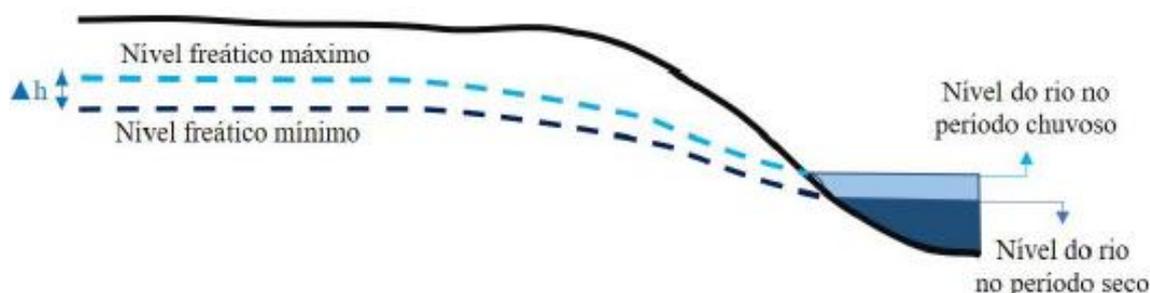


Figura 3. 11. Seção que mostra que a variação sazonal do nível freático se comporta de forma homogênea com relação ao relevo local (considerando sistema homogêneo e isotrópico) (Campos *et al.*, 2019).

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 3.12 e 3.13 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 3.12 destaca os fluxos de escoamento superficial (*overland flow*), escoamento interno (*interflow*) e escoamento de base (*baseflow*). A Figura 3.13 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.

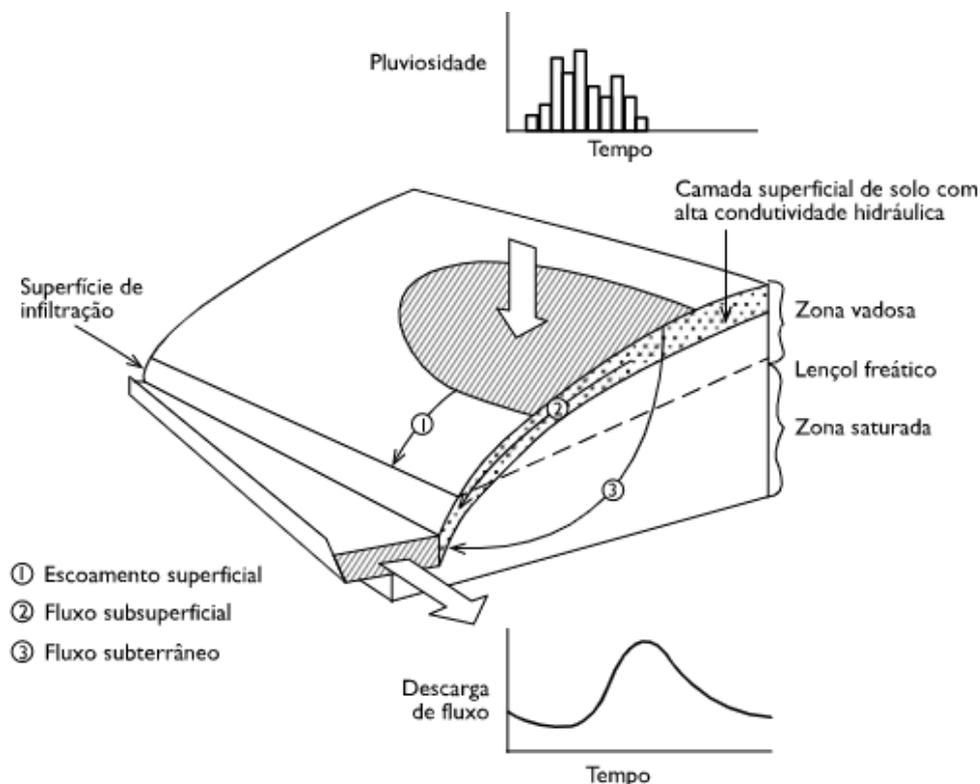


Figura 3. 12. Mecanismos de entrega da chuva para um canal de rio a partir de uma vertente em um pequeno tributário de uma bacia hidrográfica (Freeze & Cherry, 2017).

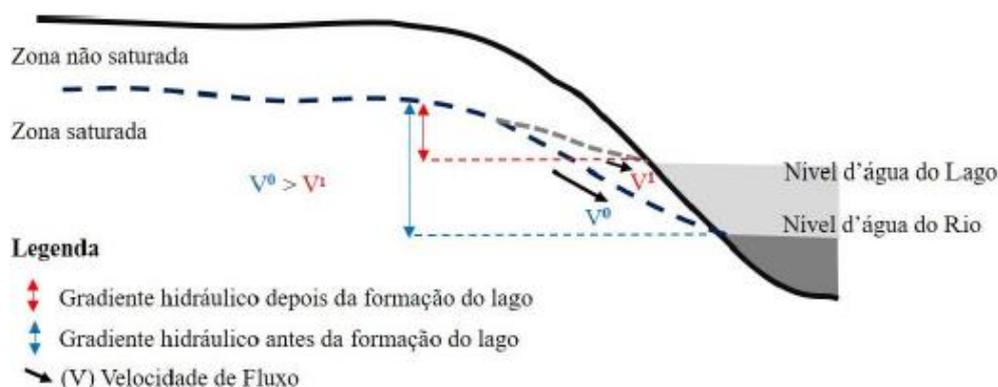


Figura 3. 13. Ilustração da diminuição do gradiente hidráulico devido à elevação da cota do exultório (Campos *et al.*, 2019).

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: $V = K \frac{Grad\ h}{\eta e}$, onde:

V = velocidade linear média de fluxo no aquífero;

K = condutividade hidráulica do meio;

Grad h = gradiente da carga hidráulica ($\Delta h/\Delta s$); e

ηe = 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.

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, 1967 e Freeze & Cherry, 2017) (Figura 3.14).

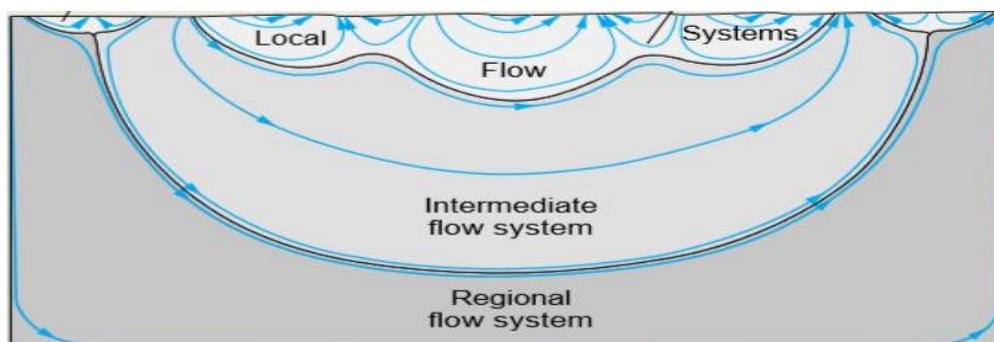


Figura 3. 14. Efeito da topografia nos padrões regionais de fluxo de água subterrânea (Freeze & Cherry, 2017).

Quando há modificação do gradiente hidráulico (Figura 3.12), 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 (Figura 3.11).

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 3.15).

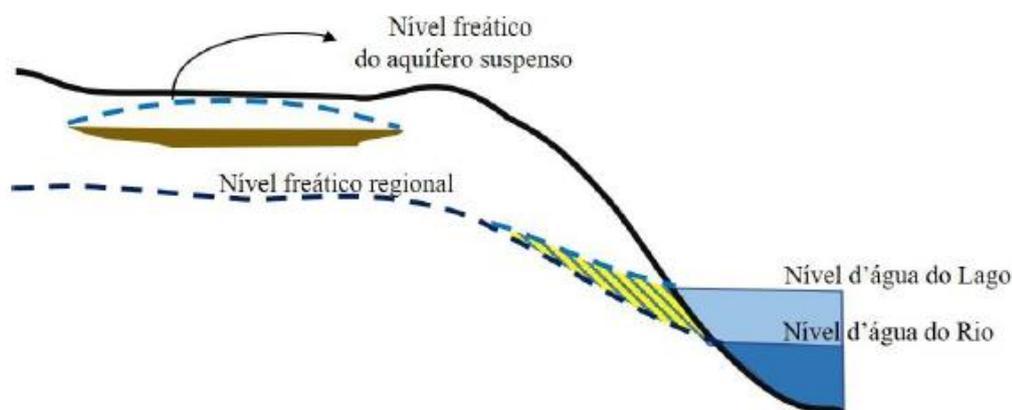


Figura 3. 15. Exemplo de aquífero suspenso condicionado à camada de rocha impermeável na zona não saturada do aquífero regional, cujo exutório é o sistema rio-reservatório (Campos *et al.*, 2019).

3.4.6. 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. Usuários e questões de medidas associadas à mitigação dos impactos na bacia hidrográfica de implantação de um sistema UHE-reservatório devem ser ponderados.

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 anteriormente, 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 planialtimétricos e informações hidrológicas e hidrogeológicas compatíveis.

A ideia do ciclo neste componente onde sugere a possibilidade de que as variáveis hidrogeológicas sejam organizadas e coletadas em uma etapa posterior, para retroalimentar a análise 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 resolvidas pelos diversos métodos consagrados na literatura.

3.4.7. 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 dois anos de dados acumulados são suficientes para uma avaliação adequada.

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 também na condição do escoamento superficial.

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 topográfico desde uma faixa da calha do rio avançando no terreno marginal ao reservatório, uma vez que o nível freático é controlado pela declividade (Figura 3.16).

Segundo Campos *et al.* (2019) esse avanço no terreno pode chegar a 200 metros quando a declividade é pequena (Δh menor do que 1 metro, (Figura 3.16). A distância da margem é inversamente proporcional ao nível do freático.

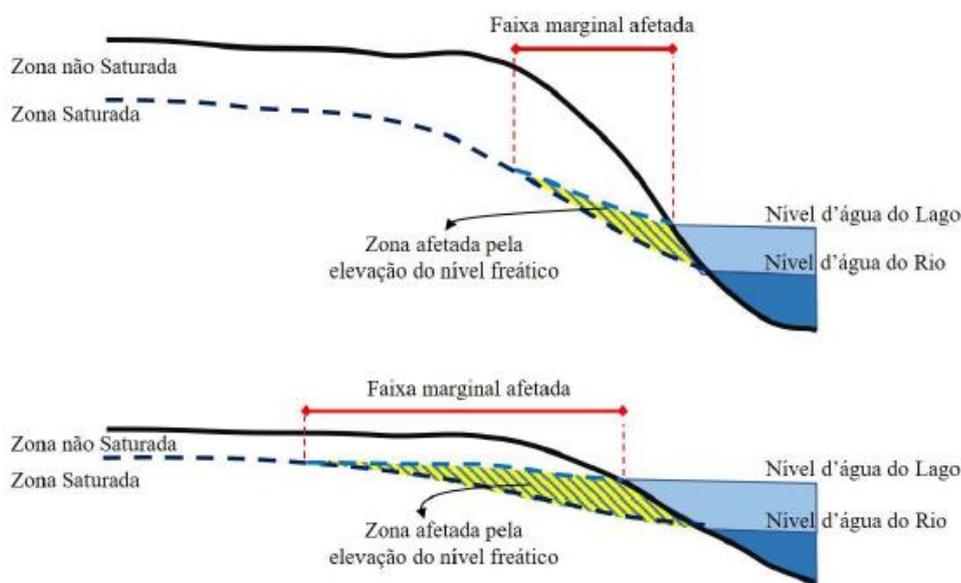


Figura 3. 16. Apresentação gráfica do controle da declividade na determinação da faixa afetada pela elevação artificial do nível freático devido à formação do reservatório (Campos *et al.*, 2019).

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

É imprescindível que durante a perfuração de poços de monitoramento seja estabelecida uma padronização local que atenda 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.

3.4.8. Saturação de Sistemas de Saneamento *in situ* e Cemitérios

Ao se tratar da gestão hidrogeológica em áreas vizinhas ao reservatório de uma usina hidrelétrica, algumas fontes de contaminação devem ser consideradas, como por exemplo sistemas de saneamento *in situ* e cemitérios (Figura 3.17).

Essa observação deve ser avaliada para sistemas existentes e planejados que podem ser interceptados, devido a elevação do nível freático com a formação do reservatório da UHE (Campos *et al.*, 2019; Feitora *et al.*, 2008; Albuquerque Filho, 2002).

Nesse contexto, é possível que substâncias contaminantes sejam incorporadas à zona saturada do aquífero, podendo, inclusive, atingir as águas do reservatório nos períodos de descarga do aquífero.

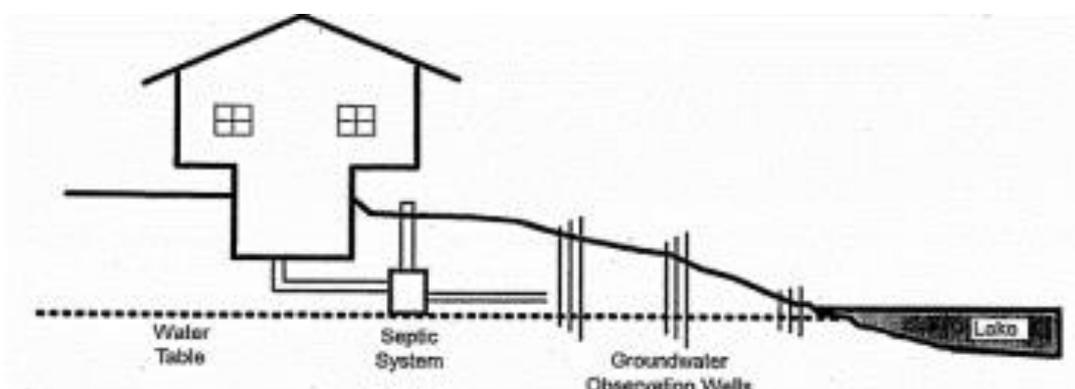


Figura 3. 17. Relação entre da questão sanitária com a eventual elevação artificial do nível freático (Holdren *et al.*, 2001).

A sugestão deste trabalho é estabelecer uma proposta estratégica metodológica cíclica de monitoramento e avaliação hidrogeológica, tendo em vista o objetivo de contribuir para solução do problema de contaminação da água subterrânea pela diminuição da espessura da zona vadosa.

3.4.9. Projeto de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica Visando à Contaminação do Aquífero

Como as situações relativas ao saneamento são diversas nas diferentes regiões do Brasil, o ciclo de monitoramento e avaliação em hidrogeologia (Figura 2.1) poderia ser iniciado em um componente aleatório.

Em alguns casos as atividades da gestão já foram desenvolvidas. Dessa forma a próxima etapa é o Projeto da Rede de Monitoramento. Entretanto, neste trabalho, a gestão de recursos hidrogeológicos é o componente inicial a ser abordado. Portanto, sendo contrário à ideia que o projeto deve ser iniciado pelo componente coleta de dados.

As legislações pertinentes devem ser levadas em consideração para a gestão, a fim de identificar aspectos da multifuncionalidade e usos da água subterrânea, conflitos de interesses, inventários e informações disponíveis.

Também deve ser ponderada a caracterização do aquífero, ou seja, a proposição do modelo conceitual, que inclui dados de ensaios de infiltração *in situ* como *slug test* e *open end hole*, textura dos solos, espessura da zona vadosa, potenciometria etc.

Para os casos de existência de passivo ambiental outros estudos devem ser considerados, como o histórico da ocupação e da contaminação potencial, investigações diretas e indiretas, além da delimitação das áreas críticas.

O próximo componente é *Informações Necessárias*. Neste trabalho o foco é na informação para responder questões específicas para a tomada de decisões. Para auxiliar nesta tarefa a aplicação do modelo DPSIR (*Driving forces, Pressures, State, Impact, Responses*) é aplicada.

Os diferentes componentes podem ser representados por **D**: empreendimento representado pelo sistema UHE-reservatório; **P**: condição do nível freático alcançar o saneamento *in situ* ou a porção enterrada de cemitério; **S**: variáveis da contaminação sugerido por Almeida (2005) - alcalinidade (bicarbonato), pH, condutividade, dureza (cálcio e magnésio), oxigênio dissolvido, oxigênio consumido, cloreto, amônia e nitrato; **I**: alteração na qualidade d'água do reservatório ou água subterrânea; e **R**: isolamento da fonte, estabilização da fonte, retirada e tratamento das águas com bombeamento e remediação.

É possível avançar para outro componente, conforme é apresentado pelas setas no ciclo proposto. Vale ressaltar que deve sempre haver interação entre os diferentes componentes do ciclo.

Seguindo a direção desta questão específica, o próximo componente é *Projeto da Rede de Monitoramento*. Neste contexto análises laboratoriais e de campo são necessárias. O projeto consta de: 1 - **quem** irá realizar as análises; 2 - o **quê** será analisado (variáveis já definidas nas informações necessárias); 3 - **qual** meio (solo: furos a trado a diferentes profundidades e/ou água: tensiômetro - para a zona não saturada - *Bailer*, Bomba - submersível, compressão de ar); 4 - **custos**; e 5 - **frequência** da amostragem (mensal, trimestrais etc.).

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).

O próximo componente é o *Manuseio dos Dados*, onde análises são realizadas por profissional e equipe qualificada. A principal atividade é converter os dados em informações que vão de encontro aos estabelecidos no componente: *Informações Necessárias*, associados aos objetivos da gestão.

Completando o ciclo, considera-se a *Avaliação e Relatórios das Atividades*, que objetiva a utilização das informações. Esse componente é de fundamental importância, e é onde mapas, planilhas, relatórios entre outros, são elaborados para diferentes audiências dentro da qualidade requerida.

3.4.10. Estudo de Caso

A UHE de Estreito no Rio Tocantins apresenta problemas em cemitérios, em função da elevação do nível freático que podem ser desencadeados. Esta questão foi observada, principalmente, nos cemitérios das cidades de Carolina/MA e Babaçulândia/TO afetadas pelo reservatório da UHE de Estreito.

Nos estudos sobre o problema apresentado, observou-se que a qualidade da água já estava comprometida antes do preenchimento do reservatório. Essa informação é baseada nos valores anômalos de pH, TDS, dureza, nitrato, cloreto, sódio, coliformes totais e fecais.

A presença destes indicadores estaria associada à utilização de fossas negras, algumas com profundidade bem próxima ao nível freático, portanto, não sendo recomendada para o abastecimento humano.

Com a descontinuidade dos sepultamentos em 2017 era esperado a diminuição gradual dos valores de putrescina e cadaverina, em curto a médio prazo. No entanto, o monitoramento mostrou que os contaminantes no aquífero raso na área do cemitério ainda persistem, inclusive tendo sido registrados aumentos dos valores de cadaverina.

A interpretação deste dado é que a manutenção dos contaminantes está relacionada ao comportamento da pluma de contaminação e a questões relativas à decomposição dos cadáveres, principalmente dos sepultados entre 2012 e 2017, que podem estar passando por um processo conservativo denominado de saponificação (Lemes *et al.*, 2022).

No caso do cemitério de Carolina, o comportamento da pluma de contaminação é determinado pelas seguintes situações:

- Relevo plano na área e a proximidade do cemitério com a borda do reservatório. Estes fatores favorecem a redução do gradiente e do fluxo hidráulico, podendo inclusive estagnar ou inverter o fluxo da água subterrânea.

Neste caso, conforme observado em diversos poços de monitoramento localizados em áreas planas próximas à margem do reservatório, a cota de operação exerce influência nos níveis d'água destes poços, ou seja, na variação local do nível freático.

Em alguns casos, especialmente no período de seca, o nível freático do poço é o mesmo ou mais baixo do que a cota de operação do reservatório, o que poderia implicar, localmente, na estagnação ou inversão do fluxo hídrico.

Já nos períodos de máxima elevação, o nível freático coincide com a profundidade de sepultamento, ou seja, ocorre o alagamento da sepultura.

- Processo de difusão química que resulta na propagação da pluma. Neste caso, o contaminante migra de um ponto de maior concentração para um ponto de menor concentração. O material na região do cemitério é areno-argiloso, que facilita o processo de difusão química e de saponificação dos cadáveres.
- Reduzida profundidade dos sepultamentos, estimada menor do que 1,5 metro. Este fator sugere que os corpos foram sepultados dentro da zona de variação do nível freático. Portanto, a decomposição ocorre em ambientes aeróbio e anaeróbio, definindo uma dinâmica bacteriológica distinta no processo de putrefação, o que favorece o processo de saponificação.

Para evitar o efeito de dispersão química, recomenda-se que o poço de monitoramento seja construído fora do cone de depressão de poços de bombeamento (para se evitar a inversão de fluxo) e que esteja a maiores distâncias dos focos da contaminação.

Além dos fatores geológicos que podem influenciar na difusão da pluma de contaminação, há outros casos associados às condições de decomposição dos cadáveres que devem ser levados em consideração na avaliação, pois influenciam diretamente no tempo de permanência e de dissolução da pluma, bem como na concentração dos contaminantes ao longo do tempo.

O cadáver sepultado está sujeito a processos transformativos destrutivos (putrefativos) e conservativos (mumificação) que ocorrem dentro de um ambiente fechado (Campos, 2007). Estes processos dependem de diversas variáveis, sendo as principais a profundidade e tipo de sepultamento (tumulação ou gaveta), a temperatura, a técnica de embalsamento utilizada, a presença de água no nível de sepultamento, a umidade, o acesso de insetos e microrganismos ao cadáver (via endógena ou exógena) e o tipo de solo.

Rodrigues *et al.* (1984) observam que cadáveres sepultados a profundidades inferiores a 1,5 metro se decompõem mais rapidamente, sendo a ação da fauna cadavérica maior. Além da aeração, a vedação influencia diretamente na umidade dentro da urna mortuária, o que permite ou não a infiltração de água, bem como a saída ou não do necrochorume.

A decomposição também pode ocorrer de forma não homogênea no cadáver ou em diferentes taxas de decomposição, dependendo da variação de temperatura, umidade e outros fatores.

De acordo com Nascimento Filho *et al.* (2001), se a umidade do solo for elevada, pode ocorrer a saponificação ou adipocera. Esse processo é caracterizado pela hidrólise da gordura, com a liberação de ácidos graxos (triglicerídeos), presentes no tecido adiposo, que têm acidez e se unem a minerais do organismo como cálcio e magnésio, formando sabão e inibindo a ação de bactérias putrefativas, com consequente retardo da decomposição do cadáver.

Nos cemitérios brasileiros, a saponificação é comum, em razão do clima quente e úmido e da invasão das sepulturas por águas subterrâneas e superficiais. Antunes *et al.* (1998) relatam em seu estudo que no cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, em São Paulo, a cada 30 corpos exumados, sete apresentam retardamento da decomposição devido à umidade excessiva e proximidade com o nível freático.

No estudo realizado no cemitério de São João Batista da cidade do Leme, em São Paulo, Canizela (2022) relata que utilizou amostras coletadas em uma sepultura, onde o cadáver estava imerso em água do nível freático, o que mantinha o corpo saponificado, há mais de 12 anos. Amostras de outra sepultura cujo corpo, mesmo não estando em contato com a água freática, também se mantinha saponificado por cerca de 12 anos, devido à alta umidade do terreno.

Ao considerar que o preenchimento do reservatório foi finalizado em 2012 e que os sepultamentos foram descontinuados apenas em junho de 2017, conforme informado pela Prefeitura Municipal de Carolina - MA, há um período de 5 anos em que os sepultamentos foram realizados em condições mais favoráveis ao processo de saponificação, ou seja, em ambiente mais úmido e próximo da zona de variação do nível freático.

Neste contexto, tem-se o entendimento de ainda existirem cadáveres em processo de decomposição, devido ao retardamento causado pela saponificação. Portanto, ainda produzindo cadaverina e putrescina, eventualmente, em valores mais elevados dependendo do estágio de decomposição, do número de cadáveres, do período do ano, do gradiente hidráulico, do sentido (fluxo/estagnação) e da difusão química da pluma contaminante.

Vale lembrar que o cemitério de Carolina tem mais de 50 anos, e de acordo com a análise de imagens de satélite (*Google Earth images*), o cemitério já estaria com lotação ou poucos locais para novos sepultamentos desde 2009. Surge, portanto, a probabilidade de ter ocorrido a rotatividade de covas. Neste sentido, é possível que alguns sepultamentos tenham sido feitos em locais com contaminação prévia no solo, o que poderia aumentar a concentração e o tempo de dissolução da pluma de contaminação.

A contaminação do nível freático por necrochorume é observada em diversos cemitérios no Brasil, como, por exemplo, o de São João Batista, em Suzano - SP, Vila Nova Cachoeirinha, em São Paulo - SP e o Campo da Esperança, em Brasília - DF, entre outros.

A grande maioria continua a realizar sepultamentos e buscam se adequar a legislação. Alguns adotam a concepção de cemitérios verticais, que ao contrário dos que utilizam a tumulação, diminui o risco de contaminação do nível freático por necrochorume. Há também exemplos, como o cemitério Parque dos Crisântemos, em Itajaí - SC, que foi interditado pela justiça em 2018, em que os sepultamentos foram suspensos.

Vale ressaltar que em todos os cemitérios em que foi constatada a contaminação do nível freático por necrochorume não foram tomadas medidas efetivas de realocação da necrópole, de recuperação do nível freático ou do solo contaminado.

Tais ações demandam técnicas e processos complexos de descontaminação, como barreiras reativas permeáveis, biorremediação, estações de bombeamento e tratamento de necrochorume (de forma anaeróbica) e utilização de compostos químicos reativos (peróxido de hidrogênio) que são nocivos à saúde.

Além disso, a exumação de cadáveres ainda em processo de decomposição pode gerar um problema maior de saúde pública, uma vez que os microrganismos infectocontagiosos do necrochorume proliferam doenças como tétano, tuberculose, febre tifoide, gastroenterite, diarreia, leptospirose, cólera, meningite, erupções cutâneas, entre outras.

Portanto, a exumação de cadáveres em processo de saponificação, além de trazer grande risco à saúde pública, geraria conflitos de natureza religiosa e socioeconômica com a comunidade.

O tratamento da contaminação local é tecnicamente difícil ou até impossibilitada, uma vez que não se podem determinar os limites da pluma de necrochorume e da contaminação no restante da área urbana, a atenuação natural, técnica amplamente difundida atualmente, é a opção mais adequada.

O tempo de decomposição de cadáveres em processo de saponificação é, geralmente, maior do que em condições ideais de decomposição putrefativa. Além disso, o fluxo lento ou a estagnação da pluma resulta numa dissolução mais lenta.

Portanto, estima-se que o período para a atenuação natural da pluma contaminante do cemitério de Carolina é de médio a longo prazo. O monitoramento, a partir da amostragem dos poços e do registro de dados históricos, deve ser realizado até a contaminação finalmente deixar de ser registrada.

Neste sentido o ciclo de Monitoramento e Avaliação proposto neste trabalho pode ser adaptado especificamente para estudos de cemitérios afetados pela elevação do nível freático devido à formação de reservatórios de UHEs.

3.4.11. Saturação de Cavernas Vadasas – Estudo de Caso

Este item visa analisar o impacto que uma usina hidrelétrica pode causar ao atingir cavernas vadasas através do seu reservatório. Neste caso, a mudança do nível de base pode ocasionar abatimentos de cavernas submersas e outros problemas (Marinos *et al.*, 1997; Piló, 1999).

Um impacto significativo ocorreu na UHE Serra da Mesa com o alagamento de cavernas, (Figuras 3.18) em rochas carbonáticas (Cruz & Piló, 2019). Houve expulsão de morcegos de seu habitat natural e disseminação de doenças, com a perda de 2.641 bovinos na região afetada (Ribeiro, 2018).



Figura 3. 18. Foto antes do preenchimento apresentando pela seta uma caverna em rochas calcáreas antes do alagamento em Serra da Mesa (Cruz & Piló, 2019).

Em cada caso estudado, adaptações devem ser realizadas nas técnicas de prospecção às condições locais de geologia, hidrogeologia e hidrologia (Feitosa *et al.*, 2008). Portanto, esse entendimento vem perfeitamente ao encontro da estratégia metodológica proposta neste trabalho.

A área de uma caverna e as descrições das feições físicas envolvidas no contexto cárstico devem ficar a cargo de geólogos especializados no referido tema (Figura 3.19).

Diversos reservatórios causaram impactos negativos em cavidades naturais como, por exemplo, os das UHEs de Belo Monte (PA), no rio Xingu, de Estreito, na divisa entre MA/TO, e de Serra da Mesa (GO), no rio Tocantins (Cruz & Piló, 2019).

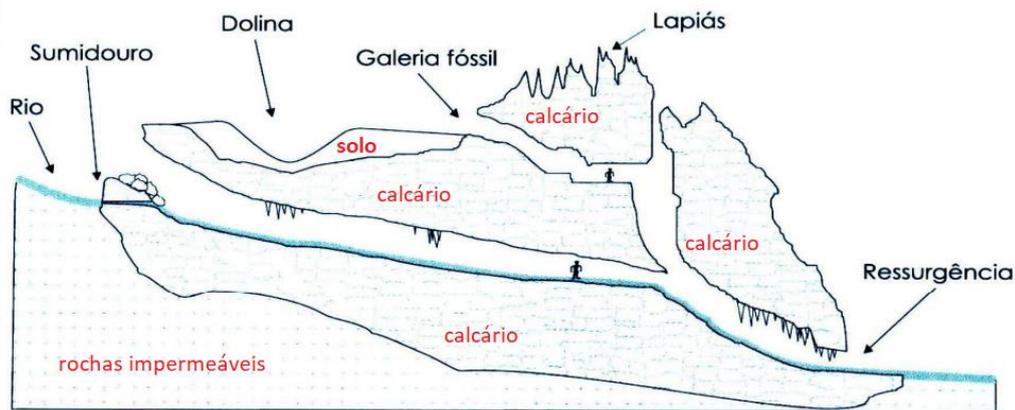


Figura 3. 19. Representação do relevo cárstico (Auler, 2005).

Dos impactos investigados, destaca-se, o preenchimento de cavidades cársticas como o que ocorreu na UHE Serra da Mesa (Figura 3.18), localizada na bacia do Alto Tocantins, em Goiás. Após o preenchimento das cavernas e dispersão de morcegos, houve a propagação de raiva equina e bovina na região. Esta constatação levou o IBAMA, a solicitar um Plano de Monitoramento e Combate a esta doença (IBAMA, 2010).

A UHE Serra da Mesa foi criada para atender ao mercado de energia elétrica. Entrou em operação em 1998 com três unidades geradoras de 1.275 MW. Possui o maior reservatório do Brasil em volume d'água com 54,4 bilhões numa área de 1.780 km² de espelho d'água. A altitude máxima é de 460 metros. É uma das principais usinas do Sistema de Integração Nacional - SIN, além de ser uma regente na cascata do rio Tocantins (Figura 3.20).

Durante o levantamento das cavidades naturais foram reconhecidas mais de 150 ocorrências de feições cársticas, entre grutas, cavernas, dolinas e abismos, nos municípios de Colinas do Sul, Uruaçu, Niquelândia, Santa Rita do Novo Destino, Campinaçu e Minaçu, das quais 15 foram consideradas de interesse, por estarem localizadas nas proximidades da zona influenciada pelo preenchimento completo do reservatório (Figura 3.21).



Figura 3. 20. UHes e reservatórios da bacia do rio Tocantins (ONS, 2022).

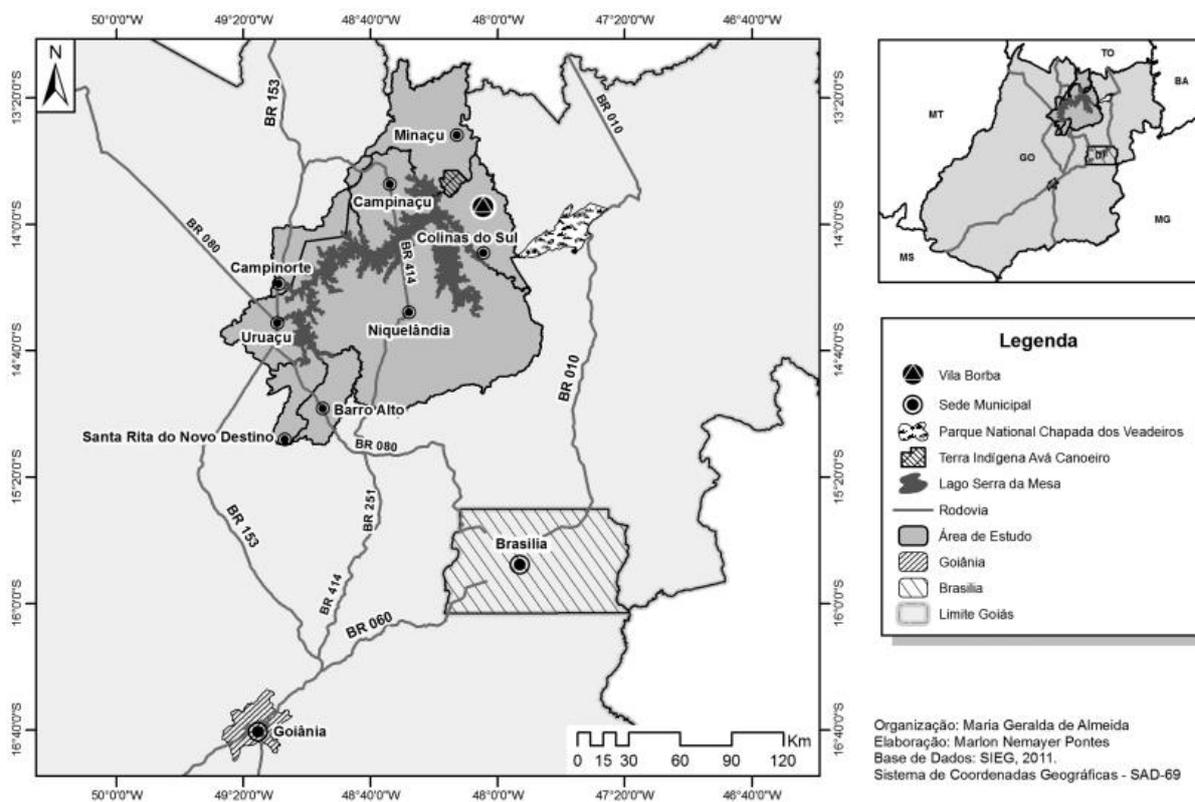


Figura 3. 21. Municípios com ocorrências de estruturas cársticas e zona de influência da UHE Serra da Mesa (Almeida, 2012).

As províncias cársticas correspondem aos domínios geológicos de ocorrência de rochas calcárias, cujas características de porosidade/permeabilidade intersticial ou fissural foram, ocasionalmente, ampliadas por processos de dissolução da rocha pela água meteórica que infiltra (Feitosa *et al.*, 2008).

Outros impactos analisados nesse empreendimento foram sintetizados em planos ambientais específicos (Gomes, 2011):

- Plano de Monitoramento das concentrações de mercúrio em diversos compartimentos biogeoquímicos do reservatório da UHE Serra da Mesa;
- Plano de demarcação da cota de desapropriação do reservatório da UHE Serra da Mesa;
- Plano geral de desmatamento da UHE Serra da Mesa;
- Plano de comunicação social e educação ambiental;
- Levantamento das áreas protegidas no entorno do reservatório;
- Plano de monitoramento do nível freático.

No município de Niquelândia foram realizados estudos com morcegos antes da formação da UHE Serra da Mesa (Bredt & Caetano-Junior, 1996), mas um número significativo de casos de raiva no gado da região foi constatado depois que ocorreram diversos alagamentos das cavernas devido ao surgimento do reservatório (Tomaz *et al.*, 2007).

As cavernas servem de abrigos para os morcegos, assim como minas, coberturas de casas sem forro e bueiros (Uieda *et al.* 1996).

O morcego estudado nesse município, à margem do reservatório de Serra da Mesa, é o frugívoro (*Carollia perspicillata*) (Figura 3.22), pertence à família *Phyllostomidae* (Tomaz *et al.*, 2007).



Figura 3. 22. Colônia mista de morcegos em uma caverna arenítica, Araripe (CE). No centro da foto a espécie: *Carollia perspicillata*. (Cruz & Piló, 2019).

Thomaz *et al.* (2007) sugerem o monitoramento dos morcegos e mencionam a integração entre essas atividades e as etapas da implantação de uma UHE para que se minimize impactos ao meio ambiente e à saúde pública. Ressalta-se que a raiva é uma enfermidade infecciosa que traz perdas econômicas significativas, principalmente, nestas regiões onde a pecuária é destaque.

Portanto, destaca-se que o ciclo é a oportunidade de se entender casos específicos como o alagamento de cavernas e suas consequências, cujas variáveis a serem estudadas não são as que, regularmente, são apresentadas no projeto de um sistema de UHE-reservatório.

Entretanto, trabalhos conjuntos, que incluem atividades de levantamento de cavernas e estudos de morcegos, por exemplo, seriam adequadamente incluídas em um momento diferente do ciclo, para evitar problemas para a região e comunidade local.

É sugerido, então, um estudo para catalogar as feições cársticas a serem monitoradas com a finalidade de confecção de um mapa de vulnerabilidade do patrimônio espeleológico com acréscimo de localização das cavidades que são passíveis de inundação. É indicada a análise de multicritérios (mapas de solos, geologia, vulnerabilidade de aquíferos, presença de cavidades cársticas, geomorfologia, uso e ocupação) (Gomes, 2010).

O ambiente cárstico é complexo e muito sensível, do ponto de vista hidrogeológico. Mas com o conhecimento específico associado ao monitoramento e a avaliação é possível proteger as cavidades e ecossistemas.

3.4.12. Aumento do Custo para Instalação de Infraestrutura Urbana

O desenvolvimento urbano dos municípios vizinhos ao reservatório de uma UHE exige ampliações ou instalações de infraestruturas, que estão intrinsecamente relacionadas às questões econômicas proporcionadas por esse empreendimento, como por exemplo, as usinas do rio Tocantins (Maldaner *et al.*, 2019). A gestão hidrogeológica bem integrada nas diversas etapas de implantação dessas usinas apoiarão os estudos de viabilidade do empreendimento.

Vale destacar que o reservatório atrai número significativo de habitantes nas terras vizinhas, ou seja, promovem o crescimento urbano com novos usos, o que inclui, turismo, pesca, navegação, loteamento, irrigação, entre outras atividades.

A gestão, de uma maneira geral, tende a ser embasada em informações e dados que permitam representação mais próxima do real do meio ambiente (Ward *et al.*, 1990). No caso da questão em análise, são os impactos do aumento do custo para implantação da infraestrutura relacionado à elevação do nível freático devido à UHE.

A sustentabilidade do desenvolvimento econômico decorrente da instalação da UHE pode ser comprometida devido aos aumentos do custo no saneamento básico (implantação de sistemas de águas pluviais, esgotamento sanitário, abastecimento de água, disposição final de resíduos sólidos etc.), assim como também nas áreas de cemitérios, postos de combustíveis, comércios e indústrias.

As obras de infraestrutura como saneamento são consideradas atividades modificadoras do meio ambiente e, por si só, são sujeitas à avaliação de impacto ambiental (Brasil, 1986 e Albuquerque Filho, 2002). Dessa forma, os impactos ambientais devem ser considerados nas etapas de projeto executivo e durante a execução das obras.

Com a interferência do reservatório e a manutenção de níveis mais rasos, pode haver o aumento de custos de implantação. Um planejamento baseado em um projeto de monitoramento pode evitar a ampliação de gastos.

3.4.13. Estudo de Caso

A UHE de Luís Eduardo Magalhães ou Lajeado é um caso em que houve flutuação do nível freático em amplas áreas com o preenchimento do reservatório (CELTINS, 1996).

As cidades de Palmas e Porto Nacional (cerca de 50 e 100 km de distância da barragem, respectivamente) tiveram impactos sanitários, devido a elevação do nível do aquífero livre (Figura 3.23).

Antes da existência do reservatório, o subsolo do entorno encontravam-se sob condições não saturadas, ou pelo menos, com níveis mais profundos, o que resulta em maior resistência às instabilizações (CELTINS, 1996).

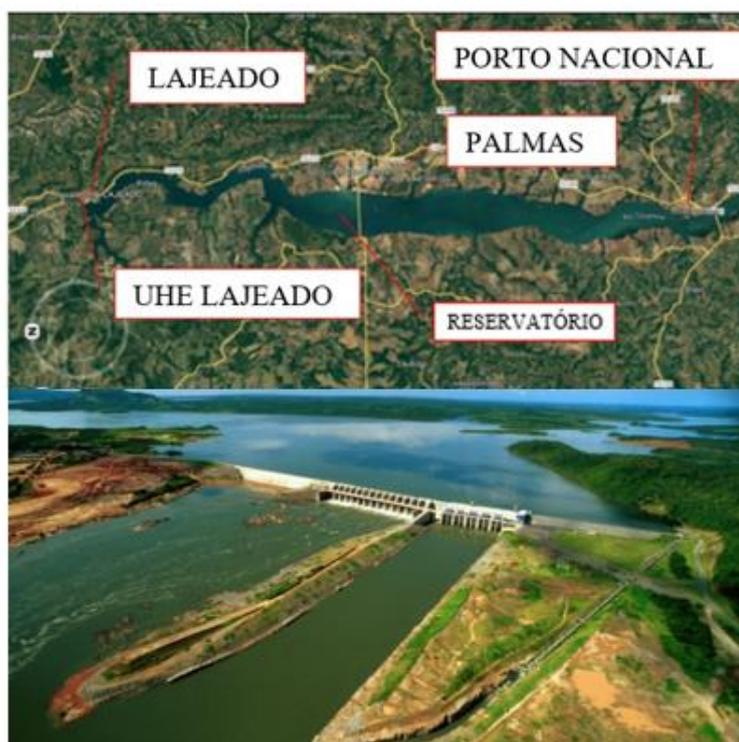


Figura 3. 23. UHE Luís Eduardo Magalhães ou Lajeado – Imagem superior: localização (fonte *Google Earth*) e vista do reservatório e imagem inferior: imagem da barragem com vistas para jusante e montante. Disponível em: <https://turismo.to.gov.br/regioes-turisticas/serras-e-lago-/principais-atrativos/lajeado/usina-hidreletrica-luis-eduardo-magalhaes/>, acesso em 25 de abril de 22).

O município de Lajeado foi escolhido para abrigar o sistema barragem-reservatório, por se tratar de uma região com aspectos adequados, que inclui solos pobres, sem potencial agrícola significativo e ambiente natural bastante degradado.

A área de influência do empreendimento da UHE Lajeado tem como predominância a vegetação de cerrado e nas margens dos cursos d'água ocorrem matas de galeria.

Alguns programas ambientais de mitigação foram propostos e as questões de interesse deste item estão inseridas no programa: adequação, recomposição e melhoria de infraestrutura a ser afetada pelo reservatório (THEMAG, 1996).

Portanto, durante as etapas de preenchimento e operação da UHE Lajeado, as áreas marginais ao reservatório, que inclui o pé da serra de Lajeado, orla do município de Porto Nacional, braço direito do rio Taquaruçu, no limite da área urbana de Palmas foram afetados pelo fluxo d'água.

No relatório de impacto os atributos foram negativos com probabilidade de ocorrência certa; alcance espacial disperso; duração permanente; e reversibilidade irreversível (destacado como importância elevada).

As medidas proposta para mitigação deste impacto incluíram: monitoramento; execução de obras de contenção; instalação de obras de proteção superficial em áreas críticas; e criação de áreas de preservação na região da Serra do Lajeado.

Estas consequências sanitárias nas cidades de Palmas e Porto Nacional, devido à alteração do fluxo das águas subterrâneas, foram evidenciadas nas bordas com terraços com baixa declividade e em depressões naturais.

Os efeitos foram alagamentos, interferência na paisagem e restrições nas possibilidades de utilização da orla do reservatório em determinados locais. Os estudos ambientais ainda mencionam que as águas empoçadas poderiam apresentar criadores de invertebrados necessitando de estudos médico-sanitários.

A operação dessa usina estima um desnível de 4 metros, e em períodos secos o cenário é agravado, pois o aspecto degradado será visível devido a cobertura de lodo.

Outra intervenção dos usos do solo ocorre em jazidas de areia e argila no baixo-terraço. A exploração em solos não saturados deixaram de existir, devido a elevação do nível freático, pois a natureza do material não permite lavra subaquática (CELTINS, 1996).

Para recomposição e melhoria da infraestrutura sanitária, devido à esses impactos, foi proposta a relocação de instalações de abastecimento d'água e de esgotamento sanitário.

A seguir são listadas ações realizadas para mitigação na UHE Lajeado (CELTINS, 1996):

- Relocação e alteamento de 17 km de estradas asfaltadas;
- relocação e alteamento de 20 km de estradas de terra;
- construção e/ou alteamento de 750 metros de pontes;
- recomposição da travessia de Palmas em direção a Paraíso com deslocamento de 13 km ao norte, em seção mais estreita do reservatório;
- reconstrução dos acessos às fazendas;
- remoção e relocação das linhas de transmissão de 138 kV, 69 kV, 34,5 kV;
- remoção e relocação das linhas de distribuição que abastecem fazendas e áreas e urbanas; relocação da captação do córrego Água Fria em Palmas e de um poço profundo em Porto Nacional; e
- instalação de fossas sépticas em substituição daquelas a serem afetadas pela subida do nível freático.

Todas essas ações demandam um projeto de monitoramento e avaliação, que será abordado no item seguinte.

3.4.14. Monitoramento Hidrogeológico na Prevenção de Aumento de Custos de Implantação de Infraestrutura Urbana

As informações necessárias para a gestão hidrogeológica inicia-se com as tarefas da gestão, do Ciclo do Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica e incluem o levantamento de informações secundárias, o que possibilita um monitoramento adequado.

As informações no estado do Tocantins devem ser levantadas, em princípio, na Secretaria de Transportes e Obras do Tocantins, Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de Tocantins - DERTINS, prefeituras municipais, Companhia de Energia Elétrica do Estado do Tocantins - CELTINS e Companhia de Saneamento do Tocantins - SANEATINS.

Os estudos prévios à instalação da UHE Lajeado estabeleceram monitoramento da variação dos níveis d'água do rio ao longo das zonas marginais do reservatório e dos principais afluentes. Para isso, foram sugeridas as seguintes ações: implantação de postos limnimétricos; relocação do posto fluviométrico de Porto Nacional; e implantação de limnígrafo junto a barragem.

Outro monitoramento do clima local também foi apresentado, com o objetivo de avaliar possíveis alterações das variáveis meteorológicas. As ações propostas foram: implantação de estação automática junto ao eixo; e reativação da estação de Porto Nacional. Neste caso, os dados foram fornecidos pela Universidade do Tocantins - UNITINS, pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

Nesta questão específica, o dado mais importante é o valor da sobrelevação do nível freático em diferentes faixas marginais ao reservatório, de forma a se viabilizar e conhecer as áreas em que obras podem ser afetadas ou locais em que as futuras infraestruturas serão implantadas.

A variação natural e sazonal dos níveis, em função do clima, e as áreas em que já ocorriam níveis rasos, mesmo antes da formação do reservatório, desempenham papel de destaque no monitoramento. Estas áreas são representadas por faixas de ocorrência de gleissolos e campos úmidos, associadas a veredas e outros ambientes ricos em vegetação dominada por palmeiras.

Neste sentido, é interessante observar que uma das falhas de um projeto de monitoramento e avaliação ocorre quando se inicia diretamente na coleta de dados, sem considerar devidamente os componentes e tarefas precedentes (Timmerman, 2000). O risco de redundância é significativo no que Ward *et al.* (1990) ponderam como aquisição de “*dados ricos*” ou “*dados pobres*”.

Outro ponto interessante para ser abordado é relacionado as informações necessárias, que são derivadas de um número de questões da gestão hidrogeológica. Neste contexto, essa conclusão pode ser alcançada somente ao final de um ciclo e com a execução de um novo ciclo, objetivando sempre a melhor compreensão das condições da água subterrânea (Figura 3.24).

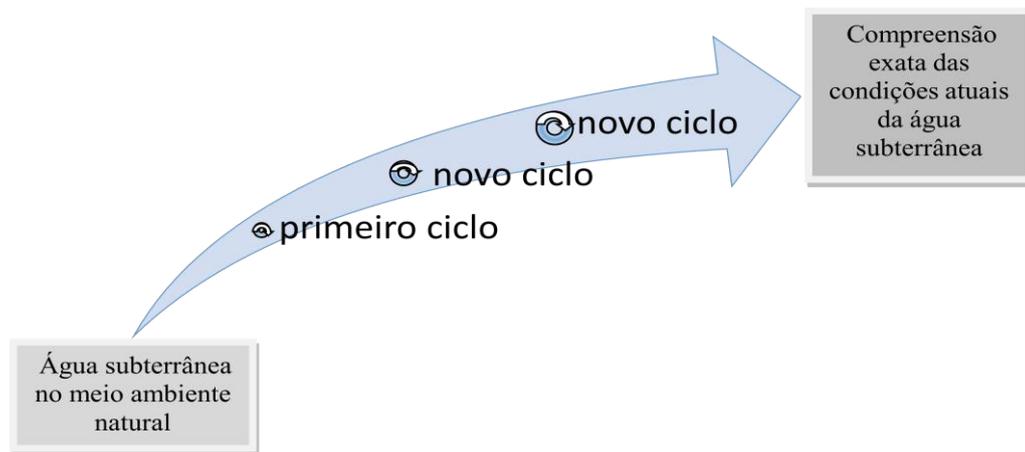


Figura 3. 24. Sistema de monitoramento e avaliação hidrogeológica em reservatórios de UHE seguindo o fluxo de informação (adaptado de Ward *et al.*, 1990).

Os dados coletados são aplicados aos estudos hidrogeológicos que identificam e caracterizam as unidades aquíferas e variações e elevações do nível freático, em função do reservatório.

Paralelamente a essa coleta, os dados hidrometeorológicos são indispensáveis para identificação das oscilações naturais e sazonais, de acordo com períodos chuvosos e secos. Além do mais, outras informações são requeridas como: características hidráulicas da barragem e hidrogeológicas da área de inundação e a oscilação de operação do nível do reservatório (Pimentel, 2004).

Nos impactos à infraestrutura subterrânea, o nível freático é um elemento que oferece restrições a processos construtivos e requer solução técnica compatível com o nível de complexidade que a estrutura oferece.

A falta de conhecimento prévio do comportamento dos aquíferos pode resultar em um prejuízo para as gerações futuras com dados de drenagens com níveis elevados, carreamento de materiais e consumo de energia a partir de bombeamento de água, o que não é compatível com a evolução dos conceitos de sustentabilidade (Passamani & Guimar, 2019).

3.4.15. Diminuição da Proteção dos Aquíferos Freáticos

Neste item o foco é a diminuição da função de proteção natural na zona não saturada do aquífero raso, devido à elevação do freático causada pela formação do reservatório e pela operação de uma UHE na região amazônica.

Essa região está em destaque para o desenvolvimento do setor elétrico no que se diz respeito à geração hidráulica. Estudos de inventários mapearam um potencial da ordem de 68 GW a ser explorado no Brasil, dos quais 65% estão disponíveis na região amazônica (Soares, 2022).

No estado do Pará a disponibilidade hídrica, apesar de vasta, deve ser tratada com cautela, em virtude do avanço urbano e industrial. Suas características topográficas e hidroclimáticas propiciam um potencial hidroelétrico significativo, com mais de um terço do potencial da região Norte e 12% da energia gerada no Brasil (Cirilo, 2022).

Conclui-se que os municípios limítrofes aos reservatórios ampliam seu desenvolvimento, em razão da atratividade dos novos corpos hídricos instalados. É importante que impactos hidrogeológicos sejam monitorados e avaliados.

3.4.16. Estudo de caso

Um exemplo desse impacto é o caso da influência da UHE Estreito na divisa dos estados de Tocantins e Maranhão, com capacidade instalada de 1.087 MW e energia assegurada de 584,9 MW médios, que opera a fio d'água no regime de vazões do rio, na cota 156 m.

O reservatório acumula um volume da ordem de 540 bilhões de litros e ocupa uma área de 555 km². Dessa área, cerca de 155 km² corresponde ao leito do rio nas condições normais. A área inundada impactou a cidade de Carolina, MA, com a elevação do nível freático.

Diferente do que ocorre quando poluentes oriundos da superfície percolam, as camadas subterrâneas podem atingir a zona saturada dos aquíferos. No caso em análise, a vulnerabilidade é ampliada significativamente, em função do nível do freático ter se aproximado do poluente. Além disso, há interação entre as águas do aquífero freático com a do reservatório, o que resulta em novos equilíbrios nas concentrações de parâmetros que atribuem qualidade à água.

É importante destacar que a vulnerabilidade de um aquífero é função da acessibilidade da zona saturada e da capacidade de atenuação da zona não saturada (Leite, 2022).

O Estudo de Impacto Ambiental (CNEC, 2005) estimou que a subida do nível freático na área do reservatório de Estreito poderia causar interferências em cemitérios, fossas negras, poços e cisternas. Assim, esse estudo serviu de subsídio para o Projeto Básico Ambiental, que incluiu um programa de monitoramento com objetivo de adotar medidas mitigadoras e compensatórias pertinentes.

Cemitérios que são localizados em áreas com nível freático profundo apresentam baixo risco de contaminação e, em tese, atendem à legislação vigente (Santos, 2015). Entretanto, indicadores como a putrescina, cadaverina e bactérias do grupo dos clostrídios sulfito redutores mostraram que a água subterrânea foi contaminada. Essas substâncias nocivas que infiltram no solo não são depuradas com diminuição da capacidade de atenuação da zona não saturada, que se torna menos espessa.

O principal condicionante para determinar se um cemitério deve ser transferido ou ter os impactos mitigados é a profundidade das sepulturas. É recomendado que haja um distanciamento de, pelo menos, um metro e meio acima do nível freático mais elevado medido no fim da estação chuvosa (Brasil, 2006 e Brasil, 2003).

Outras variáveis também devem ser analisadas e caracterizadas de acordo com a região, como no exemplo as que proporcionam o conhecimento do regime hidrometeorológico.

Assim, estabelecer uma metodologia estratégica cíclica de monitoramento e avaliação é fundamental, pois permite integrar dados históricos com a descrição do modelo conceitual.

Dessa maneira, é possível valorizar os dados e informações existentes, a fim de evitar as falhas de continuidade dos programas de monitoramento. Adicionalmente, o ciclo pode integrar outros métodos de coleta de dados para identificar fontes potenciais de contaminação da água subterrânea (Figura 3.25).

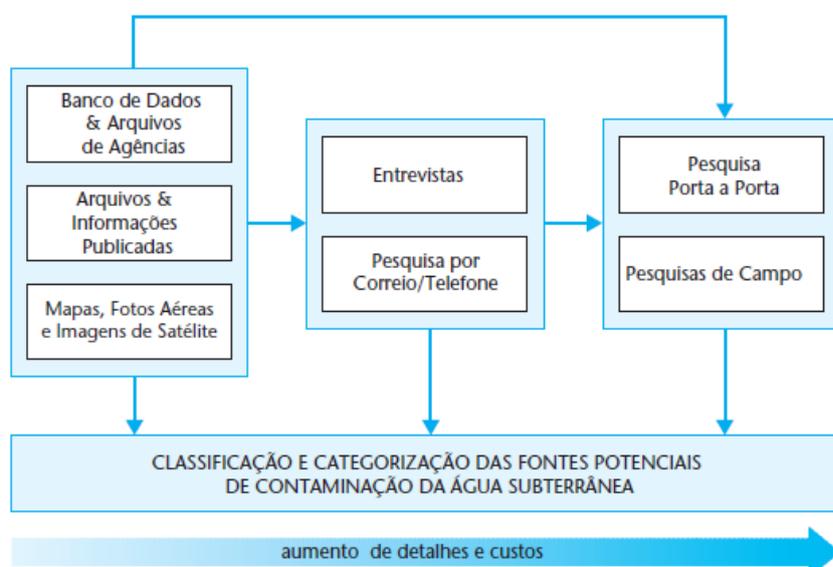


Figura 3. 25. Métodos de coleta de dados para identificar fontes potenciais de contaminação da água subterrânea (USEPA, 1991 citado por Foster *et al.*, 2006).

No Norte do Brasil não é possível determinar, por meio de cadastros disponíveis, os parâmetros dos aquíferos rasos, os quais são bastante variáveis e nem sempre estão à disposição (CNEC, 2005).

Pode-se considerar, somado a tudo isso, que estabelecer uma estratégia metodológica de projeto de monitoramento e avaliação é uma maneira de evitar imprevistos.

Não é raro que outros riscos se sobreponham, além do previsto no escopo de uma atividade, como por exemplo contaminação da qualidade d'água subterrâneas, que pode surgir em detrimento às causas comumente identificadas, tais como mal uso e manejo do solo, exploração excessiva dos recursos hídricos subterrâneos, descumprimento de normas legais e a crescimento da urbanização (Bandeira *et al.*, 2021).

Nas regiões aluvionares do Rio Tocantins a elevação do nível freático pode chegar a 10 metros e, após o preenchimento do reservatório, pode alcançar uma distância de 60 metros da borda em apenas um dia. No caso de uma semana ou um mês, o alcance pode chegar de 150 a 350 metros (CNEC, 2005).

Com essa facilidade de aproveitar a água subterrânea em uma menor profundidade, novos poços rasos podem ser construídos. Entretanto, com a contaminação, como no caso de áreas urbanas situadas às margens do reservatório da UHE de Estreito, pode resultar no consumo de águas impróprias pela população.

A proposta de propagar a informação por meio do Ciclo do Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica atende às técnicas consagradas e dispõe de numa sequência lógica de tarefas acrescentado a uma dinâmica e flexibilização nos seguintes componentes dispostos no ciclo: Informações Necessárias, Coleta de Dados, Análise de Dados e Utilização da Informação.

No caso, o objetivo é definir áreas potenciais de influência do preenchimento do reservatório no nível freático e proporcionar subsídio para a operação do sistema UHE-reservatório.

Para este tipo de empreendimento deve-se considerar campanhas antes, durante e após o preenchimento do reservatório com duas séries de medições do nível d'água e considerar estações secas e chuvosas, numa frequência quinzenal em um período de dois anos antes e depois da formação do reservatório.

Um cadastro das possíveis fontes de contaminação deve incluir fossas, cemitérios e depósitos de resíduos. Um levantamento junto aos órgãos competentes deve ser realizado, assim como a verificação de planos de zoneamentos. É recomendado, também, manter registros fotográficos e de georreferenciamento para análises futuras.

Os parâmetros e características definem a dinâmica do comportamento do aquífero, como o gradiente hidráulico, a condutividade hidráulica, o coeficiente de armazenamento etc. Outras propriedades que devem ser consideradas são: variações do nível d'água nas bordas (inclusão de levantamento topográfico), frequência mensal antes do início, quinzenal no período de enchimento e posteriormente, com a estabilização do nível d'água, novamente mensal (CNEC, 2005).

Os poços de monitoramento são locados perpendicularmente às margens do reservatório com desníveis da ordem de 30 metros. Estes poços servirão para caracterização geológica, geotécnica e hidrogeológica complementar a que foi levantada em etapas anteriores. Os dados obtidos servirão para a elaboração de mapas potenciométricos. Os pontos de coleta de amostras que não devem sofrer influência de bombeamentos próximos.

Integrado a esse monitoramento quantitativo do nível freático e do fluxo do aquífero, deve-se fazer análises da qualidade d'água.

As partes finais de um projeto de monitoramento e avaliação de impactos ambientais de um sistema UHE-reservatório são apresentados em relatórios com periodicidade variada para os parciais, e anual para os mais consolidados.

Relatórios mais detalhados contém análises integradas de todo o projeto. Enquanto que, os parciais apresentam dados e informações de campo, laboratórios e medições bases para avaliações e consistência acompanhando o desenvolvimento do empreendimento. Recursos que aprimorem os resultados, tais como tabelas, gráficos e mapas são fundamentais.

CAPÍTULO 4 - DISCUSSÕES

Neste capítulo será enfatizada a importância de estabelecer uma estratégia metodológica de monitoramento e avaliação hidrogeológica da alteração do nível freático nas regiões vizinhas ao reservatório de UHEs e os benefícios diretos e indiretos de sua aplicação.

Além da informação produzida sobre os impactos ambientais tratadas no capítulo anterior, o produto desta tese inclui:

- integração dos estudos acerca dos recursos hídricos tanto superficiais quanto subterrâneos;
- definição de trabalhos claros e pragmáticos com atuação conjunta de entidades, que direcionam tarefas de acordo com o objetivo em uma sequência única organizada pelo ciclo;
- flexibilidade e dinâmica das exigências da gestão de recursos hídricos da atualidade;
- melhorias na eficácia e eficiência das tarefas que contém os componentes;

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. Portanto, foram apresentados aspectos relevantes e fundamentais para a aplicação no assunto estudado.

Conforme já apresentado, o ciclo foi dividido em quatro componentes interagindo entre si: informações necessárias, coletas de dados, análise de dados e utilização da informação. Esse formato possibilita o início do monitoramento e avaliação em qualquer um desses componentes e permite seguir para outro aleatoriamente, adaptado ao contexto da situação.

Portanto, ao utilizar o ciclo pela segunda vez é possível seguir um sentido de forma organizada, adequado principalmente para a diversidade das situações brasileiras. Porém, o monitoramento ainda é realizado sem uma visão geral do que o ciclo propõe.

Com base em eventos técnicos apresentados no capítulo dois, por exemplo: *Monitoring Tailor Made I, II, III e IV*, concluiu-se que um ponto fraco no sistema de monitoramento e avaliação, identificado pela segregação em componentes pelo ciclo, é a interpretação da gestão de águas subterrâneas e superficiais para a informação necessária. Portanto, uma vantagem do sistema disposto em componentes, é identificar onde pode ser aprimorado.

Desse modo, é importante cumprir as tarefas da gestão e selecionar as variáveis técnicas das informações necessárias para dar prosseguimento ao ciclo do monitoramento e avaliação.

Essa função deve ser bem executada, levando em consideração todas as variáveis a serem medidas e descritas. O não cumprimento das diretrizes propostas pode resultar um produto equivocado, comprometendo o trabalho como um todo.

A análise de dados é a parte onde os dados produzidos devem ser validados, arquivados e tornados disponíveis. Essa componente apresenta uma estreita relação com as informações necessárias e utilização da informação.

Basicamente, os dados devem ser analisados de modo direto por meio de tabelas, mapas, softwares e gráficos específicos. Um exemplo, de uso da informação é a utilização do diagrama de Piper para apresentação de dados hidroquímicos de classificação das águas subterrâneas.

O diagrama de Piper é uma ferramenta utilizada para classificar o tipo químico predominante da água. A partir da análise direta da qualidade é possível verificar variações composicionais em virtude da sazonalidade ou influência do aquífero livre no reservatório ou no sentido contrário.

A Figura 4.2 apresenta a classificação da água comparando as variações na composição antes e depois da formação do reservatório da UHE Peixe Angical.

A confecção de um mapa com os dados hidroquímicos indicando as isolinhas associadas à localização dos pontos d'água da rede amostral pode ser a base entre os limites para estabelecer usos, evitando assim maiores impactos.

O uso de modelos numéricos com apoio de softwares como MODFLOW e FEFLOW podem ajudar a otimizar a rede amostral pela demonstração 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.

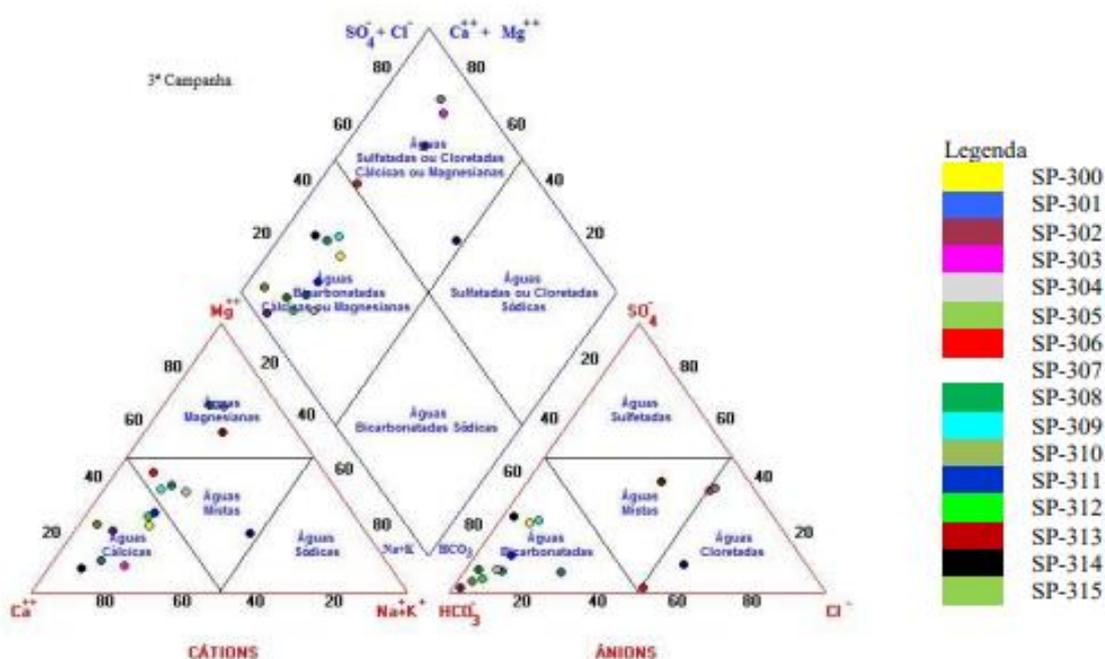


Figura 4. 1. Diagrama de Piper como exemplo de representação de das campanhas de amostragem hidroquímica em Paranã / TO. Área urbana impactada pela UHE Peixe Angical (Souza, 2008).

A componente utilização da informação permite a argumentação sobre a obrigatoriedade da produção de dados e informações para atender a legislação, além de apresentar uma conexão forte com as informações necessárias.

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 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 que envolve 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 o aquífero livre da região e o reservatório.

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 e monitoramento durante um ano hidrológico, que mostrou níveis independentes e ausência de causalidade entre os níveis do reservatório no Rio Xingu e a lagoa.

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após análises de diversos impactos hidrogeológicos ocasionados pelo influxo das águas do reservatório de usinas hidrelétricas (desde a formação e estendendo durante a operação) em direção aos aquíferos freáticos, algumas considerações podem ser enumeradas, de forma a destacar a metodologia estratégica cíclica de monitoramento e avaliação proposta.

Para potencializar os resultados de um projeto de monitoramento e avaliação é fundamental que as atividades sejam direcionadas para satisfazer o entendimento das condições do problema a ser abordado.

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.
- Parceria de 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.
- 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 coletados 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 informações específicas e aos objetivos associados ao projeto de monitoramento e avaliação.

Perspectivas para Implantação em Outras Áreas

A aplicação do ciclo pode proporcionar diversos benefícios, pois o projeto de monitoramento e avaliação aumentará o entendimento hidrogeológico integrado com as outras disciplinas. Assim, os ganhos econômicos e de eficiência em obras com objetivos de solução de problemas hídricos serão maximizados.

As expectativas em processos de monitoramento e avaliação são elevadas, e quando o plano é objetivo e bem definido pode ser aplicado à gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Espera-se que o ciclo seja uma ferramenta que atenda simultaneamente às preocupações da comunidade, dos profissionais de hidrogeologia, dos órgãos de controle, do segmento político e demais atores envolvidos nas questões em estudo.

Essa estratégia metodológica baseada em experiências de outros ciclos pode ser usada em diferentes processos em que o monitoramento e avaliação são fundamentais, tais como: disponibilidade qualitativa e quantitativa de água nos diversos corpos d'água (rios, lagos, reservatórios etc.) e na gestão integrada de bacias hidrográficas.

Os ciclos de avaliação e monitoramento também podem ser aplicados a outros processos, como em áreas industriais, de políticas públicas, de qualidade programas educacionais, dentre outros.

Esta proposta estratégica metodológica é inovadora, pois permite tornar uma bacia hidrográfica sustentável, a partir da aplicação de um modelo de monitoramento, em que é possível incluir componentes como: avaliação científica; conscientização e educação da comunidade; recuperação de custos e apoio político.

Neste caso, é visto que os parâmetros individuais dos componentes do ciclo são distintos daqueles aplicados aos recursos hídricos ou ao meio ambiente. Entretanto, a lógica interna de monitoramento e avaliação é mantida. Assim, há possibilidade de reiniciar o ciclo a partir de qualquer ponto ou de se cruzar resultados, levando em consideração diferentes perspectivas no ciclo.

Pode-se, também, ponderar o desenvolvimento de políticas públicas que buscam, por exemplo, ser mais assertivas e direcionadas para fatores críticos, o seu monitoramento e avaliação deve ser realizado sob a ótica cíclica.

Deve ser realizado conforme a implantação, dentro de uma estratégia metodológica previamente prevista, estabelecendo componentes inter-relacionados e dentro de uma sequência lógica e racional.

Entre as políticas públicas pode-se destacar a mobilidade urbana em uma área onde o ciclo proposto pode ser incluído como estratégia metodológica interessante. Essa estratégia envolve a necessidade constante de mudança nas tarefas com as novas legislações e com as novas tecnologias.

Flexibilidade e dinâmica são pré-requisitos para um projeto desta natureza, que também deve considerar o padrão e a cultura regional. O processo de monitoramento e avaliação deve ser implantando para entender com precisão as necessidades da comunidade. Dessa forma, é recomendada a disponibilização dos dados e informações para subsidiar melhorias adequadas nos transportes.

O uso de indicadores para avaliação e monitoramento tem sido frequente em políticas de transportes, no entanto, os processos são distintos. Enquanto a avaliação constitui um evento único, a monitoração é um processo contínuo, necessitando de *feedbacks* que agreguem valores para a tomada de decisão, o que reforça o uso do ciclo como aplicável nesta área de aplicação.

Saneamento básico e ambiental são áreas que são baseadas em informações e dados de fontes interdisciplinares e origens diversificadas. Um exemplo é a questão da disposição final dos resíduos sólidos.

Para solucionar problemas como contaminação e os impactos socioambientais foram elaboradas as diretrizes nacionais de saneamento básico e a política nacional de resíduos sólidos (Silva *et al.*, 2022). Neste contexto, para atingir melhorias e preservar o meio ambiente, saúde e qualidade de vida humana estudos complexos são necessários.

A construção e operação adequadas em um aterro sanitário assegura a qualidade ambiental da água superficial e subterrânea, do solo e do ar. A NBR 13.896/1997 determina:

- Condições hidrogeológicas favoráveis, assegurando condutividade hidráulica do subsolo inferior a 10^{-8} m/s e espessura de 3 m do solo não saturado entre a parte basal do aterro e o nível do nível freático;
- ii) Terreno com declividade máxima em torno de 30%;
- iii) Distância mínima de 200 metros entre o aterro e corpos d'água superficiais;
- iv) Distância mínima de 500 metros entre o aterro e estabelecimentos populacionais.

Entre os elementos da construção se destacam os revestimentos de impermeabilização de fundo para impedir a infiltração de percolados gerados na lixiviação dos resíduos para o subsolo, nível freático ou áreas adjacentes.

Isso posto, sugere-se uma metodologia estratégica para a gestão de resíduos sólidos. A sequência dos componentes com suas respectivas tarefas apresentadas organiza os esforços necessários para um projeto de monitoramento e avaliação, o que facilitaria a integração e inclusão de todas as atividades exigidas em um projeto de saneamento como este.

Um ciclo de monitoramento e avaliação de resíduos sólidos em áreas urbanas (ou em área com potencial de desenvolvimento), como áreas marginais a reservatórios de UHE, é um tema interessante para estudos futuros.

Para concluir, é importante ressaltar que em áreas urbanas medidas estruturais protetoras são necessárias para minimizar problemas que podem ser ampliados, em função da interferência na infraestrutura existente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACWI. 2022. National Water Quality Monitoring Council - The Monitoring Framework. Disponível em: https://acwi.gov/monitoring/about_the_framework.html. Acesso 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.*
- Albuquerque Filho, J.L.; Saad, A.R.; de Alvarenga, M.C. 2010. Considerações acerca dos impactos ambientais decorrentes da implantação de reservatórios hidrelétricos com ênfase nos efeitos ocorrentes em aquíferos livres e suas consequências. *Geociências, UNESP, São Paulo, v. 29, n. 3, 355-367.*
- Almeida, A.M.; de Macêdo, J.A.B. 2005. Parâmetros físico-químicos de caracterização da contaminação do nível freático por necrochorume. *In: Seminário de Gestão Ambiental – Um convite a interdisciplinaridade. Instituto Vianna Junior – 31/05 a 04/06/2005. Juiz de Fora - MG. 12p.*
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). 2009. Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias dos Rios Tocantins e Araguaia. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2009/PlanoEstrategicoRHTocantins.pdf>. Acesso em 04/04/2022.
- Antunes, B., Bastianon, D., Batello, E., Pacheco, A.; Pellizari, V.; Mendes, J.M. 1998. Contaminação do aquífero livre em cemitérios: estudo de caso. *Águas Subterrâneas, [S. l.], n. 1.*
- ANZECC & ARMCANZ. 2000. Australian guidelines for water quality monitoring and reporting. National Water Quality Management Strategy Paper No 7, Australian and New Zealand Environment and Conservation Council & Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, Canberra. Disponível em: <https://www.waterquality.gov.au/anz-guidelines/resources/previous-guidelines/anzecc-armcanz-2000>. Acesso em: 02/03/2020.
- Bandeira, N.B.; Centeno, L.N.; Cecconello, S.T. 2021. Mapeamento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Jaguarão/RS. *Revista Ambientale. [S. l.], v. 13, n. 4, p. 58–72. DOI: 10.48180/ambientale.v13i4.323.*
- Bessa, M. da 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.*
- Bianchini, M.; Delatorre, A.F.; Fracasso, M.; Neckel, A., Bertoldi, T. 2016. Contaminação de solos por cemitérios: um problema de saúde pública. VII ConGeA - Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. Campina Grande/PB. 21 a 24/11/2016. 4 p.
- Brasil. 1986. Resolução Conama nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745. Acesso em: 13/07/2022.
- Brasil. 2003. Resolução Conama nº 335, de 3 de abril de 2003. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=355. Acesso em: 13/07/2022.
- Brasil. 2006. Resolução Conama nº 368, de 28 de março de 2006. Altera dispositivos da Resolução Conama nº 335, de 3 de abril de 2003, que dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=479. Acesso em 03/02/2022.
- Brasil. 2007a. Manual de Inventário Hidroelétrico e Bacias Hidrográficas Edição 2007 (versão completa e interativa). Ministério de Minas e Energia. CEPEL. Rio de Janeiro. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/manual-de-inventario-hidroeletrico-de-bacias-hidrograficas/documentos/manual-de-inventario-hidroeletrico-e-bacias-hidrograficas-edicao-2007-versao-completa-e-interativa.zip/view>. Acesso em 13/07/2022.

- Brasil. 2007b. Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . Brasília : MME : EPE. 12 v. : il. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Hidrel%C3%A9trica.pdf#search=Potencial%20hidrel%C3%A9trico%20brasileiro%20est%C3%A1%20entre%20os%20cinco%20maiores%20do%20mundo>. Acesso em 13/07/2022.
- Brasil. Resolução CONAMA nº 368 de 28 de março de 2006. Modifica a resolução 335, de 03 de abril de 2003. Disponível em: <http://www.conama.org.br>.
- Bruno, A.F.C. 2019. A paisagem da cidade de Pereira Barreto/SP vista a partir das transformações ocorridas no Rio Tietê. Dissertação (Mestrado). Bauru-SP: Universidade Estadual Paulista. 112p. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/190986/bruno_afc_me_bauru_sub.pdf?sequence=5&isAllowed=y. Acesso em: 13/07/2020.
- Campos, A.P.S. 2007. Avaliação do potencial de poluição no solo e nas águas subterrâneas decorrente da atividade cemiterial. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-25112007-172840/publico/DISSERTACAO_FSP_USP_CEMITERIOS.pdf. Acesso em: 03 -03-2019
- Campos, J.E.G. 2017. Curso de Hidrogeologia Avançada. Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica – UnB. Área de Concentração Recursos Hídricos e Meio Ambiente. Material de Classe.
- Campos, J.E.G.; Bessa, M. da 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.
- Canizela, G.S. 2022. Avaliação ecotoxicológica de solo de um cemitério paulista cujas covas e urnas estão instaladas em um terreno com nível freático próximo à superfície: um estudo de caso. Universidade Estadual Paulista. UNESP. Instituto de biociências. Rio Claro. Trabalho de conclusão de curso. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/216465>. Acesso em: 13/07/2022.
- Carvalho, P.G.M.; Barcellos, F.C.; Green, A.L.; Oliveira, S.M.M. 2008. Indicadores para a avaliação da gestão ambiental municipal com base no modelo Pressão-Estado-Resposta. Anais do XVI Encontro Nacional de Estudos Populacionais - ABEP. Caxambú - MG – Brasil, p. 1-20.
- Carvalho, P.G.M.; Barcellos, F.C; Moreira, C.G. 2007. Políticas públicas para meio ambiente na visão do gestor ambiental: Uma aplicação do modelo PER para o Semiárido. In.: Anais do VII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica - Fortaleza, 28 a 30 de novembro.
- Castro, C.P. 2021. Hydropower and the geopolitics of renewable energies in the Amazon Basin. Ambiente & Sociedade. Revista Ambiente & Sociedade. Vol.24. Web. 22p. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/XxTMCyf4TBSP3kYVc8JRrXc/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 13/07/2022.
- CDT/UnB. 2008a. Centro de apoio ao desenvolvimento tecnológico. Relatório final – Volume I – Programa Ambiental 05 - Monitoramento das Encostas Marginais Programa Ambiental 06 - Monitoramento Hidrogeológico - AHE Peixe Angical. Brasília-DF. 63p.
- CDT/UnB. 2008b. Centro de apoio ao desenvolvimento tecnológico. Relatório final – Volume II – Programa Ambiental 05 - Monitoramento das Encostas Marginais Programa Ambiental 06 - Monitoramento Hidrogeológico - AHE Peixe Angical. Brasília-DF. 316p.
- CELTINS, 1996. Usina hidrelétrica Lajeado. Rima – Relatório de impacto sobre o meio ambiente. Companhia de energia elétrica do estado do Tocantins. Themag engenharia. 196p, il. Disponível em: https://www.investco.com.br/sites/edpbrlajeado/files/2rima_rel_impacto_sobre_meio_ambiente.pdf. Acesso em: 15/07/2022.

- CESTE; Ambiental Tecnologia. 2013. Estudo referente à sobrelevação do nível freático e qualidade da água subterrânea freática nas áreas urbanas e peri-urbanas dos municípios sob influência do reservatório UHE Estreito no rio Tocantins. www.ambientaltecnologia.com.br. Brasília.
- Chapra, S. C. 1997. Surface water-quality modeling. McGraw-Hill. 844p.
- Chilton, P.J.; Foster, S.S.D. 1996. Monitoramento para avaliação da qualidade das águas subterrâneas: Constrangimentos atuais e estratégias futuras. *Monitoring Tailor-made II*, Elsevier Science BV, Holanda. 53-63.
- Cirilo, B.B.; Almeida, O.T. de. 2022. Os Limites à Gestão de Recursos Hídricos no Estado do Pará: Uma Análise Técnica. *Desenvolvimento em Questão, [S. l.]*, v. 20, n. 58, p. e11542, 2022. DOI: 10.21527/2237-6453.2022.58.11542. Disponível em: <https://revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/11542>. Acesso em: 17 jul. 2022.
- CNEC. 2005. EIA - Estudo de impacto ambiental da UHE Estreito. *In: IBAMA (Ed.). EIA – UHE Estreito. Brasília: IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Programa de monitoramento hidrogeológico. MA 160.MA. 77/RT.001. Disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br/PBAs%20Hidrel%c3%a9tricas/UHE%20Estreito/-%20COMPLETO%20REVISADO/3.07.%20Prog.%20de%20Monitoramento%20Hidrogeol%c3%b3gico.pdf>. Acesso em : 15/07/2022.*
- de abril de 2003. Disponível em: <http://www.conama.org.br>.
- Diersch, H.-J.G. 2014. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>
- EPE - Empresa de pesquisa energética. 2021. Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. Brasília. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf. Acesso em: 27/05/2021.
- 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.
- Fetter C.W. 2001. Applied Hydrogeology. 4th ed. Prentice-Hall, Inc, New Jersey, USA. 691p.
- Ford, D.C.; Williams, P.W. 1989. Karst geomorphology and hydrology. London: Unwin Hyman. 601p.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M. 2006. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial e Servmar (ed. brasileira). Versão em português. 114p.
- Francisco, A.M., Silva A.K.G.; Souza, C.S.; Santos, F.C.S. 2016. Tratamento do Necrochorume em Cemitérios. (Atas de Saúde Ambiental). Faculdade Metropolitanas Unidas (FMU). São Paulo. 17 p.
- Freeze, A.R.; Cherry, J.A. 2017. Águas Subterrâneas, tradução de *Groundwater*, Everton de Oliveira (coord.), Edição Instituto Água Sustentável. São Paulo. 698p.
- GESEL, Grupo de Estudos do Setor Elétrico; GEPEA, Poli USP; CPFL, Energia. 2014. Características dos sistemas elétricos e do setor elétrico de países e/ou estados selecionados. Desenvolvido como parte do projeto de P&D. Panorama e análise comparativa da tarifa de energia elétrica do Brasil com tarifas praticadas em países selecionados, considerando a influência do modelo institucional vigente. 412p.
- 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.
- Gomes, C.S.; Vale Moreira, J.G.; Silva, M.F.; Cassiano, E. 2022. Revista Agrária Acadêmica. v. 5, n. 1, jan/fev. doi: 10.32406/v5n1/2022/132-146/agrariacad

- Gomes, N.K. 2011. Atuação do Instituto brasileiro do meio ambiente – IBAMA em relação à poluição do lago de Serra da Mesa na região de Uruaçu/GO. Monografia (Bacharelado em Administração). Universidade de Brasília, Brasília. 85 f.
- 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>.
- Hohn, D.C. 2016. Geração de energia elétrica e territorialização: o caso da usina hidrelétrica Estreito. Universidade Estadual Paulista. Dissertação (Mestrado) São Paulo. 213f. il. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/148008/hohn_dc_me_ipri.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 15/07/2022.
- Holdren C.; Jones W.; Taggart J. 2001. *Managing Lakes and Reservoirs*. Madison, Wisconsin. 27p.
- ICMBio. 2019. Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Cruz, J.; Piló, L. (Orgs.) Brasília, Brasil.
- Jones C.; Palmer R.M.; Motkaluk S.; Walters M. 2002. *Watershed health monitoring*. Ed. Boca Raton, EWIS Publishers. Florida. 227p.
- Kosamu, I. B. M.; Makwinja, R.; Kaonga, C. C. 2022. Application of DPSIR and Tobit Models in Assessing Freshwater Ecosystems: The Case of Lake Malombe, Malawi. *Water (Switzerland)*, v. 14, n. 4.
- Leite, C.B.B. 2005. Avaliação do impacto do reservatório de Três Irmãos sobre a superfície potenciométrica do aquífero livre na cidade de Pereira Barreto (SP): uma abordagem numérica e geoestatística. Tese (Doutorado). Rio Claro-SP. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. xii, 214p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/102906>. Acesso em 15/07/2022.
- Leite, C.B.B. 2022. Vulnerabilidade de aquíferos. Instituto de pesquisas tecnológica do estado de São Paulo - IPT. Agrupamento de geologia aplicada ao meio ambiente – AGAMA. Seção de recursos hídricos. Laboratório de física do solo. Grupo de áreas contaminadas. Apresentação em Power point. <https://docplayer.com.br/70782228-Vulnerabilidade-de-aquiferos.html>. Acessado em 04/07/2022.
- LEME. 2011. Plano ambiental de conservação e uso do entorno dos reservatórios – Pacuera. Projeto básico ambiental, Versão Final. Disponível em: <https://www.averdadedasmentiras.com/sobre>. Acessado em 6/3/2022.
- Lemes, L.; Schwantz, P.I.; Damiani, C.L.; Prestes, M.M.B.; Lara, D.M. 2022. Identificação dos principais impactos ambientais gerados em um cemitério municipal." *Revista em agronegócio e meio ambiente* 15.2. 1-14.
- Lima, A.M.T. 2020. Hidrelétricas no rio Tocantins e efeitos pós-barragem: compensação, desenvolvimento e governança local. 206f. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente, Palmas.
- Lima, F. R. D. 2022. Guia de identificação de impactos ambientais para licenciamento de hidrelétricas. Monografia (graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Saneamento Ambiental, Curso Superior de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vitória. 71p.
- Lockington, D.A. 1997. Resposta do aquífero não confinado à mudança repentina na cabeceira do limite. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(1), 24-27.
- Lousada E.O.; Campos J.E.G. 2005. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*. 35 (3) :407-14.
- MacDonald, L.H. 1994. Desenvolvimento de um projeto de monitoramento. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49 (3), 221-227.
- Macêdo, H.C.; Torres, M.F.A. 2018. Utilização do modelo Pressão-Estado-Resposta na avaliação de indicadores ambientais no município de Brejo da madre de Deus – PE. *Revista de Geografia (Recife)*, 35(5):224-246.
- Magrini, A. 1992. Metodologia de avaliação de impacto ambiental. O caso das usinas hidrelétricas. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado). Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração (COPPEAD), Universidade Federal do Rio de Janeiro. 195p.
- Maldaner K.L.S.; Lima A.M.T. de; 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>
- Marinos, P.G. 1997. Development of sinkholes during reservoir construction. Engineering Geology and the Environment: Balkema, Rotterdam, 2769-2776.
- Meta, P.; Mundial, B. 2021. Câmara de comercialização de energia elétrica - CCEE. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-executiva/meta-2/documentacao/copy_of_relatorios-de-progresso/14-3-ccee-estudo-sobre-a-formacao-de-preco.pdf. Acesso em 15/07/2022.
- MMA (Ministério do Meio Ambiente). 1999. *First national report for the Convention on Biological Diversity*. Brasil. Secretaria de Biodiversidade e Florestas, MMA, Brasília.
- Mongin J. 1998. Planejamento de redes hidrometeorológicas. Secretaria de recursos hídricos, Ministério do Meio Ambiente. Brasília: 1998. 25p.
- Nascimento Filho, I.; von Mühlen, C.; Caramão, E.B. 2001. Estudo de compostos orgânicos em lixiviados de aterros sanitários por EFS e CG/EM. Química Nova 24. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Pp 554-556.
- NWQM. 2022. *Framework of Water Quality Monitoring - National Water Quality Monitoring Council - NWWMC / USA*; [cited 2022 Jun 7]. Disponível em: https://acwi.gov/monitoring/about_the_framework.html. Acesso em 15/07/2022.
- NWQMC. 2019. *The monitoring framework*. Disponível em: https://acwi.gov/monitoring/about_the_framework.html. Acessado em 06/07/2020.
- Oliveira, G.N.R.; Campos, J.E.G.; Gomes, A.W.; Moura, F.G. 2021. Caracterização hidrodinâmica do Aquífero Batalha na Região Noroeste de Minas Gerais. Anuário do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 44, 36700.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. 2022. Avaliação das condições hidrológicas e de armazenamento do rio Tocantins. Portal de relacionamento, SINtegre. Reunião semanal do sistema integrado nacional. Disponível em: <https://sintegre.ons.org.br>. Acessado em 15/07/2022.
- Ottens, J.J.; Arnold, G.E.; Buzás, Z.; Chilton, J.; Enderlein, R.; Havas-Sziláyi, E.; Varela, M. 2000. Diretrizes sobre Monitoramento e Avaliação de Águas Subterrâneas Transfronteiriças. Força Tarefa UN/ECE sobre Monitoramento e Avaliação, 64p.
- Pacheco, A. 2000. Cemitério e Meio Ambiente. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. 68 p.
- Passamani J.; Guimar Z. 2019. Estruturas enterradas sujeitas a ação de nível freático : o desafio de torna-las estanques; [cited 2019 Apr 10]. Available from: http://www.casadagua.com/wp-content/uploads/2013/08/20-16.06_11H30_833_Estruturas-enterradas-sujeitas-a-ação-de-nível-freático.pdf.
- Peters, C.A.; Ward, R.C. 2003. A Framework for 'Constructing' Water Quality Monitoring Programs. Water Resources IMPACT, 5(5), 3-7. <http://www.jstor.org/stable/wateresoimpa.5.5.0003>. Acesso em: 9 Jun. 2022.
- Piló, L.B. 1999. Ambientes cársticos de Minas Gerais: valor, fragilidades e impactos ambientais decorrentes da atividade humana. O Carste, Belo Horizonte, vol. 11, no 3, pag. 50-58.
- Pimentel, V.C.R. 2004. Alternativas de solução para os impactos físicos de barragens. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.3.2004.tde-08082005-142356. Recuperado em 2022-06-10, de www.teses.usp.br
- Portal Brasil. 2016. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2011/12/potencial-hidreletrico-brasileiro-esta-entre-os-cinco-maiores-do-mundo>. Acessado em 18/06/2021.
- Riyis, M.T., & Riyis, M.T. 2011. Considerações sobre a norma brasileira 15.495-1: poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares-parte 1: projeto e construção. Águas Subterrâneas. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28105>. Acessado em: 27/04/2021.
- Rodrigues, R.A.; Vilar, O.M. 2013. Colapso de solo desencadeado pela elevação do nível d'água. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, 1(06), 13-27.

- Rosado, D.L. 2000. Licenciamento ambiental federal: procedimentos, problemas e avanços. Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Dissertação (Mestrado) 133p.
- San Juan, C.A.; Belcher, W.R.; Lacznia, R.J.; Putnam, H.M.; 2004. *Hydrological Components for Model Development, Chapter C of Death Valley Regional Groundwater Flow System, Nevada and California*. Hydrogeological Framework and Transient Groundwater Flow Model. U.S. Geological Survey. Scientific Investigation Report. 2004e5205
- Sánchez, A.; Varela, M. 1996. Groundwater monitoring network in Spain. In: Proceedings of the international workshop Monitoring Tailor-made II: information strategies in water management. Nunspeet, The Netherlands. p. 309-316.
- Sanders, T.G.; Ward, R.C.; Loftis, J.C.; Steele, T.D.; Adrian, D.D.; Yevjevich, V.M. 1983. Projeto de redes para monitoramento da qualidade da água. Publicação de Recursos Hídricos.
- Santos, I.; Fill, H. D.; Sugai, M.; Buba, H.; Kishi, R.; Marone, E.; Lautert, L. 2001. Hidrometria Aplicada. 1ª Edição. Curitiba-PR. Editora CEHPAR. 372p; il. color.
- Santos, P.J.A.; Gama, C.M.; Cavalcante, L.P.S.; Lima, V.L.A. 2015. Avaliação de Impactos Ambientais: Estudo de caso no Cemitério Público do município de Queimadas - PB. Revista Monografias Ambientais. Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. 8 p.
- Scanlon, B.R.; Healy, R.W.; Cook, P.G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 18-39.
- Silva, M.C.; Monte, C.N. 2022. Aplicabilidade de argilas bentoníticas para a mitigação da comunicação ambiental em áreas de aterros sanitários: uma revisão. *Revista Brasileira de Desenvolvimento*. Curitiba, mar., 8(3):16968-88.
- Silva, R.W.C.; Malagutti Filho, W. 2016. Cemitérios como Áreas Potencialmente Contaminadas. Universidade Federal de São Paulo. São Paulo. 10p.
- Siqueira, F.B.; dos Santos, M.A. 2021. Solutions proposed for socio-environmental conflicts and concerning multiple-use hydroelectric reservoirs in Brazil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 40:e13645.
- Soares, K.J.; Freitas, G.A.; Menezes, B.F.; Faria Rocha, M.H.F. de; Moreira, G.A.; Naves, A. C. T. S. G.; Ferreira, I.T.R. 2022. Marcos históricos do setor hidrelétrico brasileiro. *Research, Society and Development*, 11(7), e9211729680-e9211729680.
- Sousa, J.L.; Silva, I.R. 2014. Utilização do modelo pressão-estado-resposta na avaliação da qualidade das praias da Ilha de Itaparica, Bahia. *Caderno de Geociências*, Salvador, v.11, n.1-2, novembro, p. 103-113.
- Souza R.S. 2008. Avaliação química de águas subterrâneas freáticas em áreas de interferência da usina hidrelétrica de Peixe Angical/TO. Universidade de Brasília.
- Souza, J.L.; Silva, I.R. 2014. Utilização do modelo pressão-estado-resposta na avaliação da qualidade das praias da Ilha de Itaparica, Bahia. *Caderno de Geociências*, Salvador, v.11, n.1-2, novembro, p. 103-113.
- Taylor CJ, Alley WM. 2001. Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water-level data. Denver, Colorado.
- THEMAG. 1996. EIA - Estudo de Impacto Ambiental. Caracterização do Empreendimento. Companhia de Energia Elétrica do Estado do Tocantins. Volume I.
- THEMAG; GSL. 2000 Aproveitamento Hidrelétrico Peixe. Estudos de Viabilidade. RIMA. SP.
- 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>>.
- Tomaz, L.A.G.; Zortéa, M; Souza, A.M.; Jayme, V.S. 2007. Isolamento do vírus rábico no morcego *Carollia perspicillata* em Niquelândia, Goiás. *Chiroptera Neotropical*, Brasília, DF, v. 13, n. 1, p. 309-312, jul.
- Uil, H., VanGeer, F.C., Gehrels, J.C., & Kloosterman, F.H. 1999. Estado da arte em monitoramento e avaliação de águas subterrâneas. Força-Tarefa UN/ECE sobre Monitoramento e Avaliação, Instituto Holandês de Geociência Aplicada TNO. Lelystad .
- UN/ECE. 2000. Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Groundwaters. Lelystad, The Netherlands.

- 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.
- USEPA. 2003. *Elements of a State Water Monitoring and Assessment Program*. EPA 841-B-03-003. Disponível em: <http://www.epa.gov/owow/monitoring/elements>. Acessado em 18/09/2020.
- Vargas, T. D. 2010. Transferência de elementos maiores, traços e elementos das terras raras no sistema fertilizante-solo-água subterrânea em sedimentos quaternários da Região de Águas Claras, município de Viamão, RS.
- Vasconcelos, S.S., Ruivo M. de L.P., Lima A.M.M. de. 2017. Amazônia em tempo: impactos do uso da terra em diferentes escalas. Belém.
- Vilar, O.M., & Rodrigues, R.A. 2011. Comportamento do colapso do solo em uma região brasileira afetada pelo aumento do nível freático. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2): 226-233.
- Vilar, O.M., & Ferreira, S.R.M. 2015. Solos colapsíveis e expansivos. Solos não saturados no contexto geotécnico, 1. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo. p. 415-436.
- Ward, R.C.; Loftis J.C.; McBride, G.B. 1990. *Design of water quality monitoring systems*. Van Nostrand Reinhold. New York. 231p.
- 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.
- Yost, J.R., C.B. & Naney, J.W. 1975. Earth-dam seepage and related land and water problems. *Journal of Soil and Water Conservation*, p. 87-91.
- Zhang, K. & Chui, T. F. M. 2020. Assessing the impact of spatial allocation of bioretention cells on shallow groundwater – An integrated surface-subsurface catchment-scale analysis with SWMM-MODFLOW. *Journal of Hydrology*. v. 586, p. 124910
- Zhou, Y. 2001. Groundwater monitoring (Apostila do curso de pós-graduação) IHE-Delft. Países Baixos. 156p. Il.