ISSN: 2177-3246

ÁGUA E RISCO: UMA ANÁLISE DA INSEGURANÇA HÍDRICA DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DA PRESSÃO SOBRE RESERVATÓRIOS NO BRASIL

WATER AND RISK: AN ANALYSIS OF WATER INSECURITY IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE AND PRESSURE ON RESERVOIRS IN BRAZIL

AGUA Y RIESGO: UN ANÁLISIS DE LA INSEGURIDAD HÍDRICA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA PRESIÓN SOBRE LOS EMBALSES EN BRASIL

10.56238/revgeov17n7-079

Jozadake Petry Fausto
Doutoranda em Geografia
Instituição: Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho" (UNESP/SP)
E-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com

Maria Vânia Abreu Pontes
Doutora em Psicologia
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
E-mail: vaniapontes@yahoo.com.br

Rhafic Concolato da Silva
Doutorando em Geografia
Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
E-mail: silva.rhafic@posgraduacao.uerj.br

Rachel Cassiano de Sousa Lima
Doutora em Saúde Coletiva
Instituição: Universidade de Fortaleza (UNIFOR)
E-mail: rachelcassiano@hotmail.com

Maria Eliana Barreto Druzian
Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental
Instituição: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
E-mail: edruzian02@gmail.com

Isabôhr Mizza Veloso dos Santos
Pós-doutoranda em Geografia
Instituição: Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
E-mail: isabohr.mizza@ufu.br

Mayara Mara Rocha de Oliveira
Doutoranda em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
E-mail: mayaramr.oliveira@gmail.com

ISSN: 2177-3246

Emerson Monteiro dos Santos
Doutor em Zoologia e Ecologia
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
E-mail: emerson@unifap.br

Rafael Bianchini Glavam
Pós-doutorando em Engenharia e Gestão do Conhecimento
Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
E-mail: contato@rafaelglavam.com.br

Christian Ricardo Silva Passos
Doutor em Biologia e Biotecnologia de Microorganismos
Instituição: Instituto Federal da Bahia (IFBA)
E-mail: christian@ifba.edu.br

Nélio Vitor Alves Siebra
Mestre em Administração e Controladoria
Instituição: Universidade Estadual do Ceará (UECE)
E-mail: neliovito@gmail.com

Bruno Braulino Batista
Doutor em Engenharia de Pesca
Instituição: Universidade Federal Oeste do Pará (UFOPA)
E-mail: bruno.batista@ufopa.edu.br

Priscila Ariede Petinuci Bardal
Doutorado em Ciências
Instituição: Universidade Federal de Catalão (UFCAT)
E-mail: priscilabardal@ufcat.edu.br

Maicon de Barros Simon
Mestrando em Desenvolvimento Regional
Instituição: Universidade de santa cruz do Sul (UNISC)
E-mail: maiconsbarros2011@gmail.com

Vitória Nazaré Costa Seixas
Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos
Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)
E-mail: vitoria.seixas@uepa.br

Elzelis Muller da Silva
Doutora em Engenharia de Recursos Naturais
Instituição: Universidade do Estado do Pará (UFPA)
E-mail: elzelis@uepa.br

ISSN: 2177-3246

Mikel Eduardo de Mello
Doutorando em Ecologia e Conservação
Instituição: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS)
E-mail: mikeleduardo@yahoo.com.br

Auricélio Anselmo da Silva
Mestre em Desenvolvimento Social
Instituição: Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES)
E-mail: auricelioadvogado@yahoo.com.br

Henrique Ramos de Paiva
Mestrando em Geografia
Instituição: Universidade Estadual do Ceará (UECE)
E-mail: henriq.ramos@aluno.uece.br

Renata Barboza do Nascimento
Mestranda em Ensino das Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
E-mail: renatabarbozanascimento@gmail.com

Paulo Henrique Pires Gonçalves
Mestrando em Gestão, Educação e Tecnologias
Instituição: Universidade Estadual de Goiás (UEG)
E-mail: ph.pires@ueg.br

Verônica Inácio de Oliveira
Graduada em Ciências Biológicas
Instituição: Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
E-mail: veronicaioliveirabio@gmail.com

RESUMO
As mudanças climáticas, associadas à expansão das atividades econômicas e ao crescimento da demanda por água, têm intensificado as pressões sobre os sistemas hídricos e ampliado os riscos de escassez no Brasil. Dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico indicam que, embora o país apresente vazão média superficial de aproximadamente 250 mil m³/s, cerca de 80% desse volume se concentra na Bacia Amazônica. Além disso, a última década foi marcada pela predominância de chuvas e vazões abaixo das médias históricas em grande parte do território, enquanto os reservatórios do Sistema Interligado Nacional encerraram 2024 com 53% do volume útil armazenado. Nesse contexto, o presente artigo tem como objeto de pesquisa a insegurança hídrica no Brasil, considerando os efeitos das mudanças climáticas, a distribuição territorial desigual da água e a pressão crescente sobre os reservatórios diante dos diferentes usos sociais, econômicos e ambientais. A investigação parte da seguinte pergunta de pesquisa: de que maneira as mudanças climáticas e a crescente pressão sobre os reservatórios contribuem para o agravamento da insegurança hídrica no Brasil? Teoricamente, fizemos uso dos dados quantitativos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025), dialogando com os trabalhos de Ab'Sáber (2003), Barlow (2007),

Beck (1992), Biswas e Tortajada (2009; 2016; 2022), Borchardt, Bogardi e Ibisch (2016), Burton, Kates e White (1993), Cutter (2001), Falkenmark e Lindh (2019), Flannery (2010), Giddens (2010), Gleick (2011), Global Water Partnership [GWP] (2000), Grigg (2016), Leff (1998; 2001; 2006), Linsley, Kohler e Paulhus (1958), Molden (2007), Ostrom (2005; 2015), Postel (2013), Sachs (2007; 2009), Santos (2001; 2006), Setegn e Donoso (2015), Tucci (2001; 2008), Tucci e Bertoni (2003), Veiga (2015; 2019), White (1942), entre outros. A pesquisa é qualitativa e quantitativa (Minayo, 2007), descritiva e bibliográfica (Gil, 2008) e com o viés analítico compreensivo (Weber, 1949). Os resultados demonstram que a insegurança hídrica brasileira resulta da interação entre mudanças climáticas, distribuição territorial desigual da água, crescimento das demandas e intensificação da pressão sobre os reservatórios, não se restringindo à escassez física. A pesquisa também evidencia que o fortalecimento da governança, do planejamento adaptativo, do monitoramento hidrológico e da integração entre infraestrutura hídrica e conservação das bacias constitui elemento indispensável para ampliar a resiliência dos sistemas hídricos diante das novas condições climáticas.

Palavras-chave: Insegurança Hídrica. Mudanças Climáticas. Reservatórios. Governança dos Recursos Hídricos.

ABSTRACT

Climate change, combined with the expansion of economic activities and the growing demand for water, has intensified pressure on water systems and increased the risks of scarcity in Brazil. Data from the National Water and Basic Sanitation Agency indicate that, although the country has an average surface water flow of approximately 250,000 m³/s, around 80% of this volume is concentrated in the Amazon Basin. In addition, the last decade was marked by the predominance of rainfall and river flows below historical averages across much of the territory, while the reservoirs of the National Interconnected System ended 2024 with 53% of their useful storage capacity. In this context, this article examines water insecurity in Brazil, considering the effects of climate change, the unequal territorial distribution of water, and the growing pressure on reservoirs arising from different social, economic, and environmental uses. The study is guided by the following research question: how do climate change and increasing pressure on reservoirs contribute to the worsening of water insecurity in Brazil? Theoretically, the study draws on quantitative data from the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA, 2025), in dialogue with the works of Ab'Sáber (2003), Barlow (2007), Beck (1992), Biswas and Tortajada (2009; 2016; 2022), Borchardt, Bogardi, and Ibisch (2016), Burton, Kates, and White (1993), Cutter (2001), Falkenmark and Lindh (2019), Flannery (2010), Giddens (2010), Gleick (2011), Global Water Partnership [GWP] (2000), Grigg (2016), Leff (1998; 2001; 2006), Linsley, Kohler, and Paulhus (1958), Molden (2007), Ostrom (2005; 2015), Postel (2013), Sachs (2007; 2009), Santos (2001; 2006), Setegn and Donoso (2015), Tucci (2001; 2008), Tucci and Bertoni (2003), Veiga (2015; 2019), White (1942), among others. The research adopts a qualitative and quantitative approach (Minayo, 2007), is descriptive and bibliographic in nature (Gil, 2008), and follows a comprehensive analytical orientation (Weber, 1949). The results demonstrate that water insecurity in Brazil results from the interaction among climate change, the unequal territorial distribution of water, growing demands, and increasing pressure on reservoirs, and therefore cannot be reduced to physical scarcity alone. The study also shows that strengthening governance, adaptive planning, hydrological monitoring, and the integration of water infrastructure with watershed conservation is essential to increasing the resilience of water systems under emerging climatic conditions.

Keywords: Water Insecurity. Climate Change. Reservoirs. Water Resources Governance.

ISSN: 2177-3246

RESUMEN
El cambio climático, asociado a la expansión de las actividades económicas y al crecimiento de la demanda de agua, ha intensificado las presiones sobre los sistemas hídricos y ampliado los riesgos de escasez en Brasil. Los datos de la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico indican que, aunque el país presenta un caudal superficial medio de aproximadamente 250 mil m³/s, cerca del 80 % de este volumen se concentra en la cuenca amazónica. Además, la última década estuvo marcada por el predominio de precipitaciones y caudales inferiores a los promedios históricos en gran parte del territorio, mientras que los embalses del Sistema Interconectado Nacional finalizaron 2024 con el 53 % de su volumen útil almacenado. En este contexto, el presente artículo tiene como objeto de investigación la inseguridad hídrica en Brasil, considerando los efectos del cambio climático, la distribución territorial desigual del agua y la creciente presión sobre los embalses ante los diferentes usos sociales, económicos y ambientales. La investigación parte de la siguiente pregunta: ¿de qué manera el cambio climático y la creciente presión sobre los embalses contribuyen al agravamiento de la inseguridad hídrica en Brasil? Desde el punto de vista teórico, se utilizaron los datos cuantitativos de la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico (ANA, 2025), en diálogo con los trabajos de Ab'Sáber (2003), Barlow (2007), Beck (1992), Biswas y Tortajada (2009; 2016; 2022), Borchardt, Bogardi e Ibisch (2016), Burton, Kates y White (1993), Cutter (2001), Falkenmark y Lindh (2019), Flannery (2010), Giddens (2010), Gleick (2011), Global Water Partnership [GWP] (2000), Grigg (2016), Leff (1998; 2001; 2006), Linsley, Kohler y Paulhus (1958), Molden (2007), Ostrom (2005; 2015), Postel (2013), Sachs (2007; 2009), Santos (2001; 2006), Setegn y Donoso (2015), Tucci (2001; 2008), Tucci y Bertoni (2003), Veiga (2015; 2019), White (1942), entre otros. La investigación adopta un enfoque cualitativo y cuantitativo (Minayo, 2007), es descriptiva y bibliográfica (Gil, 2008) y se orienta por un sesgo analítico comprensivo (Weber, 1949). Los resultados demuestran que la inseguridad hídrica brasileña resulta de la interacción entre el cambio climático, la distribución territorial desigual del agua, el crecimiento de las demandas y la intensificación de la presión sobre los embalses, sin limitarse a la escasez física. La investigación también evidencia que el fortalecimiento de la gobernanza, la planificación adaptativa, el monitoreo hidrológico y la integración entre la infraestructura hídrica y la conservación de las cuencas constituyen elementos indispensables para ampliar la resiliencia de los sistemas hídricos ante las nuevas condiciones climáticas.

Palabras clave: Inseguridad Hídrica. Cambio Climático. Embalses. Gobernanza de los Recursos Hídricos.

1 INTRODUÇÃO: INSEGURANÇA HÍDRICA NO BRASIL DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS, DA DISTRIBUIÇÃO DESIGUAL DA ÁGUA E DA PRESSÃO SOBRE OS RESERVATÓRIOS

A água ocupa uma posição central na constituição da vida, na manutenção dos ecossistemas e na organização das sociedades humanas, não apenas por atender às necessidades biológicas dos seres vivos, mas por sustentar praticamente todas as atividades que estruturam a dinâmica econômica, territorial e social. A distribuição das populações, a expansão das cidades, a consolidação das atividades agrícolas, o desenvolvimento industrial, a produção de energia e a própria proteção da saúde coletiva sempre estiveram condicionados, em maior ou menor medida, à existência de recursos hídricos em quantidade e qualidade compatíveis com as demandas de cada território. Sob uma análise mais cuidadosa, a água não representa apenas um recurso natural disponível para uso, mas um elemento que participa diretamente da configuração das relações entre sociedade e natureza, influenciando a forma como o espaço é ocupado, como os sistemas produtivos se organizam e como as políticas públicas são planejadas. Tucci (2001) afirma que "[...] a ação do homem no planejamento e desenvolvimento da ocupação do espaço na Terra requer cada vez mais uma visão ampla sobre as necessidades da população, os recursos terrestres e aquáticos disponíveis e o conhecimento sobre o comportamento dos processos naturais na bacia, para racionalmente compatibilizar necessidades crescentes com recursos limitados" (p. 31), isto é, a ideia do autor pontua a impossibilidade de dissociar a gestão territorial da disponibilidade hídrica e dos processos naturais que regulam sua circulação[1]. Ao lado dessa realidade, o crescimento populacional, a intensificação das atividades econômicas e a ampliação das intervenções sobre os sistemas naturais passaram a elevar significativamente a preocupação internacional com a segurança hídrica, sobretudo porque a disponibilidade física de água não corresponde, necessariamente, à sua efetiva acessibilidade para diferentes populações e setores produtivos. Embora o Brasil concentre aproximadamente 12% da disponibilidade mundial de água

[1] A impossibilidade de dissociar a gestão territorial da disponibilidade hídrica e dos processos naturais que regulam sua circulação decorre do fato de que a água não se distribui no espaço de maneira uniforme nem responde exclusivamente às intervenções humanas, mas resulta da interação contínua entre fatores climáticos, geológicos, geomorfológicos, pedológicos, ecológicos e hidrológicos que estruturam o funcionamento das bacias hidrográficas. A ocupação do território, a expansão urbana, a conversão de áreas naturais em zonas agrícolas, a impermeabilização do solo, o desmatamento de matas ciliares e a alteração dos cursos d'água modificam significativamente os mecanismos naturais de infiltração, armazenamento, evapotranspiração, escoamento superficial e recarga dos aquíferos, afetando tanto a quantidade quanto a qualidade da água disponível. Em consequência, a gestão territorial deixa de ser apenas uma atividade voltada ao ordenamento do uso e ocupação do solo para assumir também a responsabilidade de preservar os processos ecológicos que garantem a renovação e a estabilidade dos recursos hídricos ao longo do tempo. Nessa perspectiva, o planejamento territorial deve considerar a dinâmica das bacias hidrográficas como unidade de gestão, respeitando os limites ambientais impostos pelo relevo, pelas áreas de recarga, pelas zonas de inundação, pelas nascentes e pelos ecossistemas associados, uma vez que decisões tomadas em determinado ponto do território produzem repercussões hidrológicas em áreas situadas a jusante. Assim, a segurança hídrica depende diretamente da integração entre planejamento territorial, conservação ambiental e compreensão do funcionamento dos processos naturais, evidenciando que qualquer política pública voltada à gestão da água somente alcança resultados duradouros quando reconhece a estreita interdependência existente entre organização do espaço geográfico, equilíbrio dos ecossistemas e manutenção do ciclo hidrológico. Ver: Tucci, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009.

ISSN: 2177-3246

doce superficial e apresente precipitação média anual em torno de 1.760 mm, produzindo uma vazão superficial média da ordem de 179 mil m³/s em seu território e aproximadamente 260 mil m³/s quando consideradas as contribuições provenientes de países vizinhos, esses indicadores nacionais escondem profundas diferenças regionais que limitam o acesso ao recurso em extensas áreas do país, conforme demonstrado pelo Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2025, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)[2]. Em uma perspectiva mais abrangente, essa condição revela que indicadores absolutos de abundância possuem capacidade limitada para representar a realidade hídrica de um país com dimensões continentais, grande diversidade climática e expressivas desigualdades territoriais. Varis (2009) sintetiza essa condição ao pontuar que "[...] a água é a espinha dorsal da economia em muitos países do mundo. A gestão dos recursos hídricos fornece a base para o setor agrícola, grande parte do setor energético, uma parcela importante da infraestrutura urbana, os cuidados de saúde e muitas outras funções da sociedade" (p. 44), demonstrando que a segurança hídrica ultrapassa o campo ambiental e assume posição estratégica para a estabilidade econômica, para a produção de alimentos, para o funcionamento da infraestrutura e para a redução das vulnerabilidades sociais. Sob esse horizonte interpretativo, a expressiva disponibilidade hídrica brasileira deixa de representar, por si só, uma garantia de abastecimento contínuo e de desenvolvimento equilibrado, passando a exigir análises capazes de relacionar processos naturais, distribuição territorial da água, formas de uso e capacidade institucional de gestão diante das transformações ambientais em curso.

> [...] os usos dos recursos hídricos têm se intensificado com o desenvolvimento econômico, tanto no que se refere ao aumento da quantidade demandada para determinada utilização, quanto no que se refere à variedade dessas utilizações. Originalmente, a água era usada principalmente para dessedentação, usos domésticos, criação de animais e para usos agrícolas a partir da chuva e, menos frequentemente, com suprimento irrigado. À medida que a civilização se desenvolveu outros tipos de usos foram surgindo, disputando os usos de recursos hídricos muitas vezes escassos e estabelecendo conflitos entre os usuários [...] os usos acham-se inseridos em três classes: Infraestrutura social: refere-se aos usos gerais disponíveis para a sociedade nos quais a água entra como bem de consumo final; Agricultura, florestamento e aquacultura: refere-se aos usos da água como bem de consumo intermediário visando à criação de condições ambientais adequadas para o desenvolvimento de espécies animais ou vegetais de interesse para a sociedade. Este interesse pode ser de ordem econômica, ambiental, etc.;

[2] O Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2025, elaborado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), constitui o principal diagnóstico oficial sobre a situação dos recursos hídricos brasileiros, reunindo indicadores atualizados relativos à disponibilidade hídrica, aos padrões de uso da água, ao monitoramento hidrológico, à qualidade dos corpos d'água, à gestão das bacias hidrográficas e aos principais desafios relacionados à segurança hídrica. A publicação consolida informações produzidas no âmbito do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), permitindo uma avaliação integrada das transformações ocorridas no território nacional. O relatório evidencia que as mudanças climáticas, a crescente variabilidade hidrológica, a intensificação das demandas urbanas, agrícolas, industriais e energéticas, bem como a ocorrência mais frequente de eventos extremos, têm ampliado a complexidade da gestão da água no Brasil, exigindo políticas públicas fundamentadas em monitoramento contínuo, planejamento territorial, gestão integrada por bacias hidrográficas e fortalecimento da governança dos recursos hídricos. Ao sintetizar evidências técnicas, estatísticas e tendências nacionais, o documento consolida-se como referência estratégica para pesquisadores, gestores públicos e tomadores de decisão, oferecendo subsídios científicos para a formulação de políticas voltadas à conservação dos recursos hídricos, à adaptação às mudanças climáticas e à promoção da segurança hídrica em escala nacional. Ver: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2025: relatório pleno. Brasília, DF: ANA, 2025.

> Indústria: usos em atividades de processamento industrial e energético nos quais a água entra como bem de consumo intermediário (Lanna, 2001, p. 734).

Em continuidade, a expressiva disponibilidade de água existente no território brasileiro não se distribui de forma proporcional entre suas diferentes regiões, circunstância que impõe limites concretos ao abastecimento humano, à produção agropecuária, à atividade industrial e ao próprio planejamento do desenvolvimento regional. A dimensão continental do país reúne realidades hidrológicas bastante distintas, nas quais áreas com elevada oferta hídrica convivem com outras submetidas a restrições permanentes ou sazonais de disponibilidade. Essa heterogeneidade decorre da interação entre fatores climáticos, geomorfológicos, hidrográficos e demográficos, fazendo com que a presença física da água não corresponda, de maneira inevitável, à sua proximidade em relação às populações, aos centros produtivos e às infraestruturas de uso intensivo. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico registra que "[...] O Brasil apresenta, de forma geral, uma expressiva disponibilidade hídrica, o que confere ao país uma condição estratégica. Essa abundância é heterogênea, tanto espacial quanto temporalmente. A avaliação da disponibilidade hídrica é feita pela vazão média dos rios e pela vazão de estiagem, representada pela Q95[3]" (ANA, 2025, p. 13). Logo, ao ampliar essa análise, a vazão média representa o volume médio de água escoado pelos cursos d'água ao longo de determinado período, constituindo importante indicador do potencial hídrico de uma bacia, de maneira distinta, a Q95 corresponde à vazão igualada ou superada em 95% do tempo, refletindo as condições de estiagem e servindo como referência para avaliações de disponibilidade efetiva e para diversos instrumentos de gestão dos recursos hídricos. A utilização simultânea desses indicadores permite distinguir situações em que uma bacia apresenta elevada produção anual de água, mas reduzida confiabilidade de oferta durante períodos secos, aspecto decisivo para o planejamento de captações, outorgas e usos múltiplos. Em consonância com os dados apresentados pela ANA, aproximadamente 80% da vazão superficial brasileira concentram-se na Região Hidrográfica Amazônica, onde a densidade populacional permanece relativamente baixa quando comparada às regiões Sudeste, Sul e parte do Nordeste,

[3] A avaliação da disponibilidade hídrica superficial considera tanto a vazão média dos rios, que expressa o volume médio de água escoado em determinado período, quanto as vazões observadas durante os períodos de estiagem, entre as quais se destaca a Q95. Essa medida corresponde à vazão que é igualada ou superada em 95% do tempo ao longo da série histórica analisada, indicando que vazões inferiores a esse valor ocorrem em apenas aproximadamente 5% do período considerado. Por representar uma condição de baixa disponibilidade, a Q95 funciona como uma referência conservadora para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, permitindo estimar a quantidade de água que tende a permanecer disponível mesmo em fases de menor escoamento dos rios. Sua determinação é feita por meio da curva de permanência, construída a partir da ordenação das vazões registradas da maior para a menor e da identificação da frequência com que cada valor é alcançado ou ultrapassado. A Q95 não representa, portanto, a menor vazão já registrada no curso d'água, mas uma vazão de elevada permanência, empregada na análise do balanço entre a oferta hídrica e as demandas dos diferentes usuários, bem como na concessão de outorgas e na prevenção de situações em que as retiradas possam comprometer os usos existentes e a manutenção das funções ambientais dos rios. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico também diferencia a Q95 anual, calculada com base em toda a série histórica de vazões, da Q95 mensal, estimada a partir dos registros correspondentes a cada mês do ano, o que permite considerar as variações sazonais da disponibilidade de água nas diferentes regiões brasileiras. Ver: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2025: relatório pleno. Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/113042.

justamente aquelas responsáveis por parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e pela maior concentração de população, atividades industriais, polos urbanos e áreas irrigadas. Esse contraste revela que a disponibilidade hídrica não pode ser interpretada apenas sob a ótica dos volumes totais existentes no território nacional, pois sua relevância prática depende da coincidência entre oferta natural e localização das demandas sociais e econômicas. Tucci e Bertoni afirmam que "[...] quando comparados os usos e a quantidade de água e a necessidade humana pode-se, erroneamente, concluir que existe água suficiente, mas a variação temporal e espacial é muito grande e existem várias regiões vulneráveis" (2003, p. 11). Isto é, a leitura dessa proposição conduz ao entendimento de que avaliações baseadas exclusivamente em valores médios nacionais tendem a ocultar situações de escassez localizada, sobretudo em regiões submetidas à elevada pressão demográfica, intensa retirada de água ou maior irregularidade climática. Em grande medida, a vulnerabilidade hídrica brasileira nasce exatamente dessa dissociação entre os espaços onde a água se concentra naturalmente e aqueles onde sua utilização ocorre de maneira mais intensa, circunstância que amplia conflitos entre usuários, exige mecanismos mais sofisticados de planejamento e reforça a importância de análises hidrológicas capazes de captar tanto a variabilidade espacial quanto o comportamento temporal das vazões. Essa realidade também evidencia que diferenças regionais na disponibilidade de água antecedem qualquer influência decorrente das mudanças climáticas ou da ampliação das demandas, constituindo uma condição estrutural do território brasileiro que precisa ser considerada em qualquer política voltada à segurança hídrica, ao gerenciamento de bacias hidrográficas e à formulação de estratégias de desenvolvimento sustentável.

Levando isso em consideração, a distribuição desigual da água no território brasileiro somente pode ser explicada a partir do funcionamento integrado do ciclo hidrológico, responsável por regular continuamente a circulação da água entre atmosfera, superfície terrestre e aquíferos. Trata-se de um sistema dinâmico cuja estabilidade depende da interação entre processos físicos e características ambientais próprias de cada bacia hidrográfica, fazendo com que diferenças de clima, relevo, geologia, solos e cobertura vegetal produzam respostas hidrológicas distintas em diferentes regiões do país. Tucci (2001) afirma que "[...] o balanço hídrico envolve a continuidade de massa e a troca de energia dos sistemas envolvidos, no tempo e no espaço. Os componentes principais deste balanço são: precipitação, evaporação, evapotranspiração, escoamento superficial e subterrâneo" (p. 279), razão pela qual a disponibilidade hídrica não pode ser reduzida ao volume anual de chuvas, uma vez que cada um desses componentes interfere diretamente na quantidade de água que permanece armazenada nos solos, alimentam aquíferos, sustenta as vazões dos rios ou retorna novamente à atmosfera. Em cenário distinto, parte da precipitação é interceptada pela vegetação e devolvida ao ambiente por evaporação e evapotranspiração, outra parcela infiltra-se nas camadas superficiais e profundas do terreno, promovendo a recarga subterrânea, ao passo que o excedente escoa sobre a superfície e

constitui a rede de drenagem responsável pela alimentação dos cursos d'água. Logo, a intensidade relativa desses processos modifica-se continuamente conforme a permeabilidade dos solos, a declividade do relevo, a presença ou ausência de cobertura vegetal, o grau de impermeabilização provocado pela urbanização e as próprias características dos eventos de precipitação, produzindo diferenças significativas entre bacias hidrográficas submetidas a regimes pluviométricos semelhantes. Tendo isso em mente, esse comportamento explica por que regiões que recebem volumes próximos de precipitação podem apresentar disponibilidades hídricas bastante distintas durante o mesmo período do ano, já que pequenas variações na infiltração, na evapotranspiração ou na capacidade natural de armazenamento repercutem diretamente sobre as vazões observadas nos rios durante os períodos de estiagem. Logo, os dados apresentados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico demonstram que o balanço hídrico brasileiro resulta da interação entre uma precipitação média anual próxima de 1.760 mm, elevadas perdas por evapotranspiração, expressivos volumes destinados ao escoamento superficial, contribuições provenientes da Bacia Amazônica oriundas de países vizinhos e fluxos direcionados ao oceano Atlântico e aos sistemas hidrográficos internacionais, configurando uma dinâmica hidrológica extremamente complexa. Essa engrenagem somente pode ser acompanhada por meio de um sistema permanente de observação hidrológica distribuído em escala nacional. A ANA (2025, p. 13) salienta que "[...] a Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência apoia o monitoramento de tendências hidrológicas de longo prazo, a avaliação da disponibilidade hídrica em bacias estratégicas, a análise da qualidade da água e a regulação do uso dos recursos hídricos", permitindo que essas informações sejam continuamente incorporadas às atividades de gestão, ao planejamento das outorgas, à operação dos reservatórios, à produção de séries históricas de vazão e precipitação e à elaboração de estudos voltados à segurança hídrica. Integrada ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos[4], essa estrutura produz uma base técnica indispensável para avaliar alterações graduais ou abruptas no comportamento hidrológico das bacias brasileiras,

[4] O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) constitui o principal instrumento oficial de organização, integração, armazenamento e disseminação de informações relacionadas aos recursos hídricos no Brasil, desempenhando papel estratégico na implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Previsto na Lei nº 9.433/1997, o sistema reúne dados provenientes da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), dos órgãos gestores estaduais, dos Comitês de Bacias Hidrográficas e de outras instituições integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), consolidando informações sobre disponibilidade hídrica, monitoramento hidrológico, qualidade das águas, usos consuntivos e não consuntivos, outorgas, eventos hidrológicos críticos, infraestrutura hídrica e planejamento das bacias hidrográficas. Sua finalidade é produzir informações padronizadas, confiáveis e continuamente atualizadas, capazes de subsidiar a formulação, a implementação, o acompanhamento e a avaliação das políticas públicas relacionadas à gestão das águas. Ao proporcionar amplo acesso a dados técnicos e científicos, o SNIRH fortalece a transparência da administração pública, apoia a tomada de decisões pelos órgãos gestores e oferece suporte às pesquisas acadêmicas, contribuindo para uma gestão integrada, descentralizada e baseada em evidências dos recursos hídricos brasileiros. Ver: Brasil. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

oferecendo parâmetros confiáveis para interpretar oscilações naturais e identificar modificações capazes de alterar a disponibilidade de água em diferentes escalas espaciais.

Em ponto de vista compreensivo, as diferenças espaciais observadas na disponibilidade hídrica brasileira passam a adquirir uma dimensão ainda mais complexa quando os processos naturais do ciclo hidrológico deixam de responder aos padrões climáticos historicamente registrados e passam a refletir um ambiente caracterizado por maior variabilidade atmosférica e crescente incerteza. ANA (2025, p. 15) afirma que "[...] a análise dos dados de precipitação e vazão por ano hidrológico, ao longo da última década (2015-2024), revela um panorama de contrastes marcantes, caracterizado por ocorrências tanto de secas severas quanto de eventos extremos de cheia. De modo geral, há a prevalência de comportamento mais seco na última década", situação que demonstra que alterações recentes não se restringem ao aumento da frequência de eventos extremos, mas atinge diretamente a regularidade hidrológica responsável por sustentar as vazões dos rios, alimentar reservatórios, manter a recarga dos aquíferos e assegurar o funcionamento dos diversos usos da água ao longo do ano. Dito isso, a persistência de precipitações e vazões inferiores às médias históricas em grande parte das regiões hidrográficas brasileiras modifica o comportamento esperado das bacias, reduz o período de permanência da água nos sistemas naturais e amplia a sensibilidade de ecossistemas e atividades econômicas às oscilações climáticas. Ao reconhecer essa complexidade, o aumento da temperatura do ar, as alterações na circulação atmosférica em escala continental e oceânica, bem como a intensificação da variabilidade climática, passam a influenciar simultaneamente a distribuição espacial das chuvas, sua intensidade, duração, sazonalidade e capacidade de produzir vazões compatíveis com as demandas humanas e ambientais. Não se trata apenas de chover mais ou menos em determinado período, mas de mudanças que afetam a própria forma como a água circula nas bacias hidrográficas, interferindo na infiltração, na evapotranspiração, na recarga subterrânea, no escoamento superficial e na estabilidade hidrológica construída ao longo de décadas de observações. Em outro modo de ver, esse comportamento evidencia que as séries históricas utilizadas tradicionalmente para planejamento hidráulico passam a incorporar níveis crescentes de incerteza, exigindo revisões permanentes das estimativas de disponibilidade futura. Saha e Setegn afirmam que "[...] os padrões sazonais e interanuais de precipitação estão mudando e se tornando mais incertos como consequência das mudanças climáticas. Essa incerteza nas entradas de precipitação é transferida para as vazões e para o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica" (2015, p. 124), fazendo com que oscilações inicialmente observadas na atmosfera sejam progressivamente transmitidas para todos os componentes do sistema hidrológico, alterando tanto o comportamento dos rios quanto a capacidade de armazenamento natural e artificial das bacias. Esse encadeamento produz efeitos cumulativos sobre a segurança hídrica porque reduz a previsibilidade das disponibilidades futuras, dificulta a operação de reservatórios, amplia os desafios associados ao abastecimento urbano, à irrigação, à geração hidrelétrica e à manutenção das

vazões ecológicas, além de aumentar a exposição de diferentes regiões à ocorrência alternada de secas prolongadas e episódios de cheias intensas. De maneira semelhante, a coexistência desses extremos confirma que as mudanças climáticas não representam apenas um fenômeno ambiental isolado, mas um fator capaz de alterar o equilíbrio hidrológico que sustenta a gestão dos recursos hídricos brasileiros, exigindo abordagens técnicas cada vez mais apoiadas em monitoramento contínuo, modelagem hidrológica, atualização permanente das bases de dados e incorporação explícita das incertezas climáticas aos processos de planejamento e tomada de decisão.

Em face dessa realidade, o comportamento hidrológico descrito anteriormente passa a interagir com outro processo de grande relevância para a gestão das águas: o crescimento contínuo das demandas impostas pelos diferentes setores da sociedade. Mesmo em regiões onde a disponibilidade natural permanece relativamente elevada, a expansão das atividades econômicas, a intensificação da urbanização, o aumento da produção agrícola, a ampliação dos parques industriais, a mineração e a geração hidrelétrica elevam progressivamente os volumes captados e torna mais complexa a administração dos recursos hídricos. Tucci (2001) afirma que "[...] assim, foram estabelecidos padrões de qualidade de água para usos como abastecimento público e industrial, preservação da vida aquática, irrigação, recreação, agricultura, navegação e paisagismo" (p. 854), refletindo uma realidade na qual a água deixa de atender a uma única finalidade e passa a sustentar um conjunto diversificado de usos que coexistem sobre a mesma base física, exigindo padrões distintos de qualidade, quantidade, regularidade e segurança operacional. Essa multiplicidade constitui o princípio dos usos múltiplos da água, incorporado à Política Nacional de Recursos Hídricos, segundo o qual diferentes atividades devem compartilhar um recurso naturalmente limitado mediante critérios técnicos, institucionais e ambientais capazes de reduzir conflitos entre usuários. Nesse caminho, a expansão simultânea dessas demandas modifica a relação entre oferta e consumo porque a disponibilidade efetiva deixa de depender apenas da quantidade produzida pelo ciclo hidrológico e passa a ser influenciada também pela velocidade com que diferentes setores retiram água dos rios, reservatórios e aquíferos. O crescimento das áreas irrigadas amplia significativamente a necessidade de captação durante os períodos de maior déficit hídrico, em comparação com isso, a expansão urbana eleva o consumo doméstico, aumenta a produção de efluentes e exige sistemas mais robustos de abastecimento e saneamento. Em paralelo, a indústria demanda volumes expressivos para processos produtivos, resfriamento, lavagem de equipamentos e geração de vapor, ao passo que a mineração incorpora grandes quantidades de água em operações de beneficiamento mineral e controle de rejeitos. A geração hidrelétrica, por sua vez, embora nem sempre represente consumo direto, depende da manutenção de vazões compatíveis com a operação dos reservatórios e com a segurança energética nacional, estabelecendo novas formas de competição entre diferentes usos. Ao inserir essa discussão em um contexto mais amplo, a crescente pressão sobre os sistemas hídricos não resulta exclusivamente da

escassez física da água, mas da intensificação simultânea das necessidades sociais, econômicas e ambientais que passam a disputar o mesmo recurso. Molden afirma que "[...] o aumento da demanda por água para usos não agrícolas intensificará a competição por recursos limitados. Sem ganhos de produtividade, serão necessários mais 5.000 km³ de água para atender à futura demanda por alimentos" (2007, p. 100), cenário que amplia a importância da eficiência no uso da água, do reaproveitamento, da redução de perdas e da incorporação de tecnologias capazes de elevar a produtividade hídrica sem ampliar proporcionalmente as retiradas dos mananciais. Sob esse raciocínio, o conceito de disponibilidade relativa assume papel central, pois uma mesma bacia hidrográfica pode apresentar volumes naturais aparentemente suficientes e, ainda assim, experimentar situações de elevada pressão quando diferentes usuários concentram suas demandas em determinados períodos do ano ou quando eventos hidrológicos reduzem temporariamente as vazões disponíveis. O resultado desse processo manifesta-se no aumento dos conflitos pelo uso da água, na necessidade de compatibilizar prioridades entre abastecimento humano, produção de alimentos, conservação ambiental e atividades econômicas, além da crescente dependência de estruturas capazes de regular a oferta hídrica diante de uma demanda que continua crescendo em ritmo superior à estabilidade natural dos sistemas.

> [...] a resiliência da geração hidrelétrica às mudanças climáticas é essencial para fornecer serviços de energia e água com segurança. Os projetos hidrelétricos são suscetíveis aos impactos das mudanças climáticas devido à sua dependência da precipitação e do escoamento, bem como à exposição a eventos meteorológicos extremos. Tanto as operações quanto as infraestruturas hidrelétricas precisam ser resilientes para superar a crescente variabilidade climática e fornecer serviços de adaptação. Isso é particularmente importante para barragens de armazenamento que possuem capacidade de controle de inundações e mitigação de secas. Quando não são corretamente projetados e administrados, os projetos hidrelétricos podem agravar os impactos das mudanças climáticas sobre as comunidades locais e o meio ambiente. A consideração inadequada dos riscos climáticos pode resultar em deficiências no desempenho técnico e financeiro, nos aspectos de segurança e nas funções ambientais. Além disso, quando as oportunidades relacionadas às mudanças climáticas não são avaliadas, as decisões de investimento podem não reconhecer adequadamente o papel da infraestrutura hidrelétrica no fornecimento de serviços relacionados ao clima. Os sistemas hidrelétricos caracterizam-se por sua longevidade e são tradicionalmente projetados com base em dados hidrológicos históricos de longo prazo e em previsões. Entretanto, um clima que se modifica rapidamente significa que os dados históricos podem não representar mais o estado climático atual. Os pesquisadores descreveram esse fenômeno como a morte da estacionariedade. Em resposta, estão surgindo novas abordagens e métodos para orientar a tomada de decisão sob incerteza profunda. Essas abordagens caracterizam-se por uma análise de baixo para cima e baseiam-se em um planejamento robusto. As partes interessadas locais do projeto definem as funções e os indicadores do estudo, em oposição às análises de cima para baixo, desenvolvidas para examinar primeiro o caso genérico e, posteriormente, seus detalhes. Por robustez, essas abordagens valorizam a capacidade de apresentar bom desempenho diante de uma ampla variedade de futuros possíveis e imprevisíveis, em vez de otimizar seu desempenho para uma condição futura esperada (Ubierna; Díez santos; Mercier-blais, 2022, p. 109, tradução nossa).

A partir de uma nova ótica, o crescimento contínuo das demandas por água e a maior instabilidade do regime hidrológico fazem com que os reservatórios assumam posição estratégica na gestão dos recursos hídricos, pois passam a funcionar como o principal mecanismo de compensação entre a variabilidade natural das vazões e a necessidade de garantir oferta regular para diferentes

usuários ao longo do ano. Grigg (2016) afirma que "[...] as águas superficiais podem incluir água armazenada em reservatórios ou derivações diretas de rios. Os principais componentes da infraestrutura incluem barragens, túneis, canais, comportas, vertedouros e estruturas de controle" (p. 229), caracterizando um conjunto de obras cuja finalidade ultrapassa o simples armazenamento de água e passa a integrar sistemas complexos de regulação hidrológica, abastecimento público, irrigação, geração hidrelétrica, navegação, controle de cheias e manutenção de vazões em períodos críticos. Essa infraestrutura permite redistribuir temporalmente a disponibilidade hídrica, armazenando parte dos volumes produzidos durante períodos de maior precipitação para disponibilizá-los quando as vazões naturais diminuem, reduzindo a vulnerabilidade decorrente da irregularidade climática e oferecendo maior estabilidade ao funcionamento dos diferentes setores dependentes da água. No território brasileiro, essa função adquire importância ainda maior em razão das expressivas diferenças regionais na produção de água e da crescente pressão exercida pelos usos múltiplos sobre rios e aquíferos. O Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2025 informa que o país possui aproximadamente 240 mil massas d'água mapeadas, entre naturais e artificiais, das quais 3.661 reservatórios apresentam capacidade de armazenamento conhecida, totalizando cerca de 630,2 bilhões de metros cúbicos de água acumulada. Desse volume, aproximadamente 92,7% encontram-se associados à geração hidrelétrica, evidenciando o papel central dessas estruturas para a segurança energética nacional, embora também sustentem atividades relacionadas ao abastecimento urbano, irrigação, controle de cheias e atendimento de diversos outros usos estratégicos. Ao considerar o conjunto dessas relações, o desempenho operacional dos reservatórios passou a depender cada vez mais da capacidade de responder simultaneamente às oscilações climáticas, às demandas crescentes da sociedade e às exigências ambientais relacionadas à manutenção dos ecossistemas aquáticos. Tucci (2001) afirma que "[...] reservatórios com comportas são mais eficientes com o mesmo volume, porém vulneráveis a erros humanos, sendo indicados para projetos de usos múltiplos " (p. 628), aspecto que demonstra que a eficiência dessas estruturas não resulta apenas de sua capacidade física de armazenamento, mas também da forma como sua operação é planejada, monitorada e executada diante de cenários hidrológicos cada vez mais variáveis. Com isso, a definição das regras de operação influencia diretamente a regularização das vazões, o atendimento simultâneo dos diferentes usuários e a redução dos riscos associados tanto à escassez quanto aos eventos extremos, exigindo sistemas permanentes de monitoramento hidrológico e modelos de previsão capazes de subsidiar decisões técnicas em tempo oportuno. Essa condição torna-se particularmente relevante quando se observa que, segundo a ANA, os níveis de armazenamento do Sistema Interligado Nacional e do Reservatório Equivalente do Nordeste passaram a assumir importância estratégica para a segurança hídrica e energética do país, funcionando como indicadores sensíveis da capacidade de enfrentamento de períodos prolongados de estiagem e da manutenção do equilíbrio entre oferta e demanda de água.

Dessa forma, os reservatórios deixam de representar apenas obras de engenharia hidráulica e passam a constituir elementos estruturantes da governança dos recursos hídricos, concentrando expectativas relacionadas ao abastecimento humano, à produção de alimentos, à geração de energia e à estabilidade das atividades econômicas em um contexto caracterizado por crescente incerteza hidrológica e intensificação das pressões sobre os sistemas naturais.

Nesse quadro mais amplo, a crescente dependência dos reservatórios, a irregularidade espacial da oferta natural, a alteração dos regimes hidrológicos e a expansão dos usos múltiplos convergem para uma condição na qual a existência física de água já não assegura, por si mesma, abastecimento estável, qualidade adequada ou proteção diante de secas e cheias. Tejada-Guibert et al. afirmam que "[...] a segurança hídrica é definida como a capacidade de uma população de garantir acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para sustentar os meios de vida, o bem-estar humano, o desenvolvimento socioeconômico, proteger contra a poluição e os desastres relacionados à água e preservar os ecossistemas" (2015, p. 204), incorporando ao conceito uma relação inseparável entre oferta hídrica, atendimento das necessidades sociais, continuidade das atividades produtivas, controle da degradação ambiental e redução dos danos provocados por eventos extremos. Sob esse ponto de vista, a insegurança hídrica não corresponde apenas à insuficiência absoluta de água, pois também se manifesta quando o recurso existe, mas apresenta qualidade incompatível com determinados usos, encontra-se distante das áreas de maior demanda, depende de infraestruturas frágeis ou permanece sujeito a interrupções causadas por estiagens prolongadas, contaminação dos mananciais e falhas operacionais. Ao mesmo tempo, a vulnerabilidade dos sistemas hídricos brasileiros resulta de combinações territoriais específicas, já que a concentração da maior parte da vazão superficial na Região Hidrográfica Amazônica contrasta com a elevada pressão existente em áreas urbanizadas, agrícolas e industrializadas do Centro-Sul e com a irregularidade pluviométrica que limita a oferta em extensas porções do Nordeste. Nesse cenário, mudanças no volume, na intensidade e na distribuição sazonal das chuvas repercutem sobre a recarga subterrânea, as vazões de estiagem e o armazenamento dos reservatórios, quando comparado ao crescimento urbano e a expansão das atividades econômicas elevam as retiradas justamente quando a previsibilidade da oferta se reduz. Paralelamente, a pressão sobre os reservatórios revela uma dimensão crítica dessa interação, pois estruturas projetadas com base em séries históricas passam a operar sob condições diferentes daquelas consideradas em seu dimensionamento, enfrentando afluências menores durante períodos secos, maiores perdas por evaporação em ambientes aquecidos e obrigações simultâneas de atendimento ao abastecimento público, à irrigação, à geração hidrelétrica e às vazões necessárias à conservação dos ecossistemas. Grigg (2016, p. 375) registra que "[...] de forma mais precisa, segundo a UN-Water (2015), a segurança hídrica consiste em assegurar o acesso sustentável à água adequada para os meios de vida, o bem-estar e o desenvolvimento, incluindo a proteção contra a poluição, os desastres e a

preservação dos ecossistemas", definição que incorpora a gestão dos riscos ao próprio conteúdo da segurança hídrica e afasta qualquer abordagem baseada exclusivamente no aumento da oferta por meio de novas obras. Levando em consideração outro enfoque, ampliar a capacidade de armazenamento pode reduzir a exposição a estiagens, mas não elimina problemas relacionados à distribuição desigual, à degradação da qualidade da água, às perdas nos sistemas de abastecimento, ao uso ineficiente e à ausência de coordenação entre setores que dependem do mesmo corpo hídrico. Nesse aspecto específico, a gestão integrada precisa articular disponibilidade superficial e subterrânea, conservação das bacias, operação de reservatórios, controle da demanda, saneamento e adaptação climática, levando em conta que decisões tomadas em um setor podem restringir usos localizados a jusante ou comprometer funções ecológicas essenciais. Diante desse panorama, o presente artigo tem como objeto de pesquisa a insegurança hídrica no Brasil, considerando os efeitos das mudanças climáticas, a distribuição territorial desigual da água e a pressão crescente sobre os reservatórios diante dos diferentes usos sociais, econômicos e ambientais. A investigação parte da seguinte pergunta de pesquisa: de que maneira as mudanças climáticas e a crescente pressão sobre os reservatórios contribuem para o agravamento da insegurança hídrica no Brasil? Em articulação com esse debate, a relevância científica do estudo reside na análise conjunta de processos que, muitas vezes, são examinados separadamente, como a variabilidade hidrológica, a evolução das demandas setoriais, a capacidade de regularização das vazões e os limites institucionais da gestão. Sua relevância social decorre, assim sendo, dos efeitos diretos que a redução da segurança hídrica produz sobre o abastecimento das populações, os preços dos alimentos, a geração de energia, a saúde pública, a produção industrial e a permanência de comunidades em territórios sujeitos à escassez ou a eventos extremos. Considerando esse contexto, investigar essas relações em um período de crise climática contribui para qualificar o planejamento dos recursos hídricos, orientar medidas de adaptação e fortalecer decisões capazes de compatibilizar o atendimento das demandas humanas com a manutenção dos sistemas naturais dos quais depende a própria disponibilidade de água.

2 METODOLOGIA: ABORDAGEM ANALÍTICO-COMPREENSIVA PARA O ESTUDO DA INSEGURANÇA HÍDRICA BRASILEIRA DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DA PRESSÃO SOBRE OS RESERVATÓRIOS

Esta investigação foi desenvolvida a partir da articulação entre as abordagens qualitativa e quantitativa, por se compreender que a análise da insegurança hídrica brasileira exigiu interpretar, simultaneamente, os processos sociais, ambientais e institucionais relacionados aos recursos hídricos e os indicadores estatísticos capazes de evidenciar sua dimensão espacial e temporal. Dessa forma, a pesquisa utilizou os dados quantitativos disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), especialmente aqueles referentes à precipitação, vazões, disponibilidade

hídrica, reservatórios e demandas pelos diferentes usos da água, como base empírica para sustentar a interpretação qualitativa do objeto investigado. Em outras palavras, os dados numéricos não foram tratados como finalidade da investigação, mas como instrumentos que possibilitaram compreender as relações entre mudanças climáticas, distribuição territorial da água e intensificação das pressões sobre os sistemas hídricos. Minayo (2007, p. 73) afirma que: "[...] de forma complementar, a integração entre diferentes estratégias metodológicas também foi compreendida como um procedimento capaz de ampliar a compreensão do fenômeno investigado". Nessa perspectiva, Flick pontua que "[...] a pesquisa quantitativa e a pesquisa qualitativa oferecem abordagens diferentes. Cada uma tem seus pontos fortes e suas limitações quanto ao que pode ser estudado. [...] A pesquisa quantitativa e a pesquisa qualitativa podem complementar uma à outra" (2013, p. 28). Assim, a combinação entre dados estatísticos e interpretação teórica possibilitou construir uma análise integrada da insegurança hídrica brasileira, articulando as evidências produzidas pela ANA com o referencial teórico adotado para responder à pergunta de pesquisa.

> [...] pode ser capcioso dizer que o pensamento qualitativo oferece um fundamento ou uma disposição para o pensamento quantitativo. O pensamento qualitativo é muito mais e está misturado com todas as etapas do trabalho científico. Mesmo quando milhões de cálculos estão sendo processados por um bom computador, as verificações sobre o progresso e a credibilidade de enumeração agregadora foram programadas na operação por cientistas visionários e céticos, ou seja, a interpretação qualitativa tem sido programada. Todo o pensamento científico é uma mescla dos pensamentos quantitativo e qualitativo. A pesquisa sobre o funcionamento das coisas nos quadro mais geral do conhecimento é uma tarefa quantitativa e qualitativa. Pesquisa é investigação, um estudo deliberado, uma busca pela compreensão (Stake, 2011, p. 23).

Além disso, o delineamento metodológico desta investigação foi caracterizado como descritivo e bibliográfico, uma vez que buscou descrever, interpretar e compreender a insegurança hídrica brasileira por meio da articulação entre a produção científica especializada e documentos oficiais relacionados à gestão dos recursos hídricos. Essa opção metodológica mostrou-se adequada porque permitiu reunir diferentes interpretações produzidas pela literatura nacional e internacional, bem como confrontá-las com informações técnicas provenientes da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, ampliando a compreensão das relações entre mudanças climáticas, disponibilidade hídrica, pressão sobre os reservatórios e governança. Nessa perspectiva, Gil destacou que "[...] a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos" (2008, p. 23). Adicionalmente, o levantamento bibliográfico não foi compreendido apenas como uma etapa preliminar da investigação, mas como o próprio fundamento da construção analítica do estudo, permitindo identificar diferentes interpretações acerca do objeto pesquisado e estabelecer um diálogo crítico entre elas. Ainda nessa direção, Prodanov e Freitas afirmam que "[...] os demais tipos de pesquisa também envolvem o estudo bibliográfico, pois todas as pesquisas necessitam de um referencial teórico. Para a pesquisa bibliográfica, é interessante utilizar as

fichas de leitura, que facilitam a organização das informações obtidas" (2013, p. 55). Assim, a escolha pelo delineamento descritivo e bibliográfico possibilitou organizar e interpretar criticamente o conhecimento disponível sobre a insegurança hídrica no Brasil, articulando documentos institucionais, obras clássicas e estudos contemporâneos, de modo a construir um percurso analítico coerente com os objetivos e com a pergunta de pesquisa.

E verdade, a interpretação dos dados foi orientada pelo método analítico-compreensivo, por se entender que a insegurança hídrica brasileira não poderia ser explicada exclusivamente a partir da descrição de indicadores hidrológicos ou de informações quantitativas isoladas. Mais do que identificar variações na precipitação, nas vazões ou na disponibilidade de água, esta investigação buscou compreender as relações estabelecidas entre mudanças climáticas, distribuição espacial dos recursos hídricos, crescimento das demandas, operação dos reservatórios e mecanismos de governança que condicionam a segurança hídrica em diferentes territórios. Dessa forma, os dados estatísticos foram analisados à luz das relações sociais, institucionais e ambientais que lhes atribuem significado, permitindo interpretar o fenômeno em sua complexidade. Weber assinala que "[...] a compreensão consiste em apreender o sentido subjetivamente visado da ação, seja ele efetivamente existente ou construído teoricamente para fins de análise" (1949, p. 212). Esse olhar possibilitou reconhecer que os processos hidrológicos não ocorrem de maneira dissociada das decisões humanas, das formas de ocupação do território e das políticas públicas relacionadas ao uso da água. Em sentido convergente, Stake afirma que "[...] a função da pesquisa qualitativa não é simplesmente descrever acontecimentos, mas compreender as relações, os significados e os contextos nos quais eles ocorrem" (2011, p. 89). Dito isso, a adoção do método analítico-compreensivo permitiu integrar fenômenos naturais e sociais em uma mesma interpretação, favorecendo uma análise capaz de explicar como fatores climáticos, hidrológicos, territoriais e institucionais interagem continuamente na produção da insegurança hídrica brasileira.

Dessa forma, a construção do "corpus documental" foi realizada a partir de critérios previamente definidos de relevância científica, atualidade, reconhecimento acadêmico e aderência direta ao objeto da pesquisa, buscando reunir obras capazes de oferecer fundamentos consistentes para a compreensão da insegurança hídrica brasileira. O principal conjunto de dados quantitativos foi obtido no Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2025, elaborado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), utilizado como base estatística para a análise da disponibilidade hídrica, das vazões, das precipitações, dos reservatórios e dos indicadores de comprometimento hídrico. Conjuntamente, o referencial teórico foi constituído por livros clássicos e contemporâneos, nacionais e internacionais, relacionados à hidrologia, aos recursos hídricos, à segurança hídrica, às mudanças climáticas, à governança, à gestão integrada, aos riscos ambientais e à eco-hidrologia, permitindo estabelecer um diálogo entre diferentes campos do conhecimento. Flick afirma que "[...] a

seleção dos casos, dos documentos e das fontes de informação deve orientar-se por sua relevância para responder à questão de pesquisa, e não por critérios de representatividade estatística" (2013, p. 26). Essa orientação metodológica permitiu priorizar obras que apresentassem efetiva contribuição para o problema investigado, em vez de simplesmente ampliar o número de referências consultadas. Em perspectiva semelhante, Prodanov e Freitas registram que "[...] a pesquisa bibliográfica é elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos científicos, dissertações, teses e documentos disponíveis, permitindo ao pesquisador entrar em contato com o conhecimento produzido sobre determinado assunto" (2013, p. 112). Logo, a constituição do corpus documental procurou reunir fontes oficiais e literatura científica reconhecida, assegurando consistência teórica, confiabilidade das informações e estreita relação entre o material analisado, os objetivos estabelecidos e a pergunta que orientou o desenvolvimento desta investigação.

> [...] a primeira tarefa do investigador, uma vez definido seu objeto, é proceder a uma ampla pesquisa bibliográfica, capaz de projetar luz e permitir melhor ordenação e compreensão da realidade empírica. A pesquisa bibliográfica pode ter vários níveis de aprofundamento, mas deve abranger, minimamente, os estudos clássicos sobre o objeto em questão (ou sobre os termos de sua explicitação) e os estudos mais atualizados sobre o assunto. O nível de abrangência dessa revisão precisa ficar escrito no desenho metodológico da investigação. Esse labor inicial parte de algumas precondições: que a bibliografia seja suficientemente ampla para traçar a moldura dentro da qual o objeto se situa: a busca de vários pontos de vista, dos diferentes ângulos do problema que permitam estabelecer definições, conexões e mediações, demonstrando o 'estado da arte' (Minayo, 2007, p. 183-184).

Neste sentido, os procedimentos de análise dos dados foram conduzidos de maneira integrada, articulando os indicadores quantitativos disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) ao referencial teórico que fundamentou a investigação. Os dados referentes à precipitação, às vazões, à disponibilidade hídrica, ao balanço hídrico, aos reservatórios, às demandas pelos diferentes usos da água, ao monitoramento hidrológico e à governança dos recursos hídricos não foram examinados de forma isolada, mas interpretados a partir das relações estabelecidas entre fatores climáticos, hidrológicos, territoriais e institucionais que condicionam a segurança hídrica brasileira. Por esse motivo, a análise procurou identificar como as alterações observadas em um desses componentes repercutem sobre os demais, permitindo compreender a dinâmica sistêmica que caracteriza os recursos hídricos. Nesse sentido, Minayo afirma que "[...] a análise e a interpretação dos dados não constituem momentos estanques da pesquisa, mas processos que se articulam continuamente durante a investigação, permitindo ao pesquisador construir explicações fundamentadas sobre a realidade estudada" (2007, p. 61). Complementarmente, a interpretação dos resultados buscou superar uma leitura exclusivamente descritiva dos indicadores hidrológicos, relacionando os dados empíricos às contribuições da literatura especializada para compreender os fatores responsáveis pela ampliação da insegurança hídrica no Brasil. Com o olhar convergente, Stake destaca que "[...] a análise qualitativa procura reconhecer padrões, estabelecer relações entre acontecimentos e interpretar significados a

partir do contexto em que os fenômenos se desenvolvem" (2011, p. 111). Dessa maneira, a análise integrada dos dados possibilitou interpretar conjuntamente os processos naturais e as ações humanas, evidenciando que a disponibilidade hídrica resulta da interação permanente entre clima, território, infraestrutura, demandas sociais e capacidade institucional de gestão, aspecto indispensável para responder à pergunta de pesquisa proposta neste estudo.

Desse modo, a interpretação dos resultados foi orientada por um conjunto de categorias analíticas previamente definidas, elaboradas a partir da literatura especializada e diretamente relacionadas ao objeto e à pergunta de pesquisa. Entre essas categorias destacaram-se disponibilidade hídrica, insegurança hídrica, mudanças climáticas, ciclo hidrológico, bacia hidrográfica, reservatórios, pressão sobre os recursos hídricos, governança dos recursos hídricos, gestão integrada, resiliência hídrica e planejamento adaptativo. Essas categorias não foram empregadas de maneira isolada, mas articuladas entre si para possibilitar uma compreensão integrada das relações existentes entre processos naturais, usos da água, infraestrutura hídrica e capacidade institucional de resposta diante das transformações ambientais contemporâneas. Em outras palavras, cada categoria constituiu um eixo interpretativo capaz de explicar diferentes dimensões do fenômeno investigado, permitindo assimilar como alterações no clima, na dinâmica hidrológica e nas formas de ocupação do território repercutem sobre a disponibilidade de água e sobre a segurança hídrica nacional. Nessa direção, Weber afirma que "[...] um conceito é um instrumento intelectual construído para ordenar a realidade e tornar possível a compreensão dos fenômenos sociais em sua complexidade" (1949, p. 213). Flick assinala que "[...] as categorias de análise constituem instrumentos de interpretação que permitem organizar os dados, estabelecer relações entre eles e construir explicações coerentes para o problema investigado" (2013, p. 39). Com isso, a articulação dessas categorias analíticas permitiu interpretar conjuntamente os processos climáticos, hidrológicos, territoriais e institucionais, demonstrando que a insegurança hídrica brasileira resulta da interação contínua entre a disponibilidade natural da água, a crescente pressão das demandas, a capacidade de armazenamento, a governança dos recursos hídricos e as estratégias de adaptação desenvolvidas para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

3 ÁGUA E RISCO: UMA ANÁLISE DA INSEGURANÇA HÍDRICA DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DA PRESSÃO SOBRE RESERVATÓRIOS NO BRASIL

A formação da disponibilidade hídrica no território brasileiro resulta da interação permanente entre os processos do ciclo hidrológico e as características físicas que definem o comportamento de cada bacia hidrográfica, fazendo com que a água seja distribuída de maneira diferenciada conforme a precipitação, o relevo, a geologia, os tipos de solo, a cobertura vegetal e a configuração da rede de drenagem. ANA (2025, p. 10) afirma que "[...] a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do SINGREH. A Conjuntura

apresenta suas informações considerando os recortes territoriais por Regiões Hidrográficas e Unidades de Gestão de Recursos Hídricos", estabelecendo um referencial técnico segundo o qual a organização espacial da água acompanha os limites naturais das bacias, e não as divisões político-administrativas, permitindo que o planejamento dos recursos hídricos considere processos hidrológicos que se desenvolvem de forma integrada desde as áreas de cabeceira até os exutórios. Essa opção metodológica decorre do fato de que todos os fenômenos responsáveis pela produção, circulação, armazenamento e escoamento da água ocorrem no interior das bacias hidrográficas, onde precipitação, infiltração, evapotranspiração, recarga subterrânea e vazões respondem às mesmas condições fisiográficas e climáticas. Tendo isso em vista, o território brasileiro está organizado, para fins de gestão, em doze Regiões Hidrográficas e em Unidades de Gestão de Recursos Hídricos, que agrupam bacias de abrangência interestadual e estadual, possibilitando análises compatíveis com a diversidade hidrológica existente entre a Amazônia, Tocantins-Araguaia, Parnaíba, São Francisco, Paraná, Paraguai, Uruguai, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste e Atlântico Sul. Essa estrutura evidencia que a disponibilidade de água não constitui uma característica homogênea do território nacional, mas uma propriedade produzida por sistemas hidrográficos que apresentam respostas distintas diante das mesmas influências atmosféricas, em razão das diferenças de relevo, declividade, densidade de drenagem, capacidade de infiltração dos solos, armazenamento subterrâneo e cobertura vegetal. Em sentido semelhante, os processos hidrológicos desenvolvidos em cada bacia determinam tanto o volume de água produzido quanto à velocidade com que ele é transferido para os cursos d'água, condicionando a regularidade das vazões e a disponibilidade observada ao longo do ano. Tucci e Bertoni pontuam que "[...] a variação do nível ou de vazão de um rio depende das características climatológicas e físicas da bacia hidrográfica. As distribuições temporal e espacial da precipitação são as principais condições climatológicas" (2003, p. 59), atribuindo à interação entre fatores atmosféricos e atributos fisiográficas o papel central na formação do comportamento hidrológico das bacias. A partir dessa interação, precipitações semelhantes podem produzir respostas completamente distintas, dependendo da permeabilidade dos solos, da presença de áreas úmidas, da capacidade de armazenamento natural, da cobertura florestal e do tempo necessário para que a água percorra os diferentes compartimentos da bacia até alcançar a rede hidrográfica principal. Também por esse motivo, a simples quantificação dos volumes precipitados não é suficiente para representar a disponibilidade efetiva de água, pois parte expressiva desse volume retorna rapidamente à atmosfera, outra permanece temporariamente armazenada nos solos e aquíferos, se comparado a apenas uma fração alimenta diretamente os cursos d'água que sustentam os diferentes usos humanos e ambientais. Não por acaso, a organização territorial baseada em bacias hidrográficas permite integrar esses processos físicos à gestão dos recursos hídricos, favorecendo diagnósticos compatíveis com o funcionamento natural dos sistemas e fornecendo

parâmetros mais consistentes para avaliar diferenças regionais, planejar intervenções e interpretar alterações hidrológicas observadas ao longo do tempo. Esse conjunto de relações também evidencia que a avaliação da disponibilidade hídrica depende de informações continuamente atualizadas sobre precipitação, níveis, vazões, qualidade da água e demais componentes do ciclo hidrológico, obtidas por meio de estruturas permanentes de monitoramento distribuídas pelas diferentes regiões hidrográficas brasileiras.

> [...] uma bacia fluvial ou bacia de captação geralmente inclui diferentes tipos de ecossistemas, cada um com seus próprios conjuntos de processos e comportamentos hidrológicos que afetam a disponibilidade e a qualidade da água na bacia. A Figura 8.1 ilustra alguns tipos de ecossistemas normalmente presentes em uma bacia, como florestas de cabeceira, áreas úmidas, florestas de planície, terras agrícolas e áreas urbanas. É útil visualizar os ecossistemas situados ao longo do percurso hidrológico superficial da água na bacia, isto é, desde as cabeceiras até as saídas, tendo em mente que uma grande parcela do volume total de água de uma bacia interrompe esse percurso superficial ao ingressar na atmosfera por meio da evapotranspiração. Parte da água infiltra-se no subsolo em determinados setores da bacia para ressurgir acima da superfície na forma de nascentes, contribuindo para córregos, rios e áreas úmidas, bem como para a descarga submarina de águas subterrâneas. Os tipos de ecossistemas amplamente encontrados são classificados, em seu nível mais geral, em florestas, campos ou áreas agrícolas e áreas úmidas. Cada uma dessas categorias gerais apresenta classificações adicionais. Por exemplo, os processos hidrológicos de uma floresta primária antiga diferem consideravelmente daqueles observados em uma plantação florestal de uma única espécie ou em uma floresta secundária em regeneração. A determinação da disponibilidade de água para os diferentes usos humanos e para as necessidades dos ecossistemas requer o cálculo do balanço hídrico da bacia. Calcular um balanço hídrico ou orçamento hídrico envolve quantificar quanta água entra e sai da bacia durante determinado período e qual é a variação da água armazenada em seu interior. A principal entrada na maioria das bacias é a precipitação na forma de chuva e/ou neve, embora algumas bacias, como o Delta do Okavango, em Botsuana, tenham a vazão fluvial afluente como principal entrada. Uma importante saída ou fluxo de água de uma bacia é a evapotranspiração, que frequentemente corresponde a 50%-100% da precipitação recebida nas regiões tropicais e subtropicais. A descarga dos rios pode representar outra saída importante. Em algumas partes da bacia, a água superficial percorre para recarregar as águas subterrâneas, enquanto, durante a estação seca, as águas subterrâneas descarregam na superfície na forma de nascentes e afloramentos. Embora a chuva e a descarga fluvial possam ser medidas e a evapotranspiração estimada, é muito mais difícil estimar com precisão a recarga líquida das águas subterrâneas, frequentemente obtida como termo residual de um balanço hídrico (Saha; Setegn, 2015, p. 125-126, tradução nossa).

A ANA afirmar que “[...] o monitoramento hidrológico desempenha papel fundamental ao fornecer, de forma contínua, dados sobre a quantidade e a qualidade das águas superficiais e subterrâneas em todo o território nacional” (2025, p. 11), pois a disponibilidade hídrica formada no interior das bacias somente pode ser avaliada com rigor quando seus componentes são observados ao longo do tempo, em diferentes pontos do espaço e sob condições hidrológicas variadas. O volume precipitado, a elevação do nível dos rios, a descarga líquida, o transporte de sedimentos, os parâmetros de qualidade e a oscilação dos aquíferos constituem registros complementares de um mesmo sistema hidrológico, no qual alterações em determinado compartimento repercutem sobre os demais. A Rede Hidrometeorológica Nacional, coordenada pela ANA e operada em parceria com órgãos públicos, empresas do setor elétrico e instituições estaduais, organiza grande parte dessa produção de dados, ao passo que o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos reúne, processa e disponibiliza

as séries utilizadas por pesquisadores, gestores e usuários. Em termos mais específicos, o levantamento referente a 2024 registra 23.877 estações distribuídas pelo país, número compatível com a necessidade de acompanhar um território marcado por fortes contrastes climáticos, hidrográficos e fisiográficos. Desse conjunto, 4.755 eram estações pluviométricas, 1.904 fluviométricas, 1.423 realizavam medições de vazão, 477 monitoravam a qualidade da água e 446 acompanhavam sedimentos em suspensão, formando uma base integrada para avaliar a resposta das bacias às diferentes condições hidrológicas. A rede também possuía 3.848 estações automáticas em operação, sendo 707 administradas diretamente pela ANA e 3.141 mantidas por instituições parceiras, ampliando a rapidez na transmissão dos dados e reduzindo o intervalo entre a ocorrência de um evento hidrológico e sua incorporação aos sistemas de monitoramento. As estações convencionais preservam a continuidade das séries históricas, em outra direção, os equipamentos automáticos oferecem maior resolução temporal durante secas, cheias e oscilações rápidas de vazão. A Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência acrescenta uma função estratégica ao selecionar estações destinadas ao acompanhamento de tendências hidrológicas de longo prazo e ao monitoramento de bacias prioritárias, fortalecendo a consistência das análises utilizadas na gestão dos recursos hídricos. Grigg (2016) registra que "[...] os gestores da água dependem intensamente de dados e modelos para orientar suas decisões sobre questões complexas de gestão. O monitoramento é necessário para fornecer os dados que sustentam essas decisões" (p. 251), relacionando diretamente a qualidade das decisões à continuidade e à confiabilidade das informações produzidas, já que modelos hidrológicos dependem de séries observacionais consistentes para representar adequadamente o comportamento das bacias. O acompanhamento das águas subterrâneas amplia esse sistema por meio da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, operada pelo Serviço Geológico do Brasil, que contabilizava 489 poços ao final de 2024. Somadas às redes estaduais de monitoramento, foram identificados 1.221 poços destinados ao acompanhamento dos aquíferos, quantitativo ainda reduzido diante da extensão das reservas subterrâneas brasileiras. A dimensão qualitativa também integra esse arranjo por meio da Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade da Água, cujos pontos passaram de 1.486, em 2016, para 2.983, em 2024, ampliando a capacidade de avaliação das condições dos mananciais. Dessa forma, monitorar a disponibilidade significa acompanhar simultaneamente quantidade, qualidade e comportamento hidrológico, pois um manancial volumoso pode apresentar limitações decorrentes de contaminação, elevada carga de sedimentos ou alterações físico-químicas incompatíveis com determinados usos. As redes estaduais, associadas ao sensoriamento remoto, às estações virtuais e a ferramentas como o HidroObserva[5],

[5] O "HidroObserva" é um aplicativo desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para modernizar o monitoramento hidrológico realizado na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), permitindo que observadores hidrológicos registrem e transmitam diretamente em campo informações sobre precipitação, nível dos rios, vazão e qualidade da água. A ferramenta substitui gradualmente o processo tradicional de anotação manual em boletins de campo, reduzindo o tempo entre a coleta das informações e sua disponibilização no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), além de minimizar erros de transcrição e aumentar a confiabilidade dos dados hidrológicos.

complementam esse sistema nacional e ampliam a cobertura territorial das informações. Ainda assim, a distribuição dessas estruturas permanece desigual entre as regiões hidrográficas, fazendo com que a própria densidade do monitoramento influencie a precisão das estimativas de disponibilidade hídrica e revele diferenças importantes entre as diversas bacias brasileiras.

Tucci (2001, p. 589) afirma que "[...] a definição de uma região homogênea está relacionada com um determinado tipo de comportamento do sistema hídrico. Na regionalização hidrológica, a homogeneidade é entendida como a semelhança na resposta das funções regionais obtidas", o que explica por que a disponibilidade de água no Brasil apresenta diferenças tão expressivas entre as regiões hidrográficas, ainda que todas estejam submetidas ao mesmo ciclo hidrológico. As informações produzidas pelas redes de monitoramento revelam que a distribuição espacial da precipitação, associada às características geológicas, geomorfológicas, climáticas e de cobertura vegetal de cada bacia, determina respostas hidrológicas bastante distintas quanto ao armazenamento, à infiltração, ao escoamento superficial e à manutenção das vazões ao longo do ano. Vista dessa maneira, a regionalização hidrológica deixa de representar apenas uma classificação cartográfica e passa a constituir um instrumento indispensável para interpretar o comportamento das bacias brasileiras, permitindo que áreas aparentemente semelhantes apresentem disponibilidades efetivas completamente diferentes em razão de suas condições naturais. A diversidade climática nacional evidencia esse quadro ao reunir ambientes extremamente úmidos, como aqueles predominantes na Amazônia, e regiões submetidas à elevada irregularidade pluviométrica, como ocorre em grande parte do Semiárido. Essa variação repercute diretamente sobre a vazão média dos cursos d'água, sobre as vazões mínimas utilizadas na gestão dos recursos hídricos e sobre indicadores como a Q95, que representa a vazão igualada ou superada durante noventa e cinco por cento do tempo e expressa a disponibilidade hídrica em condições de estiagem. Ao desenvolver essa reflexão, verifica-se que duas bacias com volumes anuais de precipitação relativamente próximos podem apresentar capacidades muito distintas de sustentar suas vazões durante os períodos secos, justamente porque fatores fisiográficos e hidrológicos condicionam respostas diferenciadas à mesma entrada de água. A ANA (2026) registra que "[...] a chuva é a grande fonte de água para o continente. A quantidade e a dinâmica de ocorrência ao longo do ano são variáveis no território. A precipitação anual varia de menos de 500 mm no Semiárido a mais de 3.000 mm na Amazônia" (p. 13), situação que se reflete diretamente na formação das vazões superficiais, na recarga dos aquíferos e na disponibilidade efetiva observada em cada região

Ao integrar dispositivos móveis ao monitoramento das estações convencionais, o HidroObserva fortalece a capacidade operacional da rede nacional de monitoramento, amplia a eficiência na gestão das informações hidrológicas e oferece suporte mais ágil às atividades de planejamento, gestão dos recursos hídricos, previsão de eventos extremos e tomada de decisões pelos órgãos responsáveis. Dessa forma, a plataforma representa um importante avanço na digitalização do monitoramento hidrológico brasileiro, contribuindo para o aprimoramento da governança das águas e para a produção de informações mais rápidas, precisas e acessíveis aos gestores e pesquisadores. Ver: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). HidroObserva. Brasília, DF: ANA, 2025.

hidrográfica, sem que o elevado volume nacional de água doce represente distribuição uniforme entre os diferentes territórios. Essa diferenciação explica por que a Região Hidrográfica Amazônica concentra aproximadamente 80% da vazão superficial brasileira, de forma diferente, as regiões Sudeste, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste e Paraná, responsáveis por parcela significativa da população, da produção industrial, agrícola e energética do país, dispõem de fração muito menor desse volume. O contraste torna-se ainda mais evidente quando a disponibilidade hídrica é analisada em termos per capita ou por unidade territorial, revelando que áreas economicamente mais dinâmicas convivem com disponibilidade relativa bastante inferior àquela observada em regiões menos povoadas. Sob outro enfoque, a utilização conjunta da vazão média e da Q95 permite distinguir situações em que a abundância anual mascara condições críticas durante longos períodos de estiagem, aspecto essencial para a definição de outorgas, para o planejamento do abastecimento público e para a avaliação da capacidade de suporte das bacias hidrográficas. Cabe destacar que a distribuição espacial da água, é por isso que, não pode ser interpretada exclusivamente pelos volumes totais produzidos pelo ciclo hidrológico, mas pela forma como esses volumes se distribuem ao longo do território e permanecem disponíveis durante diferentes épocas do ano, estabelecendo níveis distintos de vulnerabilidade entre as regiões hidrográficas brasileiras e oferecendo uma base técnica consistente para interpretar as oscilações temporais que caracterizam o funcionamento hidrológico nacional.

Em sentido semelhante, as diferenças espaciais identificadas entre as regiões hidrográficas brasileiras passam a revelar também forte oscilação temporal, pois os volumes de chuva e as vazões dos rios variam de um ano para outro, entre estações e dentro de uma mesma estação chuvosa. Os gráficos apresentados pela ANA para os anos hidrológicos de 2015 a 2024 mostram que a disponibilidade hídrica nacional foi marcada por períodos secos, recuperações parciais e eventos de cheia com intensidade desigual entre as bacias. A série não expressa um movimento uniforme em todo o país, já que determinadas regiões registraram precipitações inferiores à média histórica, de maneira distinta, outras atravessaram anos mais úmidos, com respostas distintas nas vazões em função das características de armazenamento, infiltração, evapotranspiração e propagação do escoamento. Em outros termos, a chuva constitui a principal entrada de água no sistema continental, mas sua contribuição efetiva depende do momento em que ocorre, da duração dos eventos, da intensidade das precipitações e das condições antecedentes de umidade do solo. Uma precipitação concentrada em poucos dias pode produzir cheias rápidas e elevado escoamento superficial sem assegurar recarga suficiente ou manutenção de vazões durante o período seco, em cenário diferente, chuvas distribuídas ao longo de vários meses tendem a favorecer maior infiltração, armazenamento no solo e alimentação gradual dos cursos d’água. Ao acompanhar esse movimento, a relação entre precipitação e vazão mostra-se condicionada pelo tempo de resposta de cada bacia, fazendo com que os efeitos de um ano chuvoso ou seco permaneçam por meses, sobretudo em sistemas dependentes de aquíferos, áreas

úmidas e grandes reservatórios. Ab'Sáber assinala que "[...] efetivamente, é muito grande a variabilidade climática no domínio das caatingas. Em alguns anos as chuvas chegam no tempo esperado [...] entretanto, em outros, as chuvas se atrasam ou mesmo não chegam" (2003, p. 91), circunstância que interfere diretamente no calendário agrícola, na recarga dos açudes, na disponibilidade para abastecimento e na manutenção das vazões de estiagem, já que o atraso das chuvas pode produzir déficits mesmo quando o total anual se aproxima da média histórica. No Semiárido, essa irregularidade assume particular importância porque a elevada evaporação potencial reduz rapidamente os volumes armazenados, em comparação com isso, os rios temporários respondem de forma descontínua às precipitações, ampliando a dependência de reservatórios e sistemas de transferência de água. Na Região Hidrográfica Amazônica, a elevada pluviosidade média não elimina oscilações sazonais e interanuais capazes de alterar níveis fluviais, restringir a navegação, afetar comunidades ribeirinhas e modificar o funcionamento de ecossistemas de várzea. Nas regiões do Paraná, Atlântico Sudeste e Atlântico Sul, anos com vazões abaixo da média repercutem sobre sistemas urbanos densamente povoados, polos industriais e aproveitamentos hidrelétricos, se comparado a episódios de precipitação intensa aumentam os riscos de inundações em bacias fortemente urbanizadas. Em seguida, os gráficos da ANA mostram que anos secos e úmidos não se alternam de forma regular, nem apresentam a mesma duração ou intensidade em todas as regiões, o que limita a adoção de médias históricas como referência suficiente para decisões operacionais. A média resume o comportamento de uma série, mas pode ocultar sequências prolongadas de déficit, extremos isolados e mudanças na distribuição sazonal das chuvas, elementos que afetam diretamente a confiabilidade da oferta hídrica. Ao explorar essa questão, a vazão média anual precisa ser examinada em conjunto com vazões mínimas, máximas, curvas de permanência e duração dos períodos de estiagem, pois a disponibilidade destinada aos usos humanos depende menos de um valor médio abstrato do que da capacidade do sistema de manter água em momentos de maior necessidade. Em certa medida, a Q95 oferece uma referência mais conservadora para avaliar essa condição, mas também está sujeita às mudanças verificadas nas séries hidrológicas, sobretudo quando secas consecutivas alteram a frequência e a duração das baixas vazões. Sob esse raciocínio, a variabilidade temporal transforma a disponibilidade hídrica em uma condição móvel, que pode se expandir em anos úmidos e se contrair rapidamente quando a precipitação diminui, a evapotranspiração aumenta e os estoques acumulados não são recompostos. Na prática, a ocorrência de cheias intensas, por outro lado, não representa necessariamente aumento duradouro da disponibilidade, pois parte expressiva do volume pode escoar rapidamente para jusante, provocar danos, transportar sedimentos e contaminantes ou ultrapassar a capacidade de armazenamento das infraestruturas existentes. Na sequência dessa reflexão, os contrastes registrados entre 2015 e 2024 mostram que a gestão hídrica precisa lidar com déficits prolongados e excedentes concentrados, ajustando regras de operação de reservatórios, outorgas,

sistemas de alerta e planejamento de usos a cenários menos regulares. O comportamento observado também amplia a diferença entre disponibilidade potencial e confiabilidade de fornecimento, já que uma bacia pode apresentar elevada vazão em determinado ano e enfrentar restrições severas no período seguinte. À medida que esse debate avança, a variabilidade deixa de ser tratada apenas como característica natural das bacias e passa a ser examinada em relação às mudanças nas condições atmosféricas que controlam a precipitação, a temperatura e a evapotranspiração, pois Metzger et al. afirmam que "[...] as alterações do clima têm vastas implicações para a gestão da água, incluindo mudanças nos processos e regimes hidrológicos, bem como na quantidade, na qualidade e no momento em que os recursos de água doce se tornam disponíveis" (2015, p. 462).

> [...] a abordagem eco-hidrológica da gestão dos recursos hídricos utiliza as funções dos diferentes ecossistemas presentes em uma bacia hidrográfica para manter padrões naturais de vazão, disponibilidade de água ao longo de todo o ano, proteção contra inundações e qualidade da água. Os ecossistemas conferem resiliência às bacias hidrográficas diante de anos com precipitações elevadas e reduzidas, amortecendo as incertezas associadas às mudanças climáticas. Assim, a compreensão das relações entre hidrologia e ecossistemas em uma bacia, bem como a manutenção e a utilização dos serviços ecossistêmicos, contribuem para a sustentabilidade da gestão dos recursos hídricos. Embora florestas e áreas úmidas tenham sido historicamente utilizadas pelos serviços ecossistêmicos que oferecem, o aumento expressivo da demanda por água, a elevação dos custos e a degradação dos ecossistemas tornam necessária uma compreensão detalhada dos processos eco-hidrológicos básicos que influenciam a qualidade da água, sua dinâmica e o funcionamento dos ecossistemas. Os padrões sazonais e interanuais de precipitação estão mudando e tornando-se mais incertos em consequência das mudanças climáticas. Essa incerteza na precipitação é transferida para as vazões dos rios e para o balanço hídrico da bacia hidrográfica. [...] a preservação do armazenamento natural de água na paisagem pode amortecer parcialmente os efeitos das mudanças climáticas sobre as bacias hidrográficas (Saha; Setegn, 2015, p. 124, tradução nossa).

Ao prosseguir essa análise, a variabilidade registrada nas séries de precipitação e vazão deixa de representar apenas a alternância natural entre anos secos e úmidos quando passa a apresentar maior persistência, amplitude e irregularidade, alterando a duração dos déficits, a concentração dos excedentes e o intervalo disponível para a recuperação dos sistemas hídricos. O comportamento hidrológico reunido pela ANA entre 2015 e 2024 mostra que grande parte do território brasileiro esteve submetida à predominância de condições mais secas, embora episódios de precipitação intensa e cheias severas também tenham ocorrido em diferentes regiões hidrográficas. Essa coexistência entre escassez prolongada e excedentes concentrados não constitui uma contradição, pois o aquecimento da atmosfera favorece maior evaporação, amplia sua capacidade de retenção de vapor e pode aumentar a intensidade das chuvas quando há condições para a formação de eventos convectivos. Em complemento, o aumento da temperatura intensifica a evapotranspiração potencial, reduz a umidade dos solos e acelera a perda de água armazenada em rios, lagos, açudes e reservatórios, de modo que volumes de precipitação próximos aos valores médios podem produzir menor disponibilidade líquida quando submetidos a condições térmicas mais elevadas. A ANA pontua que "[...] a mudança climática tem intensificado a ocorrência e a magnitude de eventos hidrológicos extremos, como secas e inundações, ampliando

riscos ao abastecimento de água, à produção agrícola, à segurança energética e à resiliência das populações vulneráveis" (2026, p. 25), pois a alteração dos extremos repercute simultaneamente sobre a oferta hídrica, a integridade das infraestruturas e a capacidade econômica das populações para responder a interrupções, perdas produtivas ou deslocamentos provocados por desastres. Em chave analítica distinta, uma seca hidrológica não depende apenas da ausência imediata de chuva, já que pode se desenvolver após sucessivas estações com precipitação insuficiente, quando os estoques superficiais e subterrâneos deixam de ser recompostos e as vazões permanecem abaixo dos níveis necessários aos usos existentes. Esse processo reduz a contribuição de base dos aquíferos para os rios, prolonga as baixas vazões mesmo após o retorno das chuvas e dificulta a recuperação de reservatórios submetidos a retiradas contínuas para abastecimento, irrigação e geração de energia. Quando essa problemática é examinada, os efeitos regionais também se mostram desiguais, já que o Semiárido apresenta elevada sensibilidade à irregularidade pluviométrica e às perdas por evaporação, em meio a essa mudança, outras regiões enfrentam restrições quando déficits sucessivos atingem bacias intensamente reguladas e submetidas a demandas elevadas. Sanders, McLean e Manueles afirmam que "[...] os cenários de mudanças climáticas indicam que as condições climáticas se tornarão progressivamente mais extremas. Conforme a estação chuvosa ou seca, é muito provável que aumente, respectivamente, a frequência de inundações e de secas" (2015, p. 509), aumentando a alternância entre excessos de curta duração e déficits prolongados, condição que dificulta o dimensionamento de infraestruturas apoiadas na expectativa de estabilidade dos regimes sazonais. Em conexão, o balanço hídrico das bacias passa a refletir não apenas mudanças nas entradas de precipitação, mas também maiores perdas atmosféricas, modificações na recarga subterrânea, alterações no escoamento superficial e redução da regularidade das vazões de base. A partir daí, chuvas mais intensas podem elevar temporariamente a descarga dos rios sem produzir recarga proporcional, durante intervalos maiores entre eventos aumentam a duração dos períodos de déficit. A vulnerabilidade hídrica, nesse caso, decorre tanto da alteração do volume precipitado quanto das mudanças no momento, na intensidade e na forma como a água circula pelas bacias hidrográficas, reduzindo a estabilidade da disponibilidade natural justamente quando cresce a dependência social por abastecimento contínuo e confiável.

Nessa linha de raciocínio, a disponibilidade hídrica produzida pelos processos naturais não corresponde, por si só, ao volume de água efetivamente acessível para abastecimento humano, produção agrícola, atividades industriais, geração de energia e manutenção dos ecossistemas. A passagem da "disponibilidade natural" para a "disponibilidade efetiva" depende de um conjunto de fatores que envolve qualidade da água, capacidade de armazenamento, infraestrutura de captação, tratamento, distribuição, regularização das vazões e eficiência dos instrumentos de gestão. Mesmo bacias com elevada produção hídrica podem enfrentar limitações quando parte significativa da água apresenta restrições de qualidade, encontra-se distante dos centros consumidores ou permanece sujeita

a variações sazonais que dificultam seu aproveitamento contínuo. Da mesma forma, regiões com menor disponibilidade natural podem alcançar maior segurança no abastecimento quando dispõem de sistemas de reservação, redes de distribuição eficientes e mecanismos de gestão capazes de compatibilizar diferentes demandas ao longo do tempo. A quantidade disponível, a rigor, representa apenas uma das dimensões envolvidas na oferta real de água, exigindo que aspectos físicos, institucionais e operacionais sejam analisados de maneira integrada. No interior dessa discussão, Molden afirma que "[...] em alguns casos, os recursos hídricos são fisicamente escassos. Em outros, os custos de desenvolvimento da água são proibitivos e ela se torna economicamente escassa. Há ainda situações em que a água está fisicamente disponível, mas produz benefícios inferiores ao seu potencial em razão da má gestão." (2007, p. 151), condição que expande a importância das políticas públicas voltadas ao planejamento das captações, ao investimento em infraestrutura, à operação adequada dos sistemas e à coordenação entre os diferentes usuários. A eficiência da gestão passa, desse modo, a exercer influência semelhante à dos fatores naturais sobre a oferta efetiva de água, especialmente em cenários marcados por maior variabilidade hidrológica e crescente pressão sobre os mananciais. Convém observar que a disponibilidade também sofre limitações quando os corpos hídricos apresentam processos de degradação ambiental capazes de reduzir sua aptidão para diferentes usos. A poluição por esgotos domésticos, efluentes industriais, rejeitos da mineração, fertilizantes, pesticidas e sedimentos compromete rios, lagos e aquíferos, aumentando os custos de tratamento, restringindo captações e reduzindo a parcela da água que permanece em condições adequadas para abastecimento e demais atividades produtivas. Em muitos casos, o volume existente permanece praticamente inalterado, mas sua qualidade deteriorada impede o aproveitamento seguro sem investimentos adicionais em tratamento ou recuperação ambiental. Gleick afirma que "[...] a qualidade da água costuma receber menos atenção do que sua quantidade e disponibilidade, embora alguns dos mais graves desafios hídricos estejam relacionados à contaminação. De fato, muitos problemas de disponibilidade de água têm, em sua origem, problemas de qualidade" (2012, p. 13), fato que impõe a necessidade de integrar políticas de conservação ambiental, saneamento básico, monitoramento da qualidade e gestão dos recursos hídricos. Sob esse conjunto de relações, disponibilidade efetiva resulta da interação permanente entre quantidade, qualidade, armazenamento, infraestrutura e capacidade institucional de gestão, tornando-se progressivamente mais sensível à medida que os diferentes usos sociais, econômicos e ambientais passam a disputar uma oferta cuja estabilidade já não depende exclusivamente do funcionamento natural do ciclo hidrológico.

Considerando esse contexto, a crescente pressão sobre os recursos hídricos brasileiros ocorre em um cenário no qual a disponibilidade natural já apresenta forte desigualdade territorial, maior instabilidade temporal e limitações decorrentes da qualidade da água, da capacidade de armazenamento e da infraestrutura existente. A expansão das retiradas não incide sobre um sistema

estável, mas sobre bacias submetidas à secas prolongadas, redução das vazões de estiagem, episódios de cheia concentrada e recuperação incompleta dos estoques superficiais e subterrâneos. O aumento das demandas urbanas, agrícolas, industriais, minerais e energéticas modifica a relação entre oferta e uso porque amplia o volume captado, concentra retiradas em períodos críticos e reduz as margens disponíveis para absorver eventos climáticos adversos. Em boa medida, a vulnerabilidade não decorre somente da quantidade total utilizada, mas da coincidência entre demandas elevadas e momentos nos quais rios, aquíferos e reservatórios apresentam menor capacidade de atendimento. A irrigação, por exemplo, tende a exigir maiores volumes durante os meses mais secos, justamente quando as vazões naturais diminuem e as perdas por evaporação se intensificam, no decorrer de o abastecimento urbano precisa manter regularidade diária independentemente das oscilações do regime hidrológico. Indo além, a geração hidrelétrica depende de níveis de armazenamento e vazões suficientes para sustentar a produção de energia, ao passo que a indústria e a mineração demandam continuidade operacional e padrões específicos de qualidade, impondo exigências distintas aos mesmos sistemas hídricos. Gleick afirma que "[...] primeiro, a distribuição e a gestão da água no mundo são profundamente desiguais. Segundo, estamos utilizando a água mais rapidamente do que a natureza consegue repô-la. As derivações de rios, o bombeamento de aquíferos e a poluição comprometem o abastecimento de água" (2011, p. 11), reunindo em um mesmo processo a desigualdade de acesso, o ritmo excessivo de exploração e a degradação dos mananciais, fatores que reduzem a parcela de água efetivamente disponível mesmo quando os volumes físicos ainda parecem elevados. A retirada contínua de águas subterrâneas pode provocar o rebaixamento dos níveis piezométricos, elevar os custos de bombeamento e diminuir a contribuição dos aquíferos para os cursos d'água durante as estiagens, de forma diferente, derivações superficiais alteram o regime de vazões a jusante e restringem o atendimento de usuários localizados em outros trechos da bacia. Ao lado disso, a poluição reduz a aptidão dos mananciais para abastecimento, irrigação e conservação ecológica, transferindo parte da escassez do campo quantitativo para o qualitativo e exigindo investimentos adicionais em tratamento, controle de fontes poluidoras e recuperação ambiental. Em face desse quadro, a ampliação da oferta por novas captações, barragens ou transferências não pode ser tratada como resposta isolada, pois cada intervenção acrescenta custos, impactos territoriais e novas dependências operacionais sem eliminar perdas, usos ineficientes ou conflitos de alocação. A gestão da demanda adquire, portanto, peso semelhante ao da expansão da infraestrutura, envolvendo redução de desperdícios, modernização dos sistemas de irrigação, reusa de água, controle de vazamentos e adequação dos processos produtivos à disponibilidade de cada bacia. Postel (2007) sustenta que "[...] há água suficiente. Mas haverá vontade suficiente? Somente aumentando o valor produzido por cada gota e integrando segurança alimentar, redução da pobreza e conservação dos ecossistemas será possível enfrentar a crescente crise da água" (p. 5), associando a segurança hídrica à produtividade do uso, à distribuição social dos benefícios e à

preservação das funções ambientais que mantêm a renovação e a qualidade dos recursos hídricos. Em leitura complementar, aumentar o valor produzido por unidade de água não significa apenas elevar retornos econômicos, mas reduzir perdas, ampliar o acesso das populações vulneráveis e evitar que a produção comprometa vazões ambientais, áreas de recarga e ecossistemas aquáticos. O avanço das demandas passa, daí, a exigir decisões sobre prioridades de uso, critérios de outorga, regras de operação dos reservatórios e limites de retirada compatíveis com a capacidade hidrológica de cada território. A pressão exercida sobre uma disponibilidade progressivamente menos confiável coloca em contato direto setores com ritmos, finalidades e níveis de consumo distintos, entre os quais se destacam a agricultura irrigada, o abastecimento urbano, a indústria, a mineração, a geração de energia e os usos destinados à manutenção ambiental.

> [...] muitas regiões já enfrentam níveis moderados ou elevados de estresse hídrico, quando o consumo ultrapassa 20% da oferta disponível. A avaliação das Nações Unidas realizada em 1997 determinou que um terço da população mundial já vivia em regiões submetidas a essa condição e que, até 2025, a parcela da população nessa situação provavelmente alcançaria dois terços. A escassez econômica é provocada pela falta de investimentos em água ou pela ausência de capacidade humana para atender à demanda, enquanto a escassez física ocorre quando não há água suficiente para satisfazer todas as demandas, incluindo as vazões ambientais. Enquanto a população triplicou entre 1900 e 1995, a demanda por água aumentou seis vezes em decorrência da ampliação das necessidades da agricultura, da indústria e dos usos domésticos. As retiradas mundiais de água doce são estimadas em 3.800 km³, dos quais 70% são utilizados pela agricultura, seguidos pela indústria, com 20%, e pelos usos domésticos, com 10%. Entretanto, o consumo per capita também continua aumentando no mundo industrializado. Em síntese, o estresse hídrico atual provavelmente aumentará em um futuro próximo em razão das demandas de uma população humana crescente, com necessidades de consumo cada vez maiores. Além disso, as mudanças climáticas já estão ampliando a pressão sobre os recursos hídricos. Consequentemente, são urgentemente necessárias estratégias para a gestão sustentável da água. A melhor maneira de alcançar esse objetivo consiste na implementação de processos, instituições e tecnologias que considerem simultaneamente a eficiência e a conservação dos ecossistemas. A disponibilidade de água está fortemente relacionada à sua qualidade, porque a poluição constitui uma das principais causas de escassez para usos como consumo humano, agricultura, indústria e conservação da biodiversidade. Estudos demonstram que a saúde humana é profundamente afetada pela escassez e pela poluição dos abastecimentos de água, especialmente em áreas submetidas à rápida urbanização. Muitos países em desenvolvimento enfrentam problemas de poluição, como eutrofização, deposição de metais pesados, acidificação e poluentes orgânicos persistentes, enquanto ainda procuram solucionar problemas tradicionais de abastecimento insuficiente e ausência de serviços de saneamento. A qualidade das águas superficiais e subterrâneas de uma bacia resulta do efeito combinado dos diferentes processos que atuam sobre a água durante o ciclo hidrológico. Sua composição química depende dos sólidos, líquidos e gases produzidos internamente ou com os quais a água interage. Os seres humanos modificaram a qualidade da água ao alterarem os territórios onde ocorre o ciclo hidrológico por meio de atividades como agricultura, urbanização, construção de barragens e desmatamento, bem como pela introdução direta de substâncias, incluindo despejos de esgoto e aplicação de pesticidas e fertilizantes. A poluição torna-se particularmente grave quando atinge as reservas subterrâneas, nas quais a contaminação apresenta diluição lenta e as medidas de purificação possuem custos elevados (Lartigue, 2015, p. 490-491, tradução nossa).

Diante desse conjunto de fatores, a vulnerabilidade hídrica formada pela desigualdade territorial da oferta, pela instabilidade das vazões, pela deterioração da qualidade e pela limitada capacidade de armazenamento torna-se mais complexa quando coincide com o crescimento contínuo

das demandas sociais, produtivas e ambientais. A água disponível em cada bacia passa a sustentar atividades que exigem volumes, padrões de qualidade, regularidade e condições operacionais muito diferentes. A Política Nacional de Recursos Hídricos reconhece essa multiplicidade ao estabelecer o uso múltiplo das águas como princípio de gestão, inserindo no mesmo espaço decisório o abastecimento humano, a irrigação, a dessedentação animal, a indústria, a mineração, a geração hidrelétrica, a navegação, a aquicultura e a conservação dos ecossistemas aquáticos. Frente a essa realidade, a presença de diversos usuários não implica apenas uma soma de demandas, pois cada setor interfere na quantidade, no momento e nas condições em que a água permanece disponível aos demais. O abastecimento público exige fornecimento contínuo e qualidade compatível com o consumo humano, enquanto a irrigação concentra retiradas em períodos de menor precipitação e maior necessidade das culturas. A dessedentação animal acompanha a distribuição territorial da pecuária, ao passo que a indústria depende de volumes regulares e características físico-químicas adequadas aos processos produtivos. A mineração utiliza água na extração e no beneficiamento, em contrapartida a geração hidrelétrica depende da manutenção de níveis e vazões capazes de sustentar a produção energética. A navegação, por sua vez, necessita de profundidade e continuidade do fluxo, a aquicultura depende da qualidade e da renovação da água, e a conservação ambiental exige vazões suficientes para manter habitats e processos ecológicos. No âmbito dessa análise, a diferença entre retirada e consumo torna-se decisiva para avaliar a pressão efetivamente exercida sobre cada região hidrográfica, pois nem toda água captada deixa de retornar ao sistema, embora o retorno possa ocorrer em outro local, momento ou condição de qualidade. Tucci afirma que “[...] os usos consuntivos referem-se aos usos que retiram a água de sua fonte natural, diminuindo suas disponibilidades espacial e temporalmente. Os não consuntivos referem-se aos usos que retornam à fonte de suprimento praticamente a totalidade da água utilizada” (2001, p. 735), distinção que exige considerar a parcela que permanece indisponível após o uso e os efeitos produzidos sobre os usuários situados a jusante. Na irrigação, grande parte da água captada evapora, é transpirada pelas plantas ou incorporada à produção agrícola, diferentemente no abastecimento urbano parte retorna aos corpos hídricos na forma de esgoto, frequentemente com qualidade inferior àquela observada no ponto de captação. Na geração hidrelétrica, o volume costuma retornar ao curso do rio, mas a operação dos reservatórios modifica o regime temporal das vazões e interfere nas condições de atendimento de outros usos. Sobre esse ponto, Tejada-Guibert, Setegn e Stoa registram que “[...] a retirada de água corresponde à água desviada ou captada de uma fonte superficial ou subterrânea. O uso consuntivo, por sua vez, retira permanentemente a água de sua fonte, porque ela evapora, é transpirada pelas plantas, incorporada aos produtos ou consumida por pessoas e animais” (2015, p. 208), tornando indispensável separar o volume captado daquele que efetivamente deixa de permanecer disponível na bacia. Os dados da ANA mostram que as retiradas e os consumos acompanham a localização das áreas irrigadas, das concentrações urbanas, dos polos industriais, dos

empreendimentos minerários e dos aproveitamentos hidrelétricos. Regiões com elevada vazão total podem apresentar pressão localizada em sub-bacias submetidas a grande concentração de usuários, em contraste, áreas com menor disponibilidade natural enfrentam comprometimento mais rápido quando a demanda cresce sem expansão correspondente da capacidade de regularização. No Nordeste, a irregularidade das chuvas e a dependência de reservatórios aumentam a sensibilidade das demandas consuntivas durante estiagens, ao contrário, na Amazônia a abundância regional pode coexistir com dificuldades locais de acesso e infraestrutura insuficiente. Mais do que isso, o crescimento da demanda reduz a diferença entre a vazão disponível e o volume comprometido pelas outorgas, tornando pequenas oscilações climáticas capazes de produzir restrições operacionais. À luz desse debate, a intensificação das demandas não se manifesta com a mesma força em todos os setores, e a parcela consuntiva associada à produção agrícola ocupa posição central na transformação da disponibilidade hídrica em pressão efetiva sobre rios, aquíferos e reservatórios.

Em meio a esse processo, a agricultura irrigada ocupa posição singular entre os diferentes usos da água porque concentra a maior parcela do consumo consuntivo e exerce influência direta sobre a dinâmica das retiradas realizadas nas bacias hidrográficas brasileiras. A expansão da produção agropecuária, a incorporação de novas áreas ao cultivo, a intensificação dos sistemas produtivos e a necessidade de ampliar a oferta de alimentos elevam continuamente a demanda por água em diferentes regiões do país. A irrigação reduz a dependência das oscilações naturais da precipitação, amplia a estabilidade das safras, favorece o aumento da produtividade e possibilita múltiplos ciclos produtivos ao longo do ano. Como consequência, o crescimento da atividade agrícola passa a depender cada vez mais da disponibilidade de recursos hídricos capazes de sustentar esse ritmo de expansão. Em uma observação mais detalhada, a ANA registra que “[...] a agricultura irrigada é o uso que mais demanda água, concentrando-se principalmente nos estados do Rio Grande do Sul, Minas Gerais e Bahia. A irrigação é o principal vetor de aumento da demanda até 2040” (2026, p. 23), dado que evidencia a permanência desse setor como principal responsável pela ampliação futura das retiradas e do consumo de água. Esse crescimento, entretanto, distribui-se de maneira desigual pelo território nacional; diversas áreas de forte expansão agrícola localizam-se em regiões sujeitas à elevada variabilidade climática ou marcadas por disponibilidade hídrica mais limitada, aumentando a dependência de reservatórios, aquíferos e sistemas de regularização das vazões. Em muitos empreendimentos, a produção intensiva exige fornecimento contínuo durante os períodos de menor precipitação, justamente quando os cursos d’água apresentam redução natural das vazões e outros usuários também ampliam suas necessidades de captação. Acrescente-se ainda que a pressão exercida pela irrigação não decorre exclusivamente do volume retirado, mas da parcela efetivamente consumida por evaporação, transpiração das culturas e incorporação da água à produção agrícola, reduzindo o montante que permanece disponível para outros usos na mesma bacia hidrográfica. A expansão da fronteira agrícola

sobre áreas de cerrado e de transição reforça esse cenário, pois diversas frentes produtivas avançam em espaços onde a oferta natural de água apresenta maior sensibilidade às oscilações climáticas. GWP afirma que "[...] a agricultura irrigada já responde por mais de 70% de todas as retiradas de água e por mais de 90% de todo o seu uso consuntivo. Mesmo com uma necessidade adicional estimada entre 15% e 20%, poderão surgir sérios conflitos entre a água destinada à irrigação e aquela requerida por outros usos humanos e pelos ecossistemas" (2000, p. 10), circunstância que amplia os desafios relacionados à distribuição equilibrada dos recursos hídricos. Ao mesmo tempo em que a irrigação fortalece a segurança alimentar, impulsiona economias regionais e amplia a capacidade produtiva do país, ela intensifica disputas pelo uso da água sempre que o crescimento das demandas supera a capacidade natural e operacional dos sistemas hídricos, sobretudo em períodos de estiagem prolongada, quando diferentes atividades econômicas e sociais passam a disputar simultaneamente volumes cada vez mais restritos.

Tucci afirma que "[...] o desenvolvimento urbano aumenta a demanda de água, produz grandes volumes de esgoto sanitário e pluvial, impermeabiliza o solo e ocupa áreas de risco, ampliando os impactos sobre os recursos hídricos e exigindo sistemas cada vez mais complexos de gerenciamento" (2008, p. 98), inserindo a urbanização como um processo que altera simultaneamente a quantidade demandada, a qualidade dos mananciais e o comportamento hidrológico das bacias. O crescimento das cidades amplia o consumo doméstico, concentra captações em sistemas de abastecimento de grande porte e eleva a geração de efluentes que, quando tratados de forma insuficiente, reduzem a parcela de água apta ao uso. Inclusive, a impermeabilização do solo modifica a relação entre precipitação, infiltração e escoamento superficial, diminuindo a recarga subterrânea e acelerando o transporte da água para galerias, canais e cursos d'água. Esse processo aumenta os picos de vazão durante chuvas intensas e reduz a permanência da água na bacia, produzindo uma combinação na qual inundações urbanas podem coexistir com restrições de abastecimento durante períodos secos. A ocupação de várzeas, encostas e margens fluviais acrescenta riscos ao sistema, pois expõe populações e infraestruturas a cheias, erosão e movimentos de massa, ao mesmo tempo que limita espaços naturais de armazenamento temporário e expansão dos rios. Por conta disso, a demanda urbana não pode ser analisada apenas pelo volume consumido nas residências, já que seu impacto envolve captação, tratamento, distribuição, drenagem, coleta de esgoto e controle da poluição em uma rede técnica que depende da disponibilidade e da regularidade dos mananciais. A industrialização amplia essa complexidade ao incorporar água em processos de resfriamento, lavagem, geração de vapor, transformação de matérias-primas e produção de bens, com exigências que variam conforme o setor e o nível de qualidade requerido. Em polos industriais concentrados, as retiradas podem alcançar grande intensidade em trechos específicos das bacias, em sentido oposto, o lançamento de efluentes altera as condições de uso para usuários situados a jusante. A mineração acrescenta demandas associadas à

extração, ao beneficiamento, ao transporte de polpas e ao controle de rejeitos, além de riscos de contaminação por metais, sedimentos e substâncias utilizadas nos processos produtivos. A esse respeito, o aumento populacional e a diversificação econômica fazem com que o mesmo corpo hídrico seja solicitado por usuários que dependem de volumes, padrões de qualidade e horários de operação diferentes, ampliando a possibilidade de incompatibilidades entre captação, lançamento e manutenção das funções ambientais. Gleick afirma que "[...] à medida que as demandas por água aumentam, cresce a competição entre agricultura, cidades, indústria e meio ambiente. A gestão dos recursos hídricos passa a exigir escolhas cada vez mais difíceis entre usuários concorrentes" (2011, p. 27), pois a disponibilidade deixa de ser suficiente para atender simultaneamente todas as solicitações quando as vazões diminuem, os reservatórios perdem volume ou a qualidade restringe determinados usos. Durante estiagens, o abastecimento humano tende a receber prioridade legal, mas essa decisão repercute sobre áreas irrigadas, empreendimentos industriais, geração hidrelétrica e vazões destinadas à conservação dos ecossistemas. Em situações como essa, os conflitos pelo uso da água surgem quando dois ou mais usuários dependem do mesmo recurso em quantidade, qualidade ou regime incompatíveis, exigindo mediação institucional, revisão de outorgas e definição de regras temporárias de alocação. O conflito pode ocorrer entre setores diferentes, entre municípios, entre usuários situados a montante e a jusante ou entre demandas humanas e necessidades ecológicas. Ainda assim, sua origem não se reduz à escassez absoluta, pois falhas de saneamento, perdas nas redes, lançamentos poluentes e ausência de coordenação também diminuem a capacidade de atendimento. No que se refere a esse problema, a gestão torna-se mais difícil porque as demandas urbanas e industriais apresentam baixa tolerância a interrupções, durante as atividades agrícolas e energéticas podem concentrar necessidades em períodos específicos do ano. A variabilidade climática amplia essa tensão ao reduzir a previsibilidade das vazões e encurtar o intervalo disponível para decisões operacionais. Sob esse olhar, o crescimento das cidades e a diversificação produtiva transformam a disputa pela água em um problema de quantidade, qualidade e regularidade, no qual a disponibilidade natural precisa ser ajustada às necessidades dos usuários por meio de sistemas capazes de armazenar volumes nos períodos de maior oferta e liberá-los quando as vazões naturais se tornam insuficientes.

> [...] uma abordagem holística: esse princípio recorda a necessidade de uma abordagem holística da gestão, reconhecendo todas as características do ciclo hidrológico e sua interação com outros recursos naturais e ecossistemas. A formulação também reconhece que a água é necessária para muitas finalidades, funções e serviços diferentes. A gestão holística deve, portanto, considerar as demandas impostas ao recurso e as ameaças que recaem sobre ele. O rendimento do recurso possui limites naturais: a noção de que a água doce é um recurso finito decorre do fato de que o ciclo hidrológico produz, em média, uma quantidade determinada de água por período, quantidade que não pode ser significativamente alterada pelas ações humanas. O recurso de água doce pode ser considerado um ativo de capital natural que precisa ser mantido para assegurar a continuidade dos serviços que proporciona. Efeitos das atividades humanas: os seres humanos podem afetar claramente a produtividade dos recursos hídricos. Eles podem reduzir a disponibilidade e a qualidade da água por meio de ações como a exploração de águas subterrâneas, a poluição das águas superficiais e subterrâneas e as

> mudanças no uso do solo, como florestamento, desmatamento e urbanização, que alteram os regimes de vazão dos sistemas de águas superficiais. Efeitos mais positivos podem, entretanto, resultar da regulação da variabilidade temporal e espacial natural das vazões. Quando a água é utilizada para finalidades não consuntivas e envolve fluxos de retorno, o reúso planejado pode aumentar os fluxos efetivos do recurso e a quantidade total de serviços proporcionados. Também é necessário reconhecer que o valor ou o bem-estar proveniente dos recursos hídricos varia conforme os usos aos quais esses recursos são destinados. Relações entre usuários de montante e jusante: os efeitos das atividades humanas tornam necessário reconhecer as relações entre os usuários situados a montante e a jusante. Os usuários de montante devem reconhecer as demandas legítimas dos usuários de jusante pelo compartilhamento dos recursos hídricos disponíveis e pela manutenção de suas condições de uso. O consumo excessivo ou a poluição da água pelos usuários de montante pode privar os usuários de jusante do uso legítimo do recurso compartilhado. Isso implica claramente a necessidade de diálogo ou de mecanismos de resolução de conflitos para conciliar as necessidades dos usuários de montante e de jusante. Uma abordagem institucional holística: a gestão holística não envolve apenas a administração dos sistemas naturais. Ela também exige a coordenação entre as diferentes atividades humanas que criam demandas por água, determinam os usos do solo e geram resíduos transportados pela água (Global Water Partnership, 2000, p. 14-15, tradução nossa).

Em torno dessa problemática, os conflitos entre abastecimento urbano, irrigação, indústria, mineração, geração de energia e conservação ambiental tornam a regularização das vazões uma função central da infraestrutura hídrica brasileira, sobretudo em bacias sujeitas a grande oscilação sazonal e interanual. Os reservatórios artificiais atuam sobre essa diferença entre oferta e demanda ao reter parte dos volumes afluentes durante períodos de maior disponibilidade e liberá-los quando as vazões naturais se mostram insuficientes para sustentar os usos existentes. Essa redistribuição temporal não cria água nova, mas modifica o momento em que ela permanece acessível, reduzindo a dependência imediata das chuvas e ampliando a confiabilidade do abastecimento em regiões marcadas por estiagens recorrentes. A propósito, a ANA pontua que "[...] o armazenamento estratégico de água por meio de reservatórios artificiais constitui uma das principais medidas estruturantes para a promoção da segurança hídrica no Brasil. Diante da variabilidade temporal das precipitações e dos recorrentes eventos críticos, a operação adequada dessas infraestruturas torna-se fundamental para garantir a regularização da oferta hídrica ao longo do tempo" (2026, p. 42), pois o desempenho dessas estruturas depende da capacidade física de acumulação e das regras que disciplinam enchimento, liberação, níveis mínimos e atendimento dos usuários. Em regiões semiáridas, onde muitos rios apresentam regime intermitente, os açudes e grandes reservatórios asseguram abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação durante intervalos prolongados sem precipitação significativa. Nas bacias densamente urbanizadas, a reservação sustenta sistemas integrados que atendem milhões de habitantes e atividades econômicas concentradas, ao mesmo passo em que precisa conservar volumes para enfrentar secas de duração incerta. Nos aproveitamentos hidrelétricos, o armazenamento regula a transformação da energia potencial da água em eletricidade, mas sua operação também interfere nas vazões liberadas a jusante, na navegação, nos ecossistemas aquáticos e no atendimento de captações localizadas em outros trechos do rio. A rigor, cada reservatório integra uma rede de relações territoriais que ultrapassa seus limites físicos, uma vez que decisões tomadas em determinado ponto da bacia

repercutem sobre municípios, empreendimentos produtivos, comunidades tradicionais e ambientes fluviais situados a grandes distâncias. Grigg registra que "[...] um reservatório amortiza uma vazão de cheia ou fornece água armazenada para atender às demandas a jusante. Seus usos incluem abastecimento municipal e industrial, irrigação, conservação da fauna e dos habitats, controle de cheias, navegação, geração hidrelétrica e melhoria da qualidade da água" (2016, p. 192), reunindo funções que nem sempre são plenamente compatíveis e que exigem decisões operacionais capazes de administrar prioridades concorrentes. O controle de cheias requer a manutenção de espaço vazio para receber volumes excepcionais, no curso do abastecimento e a geração hidrelétrica tendem a favorecer níveis mais elevados de armazenamento. A irrigação demanda liberações em épocas específicas, ao passo que a conservação dos ecossistemas depende da manutenção de vazões capazes de sustentar habitats e conexões entre o canal e as planícies de inundação. No fundo, a gestão de um reservatório de usos múltiplos envolve um processo permanente de alocação de riscos, pois aumentar a garantia para determinado setor pode reduzir a segurança oferecida aos demais. A ANA registra aproximadamente 240 mil massas d'água mapeadas no país e 3.661 reservatórios com capacidade conhecida, que somam cerca de 630,2 bilhões de metros cúbicos, volume no qual predomina amplamente a finalidade hidrelétrica. Essa concentração revela a estreita vinculação histórica entre a política de reservação e a expansão do sistema energético, embora muitos desses empreendimentos também atendam abastecimento, irrigação e controle de cheias. A esse propósito, o monitoramento contínuo dos níveis, das vazões afluentes, das defluências e dos volumes úteis fornece parâmetros para avaliar a capacidade de resposta dos sistemas diante de secas, cheias e alterações inesperadas na demanda. Ainda assim, a capacidade nominal não corresponde integralmente ao volume disponível para uso, pois parte do armazenamento constitui volume morto, parte precisa permanecer reservada por exigências operacionais e ambientais, e outra parcela é perdida por evaporação, assoreamento ou restrições de qualidade. Em regiões de elevada temperatura e grande superfície inundada, as perdas evaporativas podem representar volumes expressivos, reduzindo a eficiência da reservação durante os períodos de maior déficit. O assoreamento também diminui progressivamente o espaço útil, sobretudo em bacias submetidas à erosão intensa e ao transporte elevado de sedimentos. Considerando tudo isso, os reservatórios constituem o principal mecanismo de regularização hidrológica do país, mas sua capacidade de sustentar os usos múltiplos permanece condicionada ao comportamento das afluências, às perdas acumuladas e às decisões operacionais, fatores diretamente afetados pelas alterações climáticas que modificam a entrada e a permanência da água armazenada.

Em razão disso, a função reguladora dos reservatórios passa a depender diretamente do comportamento das entradas e saídas de água, uma vez que a capacidade física de armazenamento somente se converte em segurança hídrica quando as vazões afluentes conseguem recompor os volumes retirados, evaporados ou liberados para os diferentes usos. A redução das precipitações sobre

as áreas de drenagem diminui o escoamento gerado nas bacias, enfraquece a contribuição dos tributários e prolonga o tempo necessário para recuperar o volume útil após períodos de estiagem. Com isso em mente, chuvas abaixo da média não produzem apenas efeitos imediatos sobre os níveis dos rios, pois podem reduzir sucessivamente a umidade dos solos, a recarga subterrânea e a vazão de base que sustenta as afluências durante a estação seca. O reservatório passa, então, a receber volumes menores, ao mesmo tempo em que continua atendendo ao abastecimento humano, à irrigação, à geração hidrelétrica e às liberações destinadas aos usuários situados a jusante. A diminuição das entradas torna-se ainda mais crítica quando a sequência de anos secos impede a recomposição integral dos estoques entre um ciclo hidrológico e outro, transferindo déficits acumulados para os períodos seguintes. Em um exame mais atento, Linsley, Kohler e Paulhus afirmam que "[...] a vazão disponível corresponde ao escoamento que chega ao reservatório, corrigido pela precipitação sobre sua superfície, pelas perdas por evaporação e pela água reservada para outros usos. A capacidade do reservatório é determinada considerando precipitação, evaporação, afluência e demanda" (1958, p. 293), integrando em um mesmo cálculo as entradas naturais, as perdas atmosféricas, o armazenamento existente e os volumes comprometidos com os usuários. Essa relação mostra que o nível de um reservatório não resulta exclusivamente da quantidade de chuva incidente sobre sua superfície, já que a maior parcela do volume recebido provém do escoamento produzido em toda a bacia contribuinte. Uma precipitação localizada sobre o espelho d'água pode gerar acréscimo limitado, nesse período, chuvas distribuídas nas cabeceiras e tributários elevam as vazões afluentes e favorecem uma recuperação mais consistente. Apesar disso, o aumento da temperatura do ar intensifica a evaporação, sobretudo em reservatórios extensos e rasos, reduzindo continuamente o volume armazenado sem que essa perda seja percebida como retirada direta por um usuário. Em ambientes semiáridos, a combinação entre elevada radiação solar, baixa umidade relativa e ventos persistentes pode transformar a evaporação em uma das parcelas mais importantes do balanço operacional. Tucci registra que "[...] as saídas por evaporação preponderam sobre as descargas. A capacidade de 440 hm^3 estabelece um ponto limite, onde não se poderá suprir qualquer valor de demanda, já que a evaporação consumirá toda a água disponível no mês de agosto do último ano de análise" (2001, p. 714), expondo uma condição em que o aumento da capacidade nominal deixa de representar garantia adicional quando as perdas atmosféricas absorvem o volume acumulado. A bem da verdade, esse limite técnico mostra que a reservação precisa ser avaliada em função da eficiência do armazenamento, e não apenas pelo tamanho da barragem ou pelo volume máximo do reservatório. O comportamento observado no Sistema Interligado Nacional expressa essa dependência entre afluências, retiradas e condições climáticas, pois os reservatórios encerraram dezembro de 2024 com 53% do volume útil, abaixo dos 55% registrados no final de 2023. No Reservatório Equivalente do Nordeste, o volume total armazenado alcançou 53,2% em dezembro de 2024, resultado 11,9% superior ao observado no início do ano e correspondente ao maior nível

registrado desde 2017. Esses percentuais representam situações distintas, já que o armazenamento do SIN reúne reservatórios associados principalmente à geração hidrelétrica e distribuídos por diferentes regiões hidrográficas, nesse intervalo o Reservatório Equivalente do Nordeste sintetiza sistemas cuja função está fortemente ligada ao abastecimento, à irrigação e à convivência com longos períodos de escassez. A variação dos níveis não pode ser atribuída apenas ao comportamento climático, pois as demandas acumuladas, as regras de operação, as liberações obrigatórias e o volume comprometido por cada setor também influenciam a velocidade de direcionamento. Quando as afluências diminuem e as retiradas permanecem elevadas, a operação passa a consumir estoques formados em períodos anteriores, reduzindo a margem disponível para enfrentar uma estiagem mais prolongada. Em apoio a essa ideia, reservatórios com percentuais semelhantes podem apresentar condições de segurança diferentes conforme a duração esperada do período seco, a distribuição das demandas e a existência de fontes alternativas de abastecimento. Um sistema com 50% de armazenamento pode manter atendimento satisfatório quando recebe afluências regulares e possui consumo moderado, mas pode entrar rapidamente em condição crítica quando as entradas permanecem reduzidas e as demandas superam a reposição. Em um olhar inicial, os níveis armazenados funcionam como indicadores da situação presente, porém sua interpretação exige relacioná-los às tendências de precipitação, às previsões de vazão, às perdas por evaporação e ao ritmo de consumo. A operação dos reservatórios passa a depender, em razão disso, do balanço contínuo entre água que entra, volume que permanece armazenado e quantidade liberada para atender aos usos, relação que se torna progressivamente mais difícil de manter quando déficits pluviométricos prolongados coincidem com demandas elevadas e perdas atmosféricas crescentes.

Dentro dessa discussão, a segurança hídrica depende da relação continuamente estabelecida entre a disponibilidade produzida pelo ciclo hidrológico, o volume acumulado nos sistemas de armazenamento e as demandas que retiram ou condicionam o uso da água em cada bacia. O balanço hídrico expressa essa relação ao comparar as entradas, representadas pelas precipitações e vazões afluentes, com as saídas associadas à evaporação, às liberações operacionais, aos consumos e às demais perdas verificadas ao longo do sistema. Quando as entradas superam as saídas, os estoques podem ser recompostos e a capacidade de atendimento tende a aumentar, mas, quando o movimento inverso persiste, os reservatórios passam a consumir volumes formados anteriormente, reduzindo gradualmente a margem de segurança disponível para enfrentar novas estiagens. No decorrer desse processo, um único ano de precipitação abaixo da média pode ser parcialmente absorvido por sistemas que iniciam o período com armazenamento elevado, mas a repetição de déficits pluviométricos impede a recuperação dos estoques, diminui as vazões de base e transfere o comprometimento hídrico de um ciclo para outro. Tucci afirma que “[...] a bacia hidrográfica pode ser avaliada como um todo ou quanto a um sistema em particular, como um reservatório. No primeiro caso, é necessário conhecer a

disponibilidade dos recursos hídricos para atender às demandas existentes e conservar o meio ambiente" (2001, p. 279), vinculando a avaliação do sistema à capacidade de satisfazer os usos humanos sem eliminar os volumes necessários à manutenção dos processos ecológicos. Em um reservatório, essa avaliação exige considerar a vazão que efetivamente chega, a capacidade útil disponível, as perdas por evaporação, as regras de operação e o conjunto de retiradas que incidem sobre o volume armazenado. Em uma bacia, o cálculo adquire maior complexidade porque precisa incorporar captações superficiais e subterrâneas, retornos de efluentes, transferências entre sistemas, consumo das atividades produtivas e vazões destinadas à conservação ambiental. Tendo isso em vista, a oferta não pode ser representada apenas pela vazão média, pois a segurança dos usuários depende da água disponível nos períodos críticos, quando a precipitação diminui e a competição entre demandas se intensifica. A irrigação tende a concentrar consumo durante a estação seca, o abastecimento urbano exige continuidade diária, a indústria possui baixa tolerância a interrupções e a geração hidrelétrica depende de níveis mínimos para manter a operação, ao mesmo tempo os ecossistemas necessitam de vazões capazes de preservar habitats e funções fluviais. A ANA registra que "[...] o balanço hídrico quantitativo é um indicador do nível de comprometimento hídrico, obtido pela comparação entre a demanda e a oferta de água. As áreas críticas, com comprometimento acima de 100%, estão associadas, de modo geral, a polos de agricultura irrigada, com pressão crescente sobre os recursos hídricos disponíveis" (2026, p. 24), de modo que valores superiores a 100% expressam situações nas quais a demanda estimada ultrapassa a oferta adotada como referência, elevando a dependência de armazenamento, transferências, redução de consumos ou regras mais restritivas de alocação. Em casos como esse, a existência de um reservatório pode retardar a manifestação imediata da escassez, mas não elimina o desequilíbrio quando as retiradas permanecem superiores à reposição por sucessivos períodos. O sistema continua atendendo aos usuários por meio da redução do estoque acumulado, até que o volume útil atinja níveis incompatíveis com as garantias previstas, exigindo restrições, renegociação de outorgas ou alteração das prioridades operacionais. Além desse ponto, o comprometimento quantitativo pode ser agravado pela perda de qualidade, pois uma parcela do volume fisicamente presente deixa de atender a determinados usos ou exige tratamento mais complexo, ampliando os custos e reduzindo a flexibilidade da gestão. Em uma leitura cuidadosa, o desafio central não reside apenas na diminuição da água disponível, mas na dificuldade crescente de equilibrar usos que apresentam ritmos distintos, prioridades legais e impactos territoriais desiguais sobre um recurso limitado. A operação dos sistemas de armazenamento passa a envolver escolhas entre conservar volume para o futuro, atender demandas imediatas, liberar vazões a jusante e manter espaço para amortecer eventuais cheias, decisões que se tornam mais delicadas quando a variabilidade climática reduz a previsibilidade das afluências. Em função disso, o balanço hídrico deixa de ser apenas um procedimento contábil e passa a expressar o grau de pressão exercido sobre a capacidade natural e

artificial de fornecimento, revelando o ponto em que o crescimento das demandas, a redução das entradas e a perda progressiva dos estoques começam a comprometer a continuidade, a qualidade e a segurança do acesso à água.

> [...] a gestão integrada dos recursos hídricos nas bacias e em escalas superiores exige que o gestor conheça a condição dos recursos hídricos para identificar as parcelas de quantidade e qualidade que podem ser alocadas. Por exemplo, a produção de água e sua qualidade precisam ser conhecidas para que os recursos disponíveis sejam destinados aos diferentes usos, especialmente para atender às demandas urbanas, industriais e de irrigação. A determinação da condição da água é denominada avaliação dos recursos hídricos. O processo complementar de avaliação ambiental é necessário para verificar se os impactos sobre os sistemas naturais prejudicam sua capacidade de fornecer serviços ecológicos. A avaliação dos recursos hídricos mede a capacidade dos recursos disponíveis para atender às demandas econômicas, sociais e ambientais, utilizando indicadores relacionados à quantidade, à qualidade e ao meio ambiente. Tanto o lado da oferta quanto o da demanda estão envolvidos, e a determinação da adequação da oferta é necessária para fundamentar ações voltadas a estratégias de desenvolvimento sustentável [...] é preciso apresentar o equilíbrio entre o lado da oferta, que fornece quantidade, qualidade e recursos ambientais na forma de serviços ecossistêmicos, e o lado da demanda, formado pelas categorias econômicas, sociais e ambientais. A ausência de sistemas de dados e de programas de avaliação é problemática, porque o rápido crescimento populacional e as pressões relacionadas exigem conhecimento sobre os recursos hídricos disponíveis para sua alocação às necessidades urgentes. A necessidade de solucionar esse problema e fornecer o apoio necessário à gestão integrada dos recursos hídricos é amplamente reconhecida. Em escala nacional ou estadual, a avaliação dos recursos hídricos serve para orientar políticas e ações programáticas ou regulatórias. Na escala da bacia hidrográfica, a avaliação possui uma função gerencial mais imediata, que consiste em determinar as parcelas efetivas dos recursos que podem ser alocadas. O processo geral mede a condição da quantidade e da qualidade da água, bem como a capacidade dos ecossistemas de atender às finalidades dos usos hídricos. A condição indica a oferta, enquanto as finalidades indicam as demandas. Critérios relacionados à disponibilidade, à qualidade e à adequação atuam como indicadores capazes de fornecer parâmetros para apoiar o processo de avaliação. Para conhecer a adequação dos recursos hídricos aos usos pretendidos, é necessário conhecer as demandas correspondentes. O processo geral de avaliação da demanda compreende três categorias: uso da água como recurso, fornecimento de serviços relacionados à água e conservação dos recursos ou dos serviços ecossistêmicos. Diante das demandas por água, serviços e sustentabilidade ambiental, fica claro que a demanda total constitui um parâmetro multidimensional que exige uma abordagem equilibrada e escolhas fundamentadas em decisões sociais sobre os valores relativos atribuídos aos diferentes usos desses recursos. O desafio do processo de avaliação consiste em determinar se a oferta é adequada para atender à demanda. A ciência hidrológica explica a produção das bacias, cursos d'água, reservatórios e aquíferos, bem como se essa produção é suficiente para atender às demandas com base em uma avaliação da relação entre oferta e demanda. Tanto a demanda quanto a oferta são variáveis, e sua avaliação exige uma análise temporal da produção hídrica em comparação com as demandas. Essas avaliações requerem modelos capazes de considerar diversas categorias de demanda em diferentes momentos e locais, juntamente com entradas variáveis de recursos hídricos. A adequação da oferta é avaliada em diferentes escalas de bacia hidrográfica e conforme as unidades de governança. Em uma pequena bacia, as demandas podem envolver necessidades urbanas, irrigação e pesca. Em uma escala maior, cidades, indústrias, propriedades agrícolas e geradores hidrelétricos podem competir pela água. Em escala urbana regional, a competição pode ocorrer entre cidades e indústrias. No plano nacional, a avaliação constitui uma condição necessária à elaboração de planos capazes de identificar as diferenças entre a oferta e a demanda de recursos (Grigg, 2016, p. 339-342, tradução nossa).

À luz dessa discussão, a insegurança hídrica deixa de representar apenas a ocorrência pontual de escassez e passa a resultar da interação contínua entre disponibilidade variável, crescimento das demandas, conflitos entre usuários e dependência crescente de infraestruturas de armazenamento. A pressão hidrológica se forma quando as vazões naturais diminuem, os reservatórios perdem capacidade

de resposta e as retiradas permanecem elevadas, comprometendo a continuidade do abastecimento e reduzindo a margem disponível para enfrentar novos períodos críticos. O problema não se restringe à quantidade física de água existente, pois envolve também sua qualidade, localização, regularidade, acessibilidade econômica e capacidade institucional de distribuição entre setores com necessidades distintas. Em uma bacia submetida a estiagens prolongadas, a insuficiência das afluências pode ser agravada pela irrigação concentrada na estação seca, pelo consumo urbano contínuo, pelas exigências industriais e pela manutenção das vazões destinadas aos ecossistemas. Inclusive, a existência de grandes reservatórios não elimina essa condição quando as perdas por evaporação aumentam, os volumes úteis diminuem e as regras operacionais deixam de atender simultaneamente às demandas acumuladas. Barlow afirma que "[...] a crise da água não resulta da absoluta falta de água, mas da forma como a sociedade administra, distribui e protege esse recurso diante de demandas crescentes e ecossistemas cada vez mais pressionados" (2007, p. 18), vinculando a insegurança às escolhas institucionais que definem prioridades de uso, distribuição dos custos e proteção dos mananciais. A disponibilidade pode ser elevada em termos regionais e permanecer insuficiente para determinadas populações quando a infraestrutura de captação e distribuição é limitada, quando a qualidade impõe tratamento dispendioso ou quando os volumes estão comprometidos por outorgas e usos localizados a montante. Da mesma maneira, uma situação inicialmente administrável pode transformar-se em crise quando sucessivos déficits pluviométricos reduzem os estoques, junto com isso, as demandas mantêm trajetória de crescimento. Sob essa realidade, o conflito pelo uso da água expressa uma disputa entre necessidades legítimas que não encontram atendimento simultâneo dentro dos limites hidrológicos e operacionais do sistema. O abastecimento humano possui prioridade em situações de escassez, mas a redução das liberações para irrigação afeta a produção de alimentos, nesse meio-tempo, restrições à geração hidrelétrica repercutem sobre a segurança energética e a manutenção de vazões ambientais interfere diretamente na integridade dos ecossistemas. Não apenas isso, as decisões tomadas para enfrentar uma crise podem transferir riscos entre territórios, como ocorre quando transposições, novas captações ou alterações operacionais ampliam a oferta em uma região e reduzem a disponibilidade em outra. Beck registra que "[...] os riscos ambientais modernos distinguem-se por atravessarem fronteiras espaciais, temporais e sociais. Eles são produzidos pelo próprio processo de modernização e exigem novas formas de organização política e institucional para sua gestão" (1992, p. 21), incorporando à análise o fato de que os efeitos da pressão hídrica ultrapassam o ponto onde a retirada, a poluição ou a alteração do regime fluvial ocorrem. Uma captação intensiva pode reduzir vazões em municípios situados a jusante, a contaminação de um aquífero pode persistir por longos períodos e a operação de um reservatório pode modificar habitats, atividades econômicas e formas de ocupação em diferentes partes da bacia. Em torno desse debate, a insegurança hídrica apresenta caráter cumulativo, pois pequenas perdas de qualidade, sucessivas reduções de vazão, aumento gradual das retiradas e

deterioração da infraestrutura podem permanecer separadamente administráveis, mas produzir elevada vulnerabilidade quando passam a atuar em conjunto. A capacidade institucional também interfere nesse processo, uma vez que falhas no monitoramento, cadastros incompletos de usuários, baixa fiscalização e ausência de coordenação entre órgãos dificultam decisões compatíveis com a disponibilidade efetiva. Em uma observação mais detalhada, a pressão transforma-se em insegurança quando o sistema deixa de garantir acesso regular à água em quantidade e qualidade adequadas, sem comprometer os usuários futuros e as funções ecológicas que sustentam a renovação do recurso. Essa condição não decorre exclusivamente do clima, da infraestrutura ou da demanda, mas da forma como esses elementos se combinam em cada território, distribuindo benefícios, restrições e riscos de maneira desigual entre populações, atividades econômicas e ecossistemas. A insegurança hídrica passa, então, a ser examinada como fenômeno sistêmico no qual processos naturais, estruturas de armazenamento, padrões de uso e decisões de gestão operam de forma interdependente, criando diferentes graus de exposição e capacidade de resposta diante da escassez, da poluição e dos eventos hidrológicos extremos.

Biswas e Tortajada afirmam que "[...] muitos fatores contribuem para definir a segurança hídrica, entre eles o crescimento populacional, a urbanização, o clima, o uso do solo e as capacidades institucionais e de governança. A segurança hídrica é, em última análise, o resultado líquido dessas questões interativas, inter-relacionadas e, muitas vezes, conflitantes" (2022, p. 5), inserindo a insegurança hídrica em uma rede de relações que ultrapassa a ocorrência isolada de secas ou a insuficiência momentânea das vazões, pois a escassez física constitui apenas uma de suas manifestações. Um território pode possuir rios, aquíferos e reservatórios expressivos e, ainda assim, manter populações submetidas a interrupções no abastecimento, água de baixa qualidade, custos elevados de tratamento ou desigualdade de acesso. Logo, precisamos considerar a forma como os processos naturais se articulam às estruturas técnicas e às decisões institucionais que organizam a captação, o armazenamento, a distribuição e a proteção dos recursos hídricos. A disponibilidade natural define os volumes inicialmente produzidos pelo ciclo hidrológico, mas sua conversão em oferta segura depende da regularidade das precipitações, da manutenção das vazões de base, da conservação das áreas de recarga e da capacidade de reservar água para os períodos de menor afluência. A variabilidade climática interfere nessa base ao modificar a frequência das chuvas, prolongar estiagens, concentrar precipitações intensas e ampliar perdas por evaporação, reduzindo a previsibilidade dos sistemas responsáveis pelo atendimento dos usos humanos e ambientais. O crescimento das demandas atua sobre esse quadro ao elevar as retiradas para irrigação, abastecimento urbano, indústria, mineração e geração de energia, aproximando os volumes comprometidos dos limites efetivamente disponíveis nas bacias. Quanto a isso, a qualidade da água também define a parcela que pode ser utilizada, uma vez que a contaminação por esgotos, efluentes industriais, sedimentos e substâncias provenientes das

atividades agropecuárias transforma volumes fisicamente existentes em recursos inadequados ou economicamente difíceis de aproveitar. A infraestrutura hídrica procura reduzir essas limitações por meio de reservatórios, adutoras, estações de tratamento, sistemas de transferência e redes de distribuição, mas seu desempenho permanece condicionado às afluências, à manutenção das estruturas, às perdas operacionais e às regras estabelecidas para atender usuários concorrentes. A segurança hídrica apresentada pela ANA abrange a capacidade de garantir água em quantidade e qualidade adequadas para o bem-estar da população, o desenvolvimento das atividades econômicas e a preservação dos ecossistemas, associada à redução dos riscos produzidos por secas, inundações e contaminação. Essa definição afasta interpretações limitadas ao aumento da oferta, pois ampliar barragens ou captações não resolve situações marcadas por desperdício, poluição, baixa eficiência produtiva, exclusão territorial ou instituições incapazes de coordenar as decisões. Sob esse aspecto particular, a capacidade institucional determina como informações hidrológicas são transformadas em outorgas, regras de operação, prioridades de atendimento, fiscalização e estratégias de adaptação diante das mudanças climáticas. Ostrom registra que "[...] quando os recursos de uso comum são maiores, os sistemas robustos tendem a apresentar atividades de governança organizadas em múltiplas camadas. As regras adequadas para distribuir água entre os principais ramais de um sistema de irrigação podem não ser apropriadas para distribuí-la entre agricultores de um único canal" (2005, p. 270), mostrando que a gestão precisa articular escalas e regras compatíveis com as particularidades de cada território, sem supor que uma decisão centralizada seja suficiente para resolver conflitos locais ou que soluções locais possam substituir a coordenação necessária em grandes bacias. Em apoio a essa ideia, a governança hídrica envolve a atuação conjunta da União, dos estados, dos municípios, dos comitês de bacia, dos usuários e das organizações sociais, cujas competências se distribuem conforme o domínio das águas e a escala dos problemas enfrentados. Uma decisão sobre a operação de um reservatório pode exigir coordenação nacional, nesse período, a distribuição de água em um sistema comunitário depende de regras próximas dos usuários, fiscalização cotidiana e acordos adaptados às condições locais. Para além disso, os efeitos da insegurança hídrica não se distribuem de modo uniforme, pois populações com menor renda, comunidades rurais dispersas e grupos dependentes diretamente dos recursos naturais possuem menor capacidade de absorver aumentos de tarifas, interrupções de fornecimento ou perdas produtivas. A mesma redução de vazão pode produzir consequências moderadas em um sistema diversificado e consequências severas onde inexistem fontes alternativas, armazenamento suficiente ou instituições capazes de responder rapidamente. Refletindo sobre esse ponto, a insegurança hídrica assume caráter sistêmico porque cada componente altera o desempenho dos demais, já que a redução das chuvas pressiona os reservatórios, o crescimento do consumo acelera sua depleção, a poluição restringe a oferta utilizável e falhas de coordenação ampliam conflitos que poderiam ser reduzidos por planejamento antecipado. A gestão desse fenômeno requer arranjos de

governança capazes de integrar dados científicos, infraestrutura, regulação dos usos e participação social, respeitando as diferentes escalas em que a água circula, é apropriada e produz impactos sobre o território.

Simultaneamente, a governança dos recursos hídricos assume papel decisivo diante de um cenário no qual a disponibilidade natural se torna menos previsível, as demandas aumentam, os conflitos entre usuários se intensificam e a operação das infraestruturas passa a exigir decisões coordenadas em diferentes escalas territoriais. A gestão das águas no Brasil avançou de um modelo predominantemente centralizado e setorial, voltado à execução de obras e ao aproveitamento econômico dos rios, para uma orientação integrada, descentralizada e participativa, estruturada pela Lei nº 9.433, de 1997. Esse marco instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, reconheceu a água como bem de domínio público, dotado de valor econômico, e estabeleceu a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento e intervenção. De acordo com essa realidade, a gestão deixa de seguir exclusivamente os limites administrativos de municípios e estados, pois os fluxos hídricos atravessam fronteiras políticas e conectam usuários situados a montante e a jusante, submetendo diferentes territórios às consequências das mesmas captações, descargas, barramentos e alterações no uso do solo. O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos organiza essa arquitetura institucional ao articular órgãos federais e estaduais, conselhos, comitês de bacia, agências de água e entidades responsáveis pela aplicação dos instrumentos de gestão. Os Conselhos Nacional e Estaduais de Recursos Hídricos exercem funções normativas, deliberativas e de coordenação, definindo diretrizes, mediando questões entre escalas administrativas e orientando políticas que precisam responder simultaneamente à segurança do abastecimento, ao desenvolvimento econômico e à conservação dos ecossistemas. Os Comitês de Bacia, formados por representantes do poder público, dos usuários e da sociedade civil, constituem espaços de negociação em que conflitos relacionados à quantidade, à qualidade e ao regime de uso podem ser debatidos segundo as particularidades hidrológicas e socioeconômicas de cada território. Val-Segura e Arriaga-Medina afirmam que “[...] o desenvolvimento e a gestão da água devem fundamentar-se em uma abordagem participativa, envolvendo usuários, planejadores e formuladores de políticas em todos os níveis. Isso exige descentralização e uma sociedade mais informada, envolvida com a transparência e a prestação de contas” (2015, p. 92), atribuindo à participação uma função operacional na definição de prioridades, na fiscalização das decisões e na construção de acordos capazes de distribuir restrições e benefícios entre grupos afetados pelas mesmas escolhas. A descentralização, nesse caso, não representa simples transferência de responsabilidades, pois depende de acesso às informações, capacidade técnica, recursos financeiros e procedimentos que assegurem representação equilibrada entre usuários com diferentes níveis de poder econômico e político. Sem essas condições, instâncias formalmente participativas podem reproduzir desigualdades, privilegiar setores com maior capacidade de

organização e limitar a presença de comunidades rurais, populações tradicionais e usuários difusos. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico ocupa posição central nesse arranjo ao implementar a política em águas de domínio da União, regular usos, apoiar o monitoramento hidrológico, organizar o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos e oferecer suporte técnico à gestão das bacias compartilhadas por mais de um estado. Por sua vez, os órgãos gestores estaduais desempenham atribuições equivalentes nos rios sob seus respectivos domínios, administrando outorgas, redes de acompanhamento e procedimentos de fiscalização ajustados às realidades regionais. A articulação entre essas instituições torna-se indispensável em bacias interestaduais, sistemas de reservatórios interligados e transferências de água, onde decisões isoladas podem produzir efeitos sobre territórios sujeitos a regras administrativas distintas. Mohajeri et al. registram que "[...] a implementação da gestão integrada requer um ambiente institucional favorável, estruturas de governança, instrumentos adequados de gestão da água e infraestrutura ajustada aos objetivos definidos. Também reconhece a bacia hidrográfica como escala apropriada para a governança e exige a participação das partes interessadas" (2016, p. 611), vinculando a efetividade institucional à compatibilidade entre regras, instrumentos, capacidades operacionais e condições físicas existentes, sem a qual os objetivos formulados permanecem dissociados da prática cotidiana. A gestão integrada exige que decisões sobre abastecimento, irrigação, energia, saneamento, uso do solo e conservação ambiental sejam analisadas em conjunto, já que cada política setorial interfere nas entradas, saídas e condições de circulação da água dentro da bacia. Em um sistema marcado por secas prolongadas, por exemplo, a operação de reservatórios precisa dialogar com outorgas concedidas, projeções de demanda, vazões ecológicas, níveis de armazenamento e prioridades legais, evitando que compromissos assumidos em períodos de abundância permaneçam inalterados quando a oferta se contrai. Mesmo assim, a governança brasileira enfrenta diferenças expressivas de capacidade entre bacias, estados e instituições, refletidas na atualização desigual dos planos, na fragilidade de alguns comitês, na insuficiência de recursos para fiscalização e na dificuldade de transformar deliberações em medidas executáveis. A fragmentação entre setores também reduz a eficácia das respostas, sobretudo quando políticas agrícolas, energéticas, urbanas e ambientais adotam metas incompatíveis com a disponibilidade efetiva. Indo além, as mudanças climáticas exigem decisões adaptativas, capazes de incorporar informações atualizadas e rever regras diante de afluências diferentes daquelas previstas pelas séries históricas. A governança passa a depender, não por acaso, de mecanismos institucionais flexíveis, transparentes e tecnicamente fundamentados, nos quais participação, coordenação federativa e responsabilização sustentem a aplicação dos planos, das outorgas, do enquadramento, da cobrança, dos sistemas de informação e do monitoramento como instrumentos articulados de redução das vulnerabilidades hídricas.

> [...] a análise da gestão de bacias hidrográficas revela que a governança constitui, por sua própria natureza, um processo político relacionado ao acesso e à alocação de um recurso

> disputado e escasso. O processo político pode ser responsável pela produção social da escassez, pela manutenção das práticas habituais e pela exclusão. Poucos avanços na governança da água são possíveis sem o reequilíbrio do poder de decisão e o fortalecimento da comunidade em sentido amplo. Por essa razão, a participação na gestão integrada dos recursos hídricos, assim como na conservação comunitária, pode ser compreendida como uma governança que começa de baixo para cima e envolve redes e conexões entre diferentes níveis de organização. As conexões entre redes e níveis organizacionais constituem uma base importante, mas não são suficientes para explicar como a participação funciona como mecanismo efetivo de realização dos objetivos da gestão integrada. O desafio consiste em aprofundar essa base e desenvolver uma compreensão mais precisa da integração entre usuários e instituições, de modo que seja possível diagnosticar as falhas da governança hídrica a partir de seus sintomas. Para isso, é necessário compreender o significado da participação e da gestão integrada para os usuários locais dos recursos. Os estudos sobre a relação entre água e energia oferecem um meio para ultrapassar as formulações gerais sobre a integração entre recursos, setores e instituições e alcançar uma estrutura multidimensional capaz de apoiar a análise organizada da governança da água. A relação entre energia e água constitui uma variante da gestão integrada dos recursos hídricos, pois considera esses recursos inseparavelmente conectados, uma vez que o fornecimento de energia utiliza água, enquanto o fornecimento de água requer energia. À medida que esse conceito passou de uma ferramenta operacional destinada à otimização do uso dos recursos para um paradigma de gestão conjunta e de formulação de políticas, verificou-se que as relações entre políticas, decisões e instituições desempenham papel importante na efetividade da gestão e da governança integradas da água e da energia. Embora essa relação envolva a integração entre recursos, a formulação de políticas e decisões com efeitos sobre a segurança econômica e ambiental exige a coordenação de arranjos institucionais organizados em múltiplos níveis. Na gestão articulada da água e da energia, as instituições situadas nas escalas horizontal e vertical precisam estar suficientemente conectadas para coordenar uma governança sincronizada, aproximando as políticas de gestão da água das políticas energéticas. A governança sincronizada depende de instituições organizadas em múltiplos níveis e da capacidade dessas instituições de administrar e responder aos ambientes, impactos e usuários locais, conciliando as diferentes escalas espaciais. Em um sistema institucional organizado em múltiplos níveis, os usuários dos recursos encontram-se sob a jurisdição de autoridades locais, regionais, estaduais e federais. Embora um indivíduo possa administrar responsavelmente determinado recurso, a governança normalmente é exercida por instituições inseridas em uma estrutura composta por leis, políticas e organizações. Os usuários, contudo, vivenciam a escassez, a falta de acesso e práticas que influenciam a demanda. Quando essas experiências passam a constituir um padrão entre diversos usuários, formam uma resposta que precisa ser transmitida verticalmente e registrada nos níveis institucionais superiores para provocar uma reação adaptativa, representada por mudanças na governança, na gestão ou nas políticas. A resposta adaptativa de uma autoridade local, regional ou federal é transmitida novamente aos usuários por meio dos diferentes níveis institucionais, com o objetivo de corrigir ou reduzir as experiências de escassez ou de utilização inadequada, completando o ciclo de retroalimentação. A participação na gestão integrada dos recursos hídricos envolve a coordenação entre instituições organizadas em diferentes níveis e a maneira como o envolvimento das partes interessadas possibilita o surgimento, a elaboração e a implementação de ações adaptativas destinadas a preservar a segurança dos recursos essenciais e promover o bem-estar das comunidades humanas (Lee; Herwehe; Scott, 2015, p. 367-368, tradução nossa).

Em verdade, a governança dos recursos hídricos somente produz efeitos concretos quando dispõe de instrumentos capazes de transformar diretrizes institucionais em decisões aplicáveis às condições hidrológicas, sociais e econômicas de cada bacia. Os planos de recursos hídricos cumprem essa função ao estabelecer diagnósticos, prioridades, programas e metas de curto, médio e longo prazo, relacionando disponibilidade, demandas atuais, projeções de crescimento, qualidade dos mananciais e riscos associados a secas, cheias e contaminação. Sua eficácia depende da atualização periódica das informações, pois um planejamento elaborado com base em séries históricas desatualizadas pode manter critérios incompatíveis com mudanças nas vazões, na ocupação do solo e no perfil dos usuários.

O enquadramento dos corpos d'água acrescenta a dimensão qualitativa ao definir classes e metas de qualidade associadas aos usos pretendidos, orientando ações de saneamento, controle de efluentes, recuperação ambiental e fiscalização. A outorga organiza o acesso quantitativo ao estabelecer condições, limites e prazos para captações, lançamentos, derivações e intervenções que alteram o regime dos cursos d'água, buscando evitar que a soma dos direitos concedidos ultrapasse a oferta efetivamente disponível nos períodos críticos. Em casos de escassez prolongada, esse instrumento também oferece base jurídica e técnica para revisar volumes, restringir retiradas e aplicar regras temporárias de alocação. A cobrança pelo uso da água introduz um sinal econômico destinado a reconhecer seu valor público, estimular maior eficiência e gerar recursos para ações previstas nos planos de bacia, sem substituir a obrigação estatal de garantir o acesso necessário à vida e ao atendimento das necessidades básicas. Borchardt pontua que "[...] a gestão integrada dos recursos hídricos depende da combinação entre monitoramento, sistemas de informação, planejamento e instrumentos regulatórios capazes de apoiar decisões adaptativas em diferentes escalas de gestão" (2016, p. 18), articulando esses mecanismos como partes de um mesmo processo no qual nenhum instrumento, isoladamente, consegue responder à complexidade da insegurança hídrica. O planejamento necessita de dados para definir metas realistas, a outorga depende de estimativas confiáveis de disponibilidade, o enquadramento exige informações sobre a qualidade dos corpos hídricos e a cobrança requer cadastros consistentes de usuários, volumes captados e condições de lançamento. Sob esse aspecto particular, o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos ocupa posição estratégica ao reunir séries de precipitação, níveis, vazões, qualidade da água, usos, outorgas, reservatórios e demais registros produzidos pelas redes federais e estaduais. A estrutura nacional de monitoramento, formada por mais de 23 mil estações sob responsabilidade de diferentes entidades, fornece a base observacional necessária para acompanhar respostas das bacias, detectar tendências e avaliar se os critérios adotados permanecem compatíveis com o comportamento real dos sistemas. As estações automáticas reduzem o intervalo entre a ocorrência de alterações hidrológicas e sua incorporação às decisões operacionais, com isso acontecendo, as séries convencionais preservam a continuidade histórica indispensável à avaliação de secas, cheias e mudanças graduais. Nesse horizonte, o monitoramento de águas subterrâneas e de qualidade amplia esse diagnóstico, evitando que a gestão permaneça restrita aos volumes superficiais ou desconsidere processos de contaminação capazes de reduzir a oferta utilizável. Em uma leitura cuidadosa, a produção de dados não se resume ao armazenamento de números, pois exige validação, padronização, interpretação e comunicação em linguagem acessível aos órgãos gestores, comitês, usuários e populações expostas aos riscos. Leff registra que "[...] o planejamento ambiental exige a construção de sistemas de conhecimento capazes de integrar informação científica, gestão dos recursos naturais e processos de tomada de decisão, articulando racionalidade ecológica e racionalidade social" (2006, p. 412), exigência que vincula a

consistência técnica das informações às condições sociais em que as decisões serão implementadas, negociadas e fiscalizadas. Um plano pode apresentar elevada precisão hidrológica e permanecer ineficaz quando desconsidera desigualdades territoriais, limitações institucionais ou formas locais de dependência da água. Do mesmo modo, uma outorga formalmente regular pode ampliar vulnerabilidades quando se apoia em dados incompletos, ignora captações não cadastradas ou deixa de incorporar vazões necessárias à conservação dos ecossistemas. Em reforço a esse argumento, a complementaridade entre os instrumentos permite identificar divergências entre o planejamento e a realidade operacional, pois o monitoramento verifica se as metas de enquadramento estão sendo alcançadas, os sistemas de informação revelam a concentração das demandas e a fiscalização confronta volumes autorizados com retiradas efetivamente realizadas. A coordenação entre União e estados adquire especial relevância nas bacias compartilhadas, onde águas de diferentes domínios integram o mesmo sistema físico e exigem critérios compatíveis para que decisões administrativas não fragmentem o funcionamento hidrológico. Diante desse contexto, a incorporação de cenários climáticos passa a exigir instrumentos mais flexíveis, capazes de rever disponibilidades de referência, atualizar regras operacionais e ajustar prioridades quando as afluências se afastam dos padrões utilizados no planejamento. Logo, planos estáticos, outorgas dissociadas do monitoramento e sistemas de informação incompletos reduzem a capacidade de antecipar crises, à medida que instrumentos articulados favorecem decisões graduais antes que déficits de precipitação, queda dos reservatórios ou deterioração da qualidade produzam interrupções generalizadas. O fortalecimento do planejamento hídrico depende, não por acaso, da integração contínua entre informação científica, regulação, capacidade institucional e participação dos usuários, permitindo que medidas de adaptação sejam incorporadas às decisões antes que as mudanças climáticas ultrapassem a capacidade ordinária de resposta das bacias.

À primeira vista, a incorporação das mudanças climáticas ao planejamento hídrico poderia parecer uma simples atualização das projeções de precipitação e vazão, mas a adaptação exige modificar os critérios utilizados para dimensionar infraestruturas, conceder outorgas, operar reservatórios e definir prioridades de atendimento em condições que já não reproduzem com regularidade o comportamento histórico das bacias. As séries observadas permanecem indispensáveis, porém deixam de constituir referência suficiente quando o aumento da temperatura altera a evapotranspiração, prolonga períodos secos, concentra precipitações intensas e modifica a frequência dos extremos hidrológicos. Sob esse olhar, cenários climáticos devem ser incorporados aos planos de recursos hídricos como faixas possíveis de comportamento futuro, permitindo avaliar como diferentes trajetórias de aquecimento podem afetar vazões mínimas, recarga subterrânea, níveis de armazenamento e demandas associadas à irrigação, ao abastecimento urbano e à geração de energia. A adaptação não se limita à preparação para um único cenário, pois precisa preservar alternativas

operacionais diante de resultados incertos, evitando que decisões de grande duração fiquem vinculadas a uma hipótese climática rígida. Tejada-Guibert, Setegn e Stoa afirmam que "[...] a adaptação às mudanças e à variabilidade climáticas é considerada um elemento central para que a gestão integrada dos recursos hídricos seja verdadeiramente efetiva e sustentável. A natureza adaptativa da gestão integrada constitui uma plataforma adequada para incorporar a adaptação climática" (2015, p. 203), colocando a revisão contínua das decisões no centro de uma gestão que precisa responder a novas informações sem aguardar a manifestação completa das crises. O monitoramento hidrológico assume, nesse arranjo, função permanente, pois permite confrontar cenários projetados com o comportamento efetivamente registrado nas bacias, corrigindo previsões e antecipando mudanças nas condições de oferta. Dito isso, redes mais densas, séries consistentes e transmissão automática de dados ampliam a capacidade de identificar redução de afluências, queda acelerada dos reservatórios, rebaixamento dos aquíferos e deterioração da qualidade antes que esses processos produzam interrupções severas. Sob essa realidade, fortalecer a infraestrutura hídrica significa aumentar sua capacidade de operar sob maior variabilidade, o que envolve manutenção preventiva, redução de perdas, modernização de equipamentos, interligação de sistemas e adoção de regras operacionais capazes de ajustar liberações conforme a evolução das disponibilidades. A ampliação da capacidade de armazenamento pode oferecer maior proteção diante de estiagens prolongadas, mas precisa considerar perdas por evaporação, assoreamento, custos ambientais e a possibilidade de que vazões afluentes futuras sejam inferiores às utilizadas no projeto. Barragens adicionais, isoladamente, não asseguram adaptação quando as bacias contribuintes estão degradadas ou quando o crescimento das retiradas absorve rapidamente o volume acumulado. No que diz respeito a esse aspecto, aumentar a eficiência no uso da água reduz a pressão sobre os estoques existentes e cria margens operacionais para períodos críticos. Nessa direção, sistemas de irrigação mais eficientes, redução de vazamentos urbanos, reúso industrial, aproveitamento de águas pluviais e processos produtivos menos intensivos diminuem a quantidade necessária para manter os mesmos serviços, embora seus resultados dependam de regulação capaz de impedir que os volumes economizados sejam imediatamente convertidos em novas expansões de consumo. A proteção dos mananciais acrescenta uma dimensão preventiva, pois conservar áreas de nascente, controlar fontes de poluição e restringir ocupações incompatíveis reduz custos de tratamento e preserva a parcela da oferta que permanece adequada aos usos. A recuperação das bacias hidrográficas também interfere na resposta aos extremos ao favorecer infiltração, reduzir erosão e limitar o transporte de sedimentos que diminui a capacidade útil dos reservatórios. A ANA assinala que "[...] o futuro da gestão da água no Brasil demandará o fortalecimento da governança descentralizada, a modernização do planejamento, a ampliação da infraestrutura hídrica, a conservação dos ecossistemas aquáticos e a adoção de soluções baseadas na natureza, com foco na redução de vulnerabilidades, na promoção da resiliência e na gestão de riscos" (2026, p. 55), reunindo medidas

estruturais, institucionais e ambientais que precisam atuar de forma coordenada, porque a eficiência de cada uma depende do estado dos demais componentes do sistema. Diante dessa situação, soluções baseadas na natureza, como restauração de matas ciliares, conservação de áreas úmidas e proteção de zonas de recarga, não substituem adutoras, estações de tratamento ou reservatórios, mas reduzem a pressão sobre essas estruturas ao preservar processos naturais de armazenamento, depuração e regulação das vazões. A propósito, a adaptação também exige protocolos para escassez, critérios graduais de restrição e mecanismos transparentes de alocação, evitando decisões improvisadas quando os níveis de armazenamento já atingiram faixas críticas. A revisão de outorgas precisa acompanhar mudanças na disponibilidade, conforme os planos de contingência devem definir responsabilidades, prioridades e formas de comunicação com os usuários. Em uma observação mais detalhada, a capacidade adaptativa varia entre territórios, pois municípios e comunidades com infraestrutura precária, dependência de uma única fonte e baixa capacidade técnica enfrentam maior dificuldade para absorver alterações hidrológicas. Medidas nacionais precisam ser ajustadas às condições locais, já que intervenções adequadas às bacias úmidas do Sul e do Sudeste podem apresentar baixa eficiência em sistemas intermitentes do Semiárido ou em comunidades amazônicas dependentes da navegação fluvial. A adaptação dos sistemas hídricos resulta, tendo isso em vista, da combinação entre antecipação, flexibilidade operacional, eficiência, conservação ambiental e coordenação institucional, formando uma capacidade de resposta que não elimina os eventos adversos, mas reduz a possibilidade de que eles provoquem perda prolongada das funções essenciais de abastecimento, produção e manutenção dos ecossistemas.

Junte-se a isso o fato de que a capacidade adaptativa dos sistemas hídricos não depende exclusivamente da ampliação de reservatórios, adutoras, canais e estações de tratamento, pois a permanência de seus benefícios está condicionada à conservação dos processos naturais que regulam a infiltração, a recarga subterrânea, o escoamento superficial e a qualidade da água em toda a bacia hidrográfica. A infraestrutura construída amplia a capacidade de armazenar, transferir e distribuir volumes entre períodos e territórios distintos, mas não consegue compensar indefinidamente a degradação das áreas responsáveis pela formação das vazões e pela redução natural de sedimentos e contaminantes. Quando a vegetação é removida, o solo perde capacidade de infiltração, o escoamento superficial se acelera e parcelas maiores da precipitação alcançam rapidamente os canais, aumentando picos de cheia sem assegurar a reposição gradual dos aquíferos e das vazões de base. Em um exame mais atento, a resiliência hídrica corresponde à capacidade de manter funções essenciais diante de secas, inundações, contaminação ou oscilações acentuadas das vazões, absorvendo impactos sem produzir colapso prolongado no abastecimento, na produção e no funcionamento dos ecossistemas. Saha e Setegn afirmam que “[...] a abordagem eco-hidrológica utiliza as funções dos ecossistemas presentes na bacia para manter os padrões naturais de vazão, a disponibilidade de água ao longo do

ano, a proteção contra inundações e a qualidade da água. Os ecossistemas conferem resiliência à bacia diante de anos de chuvas extremas ou reduzidas" (2015, p. 124), pois a regulação exercida pela cobertura vegetal, pelos solos e pelas zonas de armazenamento natural reduz a velocidade com que a água abandona a paisagem durante eventos intensos e sustenta sua liberação gradual nos períodos de menor precipitação. As áreas de recarga exercem papel decisivo nesse processo ao possibilitar a passagem da água para os aquíferos, mantendo reservas subterrâneas que alimentam nascentes e cursos fluviais durante as estiagens. Sua impermeabilização por expansão urbana, compactação agrícola ou ocupação inadequada reduz a renovação desses estoques e amplia a dependência de captações superficiais e reservatórios artificiais. As nascentes, por seu turno, também dependem da integridade das zonas onde a precipitação se infiltra, pois sua proteção não se limita ao ponto de afloramento, alcançando o conjunto de solos, vertentes e coberturas vegetais que sustentam o fluxo subterrâneo. As matas ciliares atuam na estabilização das margens, na retenção de sedimentos e na filtragem de poluentes transportados pelo escoamento, reduzindo processos de assoreamento que diminuem progressivamente o volume útil dos reservatórios. A retirada dessa vegetação aumenta a entrada de materiais nos canais, altera a temperatura da água e compromete habitats aquáticos, impondo custos adicionais ao tratamento e à manutenção das infraestruturas. Acerca dessa questão, Grigg registra que "[...] as áreas úmidas protegem os suprimentos subterrâneos, purificam as águas superficiais por filtração e processos naturais, controlam a erosão e proporcionam armazenamento e amortecimento para o controle de inundações" (2016, p. 194), reunindo funções que complementam barragens e obras de drenagem ao conservar volumes temporariamente, reduzir a intensidade das cheias e melhorar a qualidade da água antes que ela alcance rios, lagos e aquíferos. A drenagem ou ocupação dessas áreas elimina espaços naturais de expansão dos fluxos e transfere para as estruturas artificiais volumes que antes eram retidos e liberados de maneira gradual. Em função disso, soluções baseadas na natureza não constituem medidas periféricas, mas componentes técnicos do planejamento hídrico, capazes de reduzir perdas, controlar sedimentos e ampliar a estabilidade do abastecimento. A restauração ambiental precisa ser definida segundo as características de cada bacia, priorizando trechos com elevada produção de sedimentos, zonas estratégicas de recarga, nascentes degradadas e corredores fluviais submetidos à ocupação intensa. A integração entre infraestrutura e natureza também exige que projetos de reservatórios, canais e sistemas urbanos considerem os efeitos acumulados sobre a conectividade dos rios, a circulação de sedimentos e a manutenção das vazões ecológicas. Uma barragem pode elevar a garantia de abastecimento e, ao mesmo tempo, alterar regimes fundamentais à reprodução de espécies e à sustentação de comunidades dependentes da dinâmica fluvial, exigindo regras de operação capazes de conciliar armazenamento e integridade ambiental. Vendo por esse ângulo, a gestão integrada da bacia articula engenharia, hidrologia, ecologia, planejamento territorial e participação social para impedir que intervenções destinadas a ampliar a oferta provoquem novas

fontes de vulnerabilidade. A resiliência dos sistemas hídricos nasce dessa complementaridade, na qual reservatórios e redes de distribuição mantêm maior eficiência quando as bacias contribuintes preservam sua capacidade de infiltrar, armazenar, filtrar e liberar água ao longo do tempo, tornando a integração científica indispensável para avaliar as relações entre clima, território, ecossistemas e infraestrutura.

> [...] a figura 10.1 ilustra alguns dos principais benefícios dos serviços ecossistêmicos, juntamente com as etapas normalmente necessárias para incorporar uma abordagem eco-hidrológica à gestão integrada dos recursos hídricos. A primeira etapa para integrar uma abordagem eco-hidrológica à gestão dos recursos hídricos em escala de bacia consiste em identificar os ecossistemas e, posteriormente, pesquisar suas características, seus processos e os serviços que fornecem. Em sua análise dos processos eco-hidrológicos nos estuários, Wolanski et al. enfatizam a necessidade de uma abordagem que abranja toda a bacia para a gestão estuarina e costeira. Os autores defendem a ampliação da visão da gestão da água para unificar abordagens restritas adotadas por diferentes setores, como a gestão florestal e hídrica, o abastecimento urbano ou o controle da poluição industrial. Como etapa anterior à elaboração dos planos de gestão, destacam a necessidade de compreender as relações entre as comunidades dos ecossistemas e os fluxos hidrológicos, de sedimentos e de nutrientes. Essa compreensão é posteriormente utilizada para desenvolver medidas de recuperação fundamentadas cientificamente, em escala de bacia, destinadas à manutenção dos ecossistemas. A segunda etapa envolve a análise das formas de incorporar os serviços ecossistêmicos ao planejamento e às políticas locais e regionais de gestão dos recursos hídricos. Entre as abordagens encontram-se a proteção das florestas primárias existentes, o manejo das florestas secundárias e das plantações para reduzir operações geradoras de sedimentos, a manutenção das matas ciliares ao longo de todas as margens dos cursos d'água, a proteção das áreas úmidas e a restauração de áreas úmidas, canais fluviais e florestas. A gestão integrada dos recursos hídricos envolve necessariamente coordenação e cooperação entre todas as partes interessadas. Por essa razão, é necessário que os diferentes setores compartilhem uma compreensão comum acerca da disponibilidade e dos usos da água. Por fim, a natureza mutável do ambiente e das demandas humanas por água exige o monitoramento e a avaliação contínuos dos serviços ecossistêmicos, da saúde dos ecossistemas e dos resultados dos esforços de gestão, permitindo adaptar e ajustar as estratégias e os planos de gestão integrada dos recursos hídricos (Saha; Setegn, 2015, p. 165, tradução nossa)

Sob essa realidade, a insegurança hídrica brasileira decorre da sobreposição entre condições naturais desiguais, alterações no funcionamento hidrológico, pressões econômicas crescentes e capacidades institucionais diferenciadas para administrar riscos que não se distribuem de maneira uniforme pelo território. A elevada disponibilidade nacional não elimina a vulnerabilidade, pois grande parte das vazões superficiais concentra-se na Região Hidrográfica Amazônica, em paralelo, centros urbanos, áreas irrigadas, polos industriais e sistemas energéticos intensamente dependentes de água ocupam bacias submetidas a menor oferta relativa, maior sazonalidade ou elevado comprometimento quantitativo. A distribuição espacial da água estabelece, o que evidencia que, uma base hidrológica desigual sobre a qual incidem mudanças nos padrões de precipitação, elevação das temperaturas, aumento da evapotranspiração e maior irregularidade das vazões. Lorz et al. afirmam que "[...] compreender as complexas interações entre água, clima, uso do solo e sociedade constitui uma etapa fundamental para alcançar um abastecimento hídrico sustentável, com elevados padrões de qualidade e confiabilidade" (2016, p. 542), relação que exige considerar como a conversão de vegetação, a

impermeabilização urbana, a expansão agropecuária e a degradação das áreas de recarga modificam a infiltração, o escoamento, a produção de sedimentos e a qualidade dos mananciais, alterando a quantidade de água que efetivamente chega aos rios, aquíferos e reservatórios. As mudanças climáticas aprofundam esse quadro porque afetam tanto as entradas quanto as perdas do balanço hídrico, reduzindo a capacidade de reposição dos estoques durante sequências secas e aumentando a intensidade dos eventos que excedem a capacidade de drenagem e controle. A predominância de condições mais secas em grande parte do país entre 2015 e 2024, associada à ocorrência de cheias severas em determinadas regiões, mostra que a insegurança não se manifesta por uma única tendência, mas pela alternância entre déficits prolongados e excedentes concentrados que dificultam a operação regular dos sistemas. Logo, a crescente pressão sobre os reservatórios surge justamente dessa combinação, pois essas estruturas precisam compensar vazões naturais menos previsíveis, por outro lado, permanecem responsáveis pelo abastecimento, pela irrigação, pela geração hidrelétrica e pela manutenção de liberações destinadas aos usuários e aos ecossistemas situados a jusante. Quando as precipitações diminuem, as afluências deixam de recompor os volumes consumidos, ao passo que temperaturas mais elevadas aumentam as perdas por evaporação e reduzem a eficiência do armazenamento, acelerando o rebaixamento dos níveis úteis. O crescimento da demanda intensifica essa depleção, sobretudo em áreas onde a agricultura irrigada concentra grande parte do consumo consuntivo e expande suas captações durante os meses de menor disponibilidade natural. A urbanização, a indústria e a mineração acrescentam retiradas contínuas, exigências específicas de qualidade e lançamentos que podem restringir o aproveitamento posterior da água, já a geração de energia depende de regras operacionais nem sempre compatíveis com as necessidades dos demais setores. A vulnerabilidade, nesse contexto, não permanece fixa, como registram Hill e Cutter ao afirmarem que “[...] a vulnerabilidade varia conforme o lugar e ao longo do tempo, possuindo dimensões espaciais e temporais. Ela pode ser examinada da escala comunitária à global, comparada entre diferentes lugares e analisada do passado ao presente e do presente ao futuro” (2002, p. 14), variação que faz com que um mesmo déficit de precipitação produza consequências distintas conforme o volume previamente armazenado, a diversificação das fontes, a qualidade dos mananciais, a eficiência da infraestrutura e a capacidade de resposta das instituições. Municípios abastecidos por sistemas interligados podem absorver restrições que levariam localidades dependentes de uma única captação ao racionamento, em contrapartida, produtores com acesso a reservatórios privados ou poços profundos apresentam condições diferentes daquelas enfrentadas por comunidades rurais submetidas a fontes sazonais. A governança interfere diretamente nessas diferenças ao definir como planos, outorgas, regras de operação, fiscalização e mecanismos de participação distribuem a água e os riscos entre os usuários. Instituições dotadas de monitoramento contínuo, informações atualizadas e protocolos graduais de contingência podem revisar retiradas antes que o armazenamento alcance níveis

críticos, diferentemente, decisões tardias ampliam custos sociais, perdas produtivas e conflitos. Diante disso, as mudanças climáticas agravam a insegurança hídrica ao modificar precipitações, vazões e perdas atmosféricas; junto com isso, a pressão crescente sobre os reservatórios reduz a margem disponível para compensar tais alterações e atender simultaneamente demandas que continuam em expansão. A abundância hídrica nacional convive, levando isso em consideração, com inseguranças regionais e locais produzidas pela distância entre oferta natural e demanda, pela deterioração da qualidade, pela dependência de infraestruturas vulneráveis às afluências e pela capacidade desigual de gestão. A insegurança hídrica brasileira configura-se como resultado contínuo das relações entre clima, ciclo hidrológico, usos do solo, padrões de consumo, armazenamento, conservação ambiental e governança, mantendo o acesso à água condicionado à maneira pela qual esses componentes são integrados nas diferentes regiões hidrográficas do país.

4 CONCLUSÃO

A pesquisa demonstrou que a insegurança hídrica brasileira não decorre da inexistência generalizada de água, mas da distribuição profundamente desigual dos recursos hídricos, da variabilidade temporal das precipitações e da distância entre as áreas de maior disponibilidade e aquelas onde se concentram população, infraestrutura e atividades econômicas. A elevada vazão superficial nacional, fortemente concentrada na Região Hidrográfica Amazônica, convive com bacias submetidas a menor oferta relativa, estiagens recorrentes e elevado comprometimento quantitativo. Essa configuração territorial impede que a abundância agregada seja tomada como sinônimo de atendimento regular das necessidades humanas e produtivas. A vazão média revela o potencial hídrico de longo prazo, ao passo que indicadores associados às vazões de estiagem mostram as limitações enfrentadas nos períodos críticos, justamente quando se ampliam as disputas entre os usuários. A disponibilidade efetiva também depende da qualidade dos mananciais, da existência de sistemas de captação e distribuição e da capacidade de armazenar água para os meses de menor afluência. Regiões dotadas de grande volume natural podem apresentar insegurança local por ausência de infraestrutura, contaminação ou dificuldade de acesso, em oposição a isso, áreas relativamente secas podem reduzir parte de sua vulnerabilidade por meio de reservação, planejamento e gestão adequada. O primeiro achado central consiste, portanto, na constatação de que a insegurança hídrica se forma pela relação entre água existente, localização, regularidade, qualidade e possibilidade concreta de utilização, e não apenas pelo volume total contabilizado no território nacional.

Ao analisar mais cuidadosamente o funcionamento hidrológico, destacou-se que as mudanças climáticas interferem diretamente nos processos responsáveis pela formação e renovação da disponibilidade de água. O aumento das temperaturas intensifica a evapotranspiração e as perdas por evaporação, ao mesmo passo que alterações na circulação atmosférica modificam a distribuição das

chuvas e tornam menos previsíveis os períodos úmidos e secos. A predominância de precipitações e vazões abaixo das médias históricas em parte expressiva do território, entre 2015 e 2024, revela um quadro marcado pela persistência de condições mais secas, sem eliminar a ocorrência de cheias severas e precipitações concentradas. A combinação entre secas prolongadas e eventos extremos reduz a regularidade necessária ao abastecimento, à irrigação, à produção energética e à manutenção dos ecossistemas. Chuvas intensas em intervalos curtos não compensam automaticamente déficits acumulados, pois grande parcela da água pode escoar rapidamente, produzir inundações e transportar sedimentos, sem gerar infiltração e recarga suficientes. A redução prolongada da precipitação diminui a umidade dos solos, enfraquece a contribuição subterrânea para os rios e limita a recuperação dos estoques superficiais entre um ciclo hidrológico e outro. As mudanças climáticas agravam a insegurança hídrica ao alterar simultaneamente o volume, o momento e a forma pela qual a água se torna disponível, ampliando a incerteza sobre as vazões futuras e diminuindo a confiabilidade dos parâmetros históricos empregados no planejamento.

Em modo de pensar interdisciplinar, os achados também mostraram que a alteração da oferta ocorre paralelamente ao crescimento contínuo das demandas hídricas. A agricultura irrigada ocupa a posição mais expressiva entre os usos consuntivos, pois grande parte da água captada deixa de retornar imediatamente aos mananciais em razão da evaporação, da transpiração das culturas e de sua incorporação à produção. A expansão de áreas irrigadas, a intensificação das safras e a necessidade de ampliar a produção de alimentos elevam as retiradas justamente em períodos nos quais as vazões naturais costumam diminuir. Essa sobreposição entre maior consumo e menor disponibilidade aumenta o comprometimento das bacias e pode produzir conflitos com o abastecimento humano, a indústria, a geração de energia e as necessidades ambientais. A urbanização acrescenta demanda contínua, amplia a produção de esgotos e transforma o comportamento hidrológico por meio da impermeabilização do solo, enquanto a industrialização e a mineração exigem volumes regulares e padrões específicos de qualidade. Os usos não consuntivos também interferem na alocação, uma vez que a geração hidrelétrica, a navegação e a conservação ecológica dependem da permanência de determinadas vazões no sistema. O crescimento dos diferentes setores reduz a margem entre oferta disponível e volumes comprometidos pelas outorgas, tornando oscilações antes absorvíveis capazes de provocar restrições. O agravamento da insegurança hídrica ocorre, nesse sentido, porque a pressão humana avança sobre sistemas cuja reposição se torna mais instável, aproximando a demanda dos limites físicos e operacionais das bacias.

Em articulação com esses elementos, os reservatórios foram identificados como estruturas essenciais para compensar a variabilidade das vazões, mas também como pontos sensíveis do sistema hídrico brasileiro. Sua função consiste em armazenar parte da água recebida nos períodos de maior afluência e liberá-la durante estiagens, assegurando abastecimento, irrigação, geração hidrelétrica e

manutenção de usos situados a jusante. Essa capacidade de regularização aumenta a confiabilidade da oferta, porém depende de entradas suficientes para recompor os volumes retirados e perdidos. A redução das precipitações sobre as bacias contribuintes diminui as vazões afluentes, em outra situação, o aumento da temperatura eleva as perdas evaporativas, sobretudo em reservatórios extensos e rasos. A continuidade das retiradas durante sequências de anos secos transfere déficits de um período para outro e reduz progressivamente o volume útil disponível. Os níveis registrados no Sistema Interligado Nacional e no Reservatório Equivalente do Nordeste representam, por essa razão, mais do que percentuais de armazenamento, pois expressam o resultado acumulado das afluências, das liberações operacionais, das demandas e das perdas atmosféricas. A capacidade nominal também sofre limitações provocadas pelo assoreamento, pelo volume morto e por restrições de qualidade. A crescente pressão sobre os reservatórios agrava a insegurança hídrica porque diminui sua função de proteção contra futuras estiagens, transformando estoques anteriormente destinados à regularização em volumes consumidos para manter demandas imediatas. Quanto menor a margem armazenada, maior a exposição do sistema a novos déficits de precipitação e mais difíceis se tornam as escolhas entre usuários concorrentes.

Desse modo, a pesquisa revelou que infraestrutura e disponibilidade natural não produzem segurança de maneira automática quando os instrumentos de gestão são frágeis, desarticulados ou baseados em informações insuficientes. A governança hídrica exerce influência direta sobre a distribuição dos riscos, pois define prioridades, concede outorgas, estabelece regras de operação, organiza o monitoramento e media conflitos entre setores e territórios. A Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos instituíram uma arquitetura descentralizada e participativa, articulando a ANA, órgãos estaduais, conselhos e comitês de bacia. Entretanto, sua efetividade depende da capacidade técnica das instituições, da atualização dos planos e da integração entre os diferentes domínios das águas. Planos de recursos hídricos, enquadramento, outorga, cobrança, sistemas de informação e redes de monitoramento precisam operar de maneira complementar, evitando que direitos de uso sejam concedidos acima da disponibilidade observada nos períodos críticos. O SNIRH e as redes hidrometeorológicas fornecem informações indispensáveis para acompanhar chuvas, vazões, reservatórios, águas subterrâneas e qualidade, mas os dados somente reduzem vulnerabilidades quando são convertidos em decisões antecipadas. A gestão tardia, iniciada quando os estoques já atingiram níveis críticos, aumenta o custo social das restrições e reduz as alternativas disponíveis. A governança pode atenuar ou ampliar os efeitos das mudanças climáticas, conforme sua capacidade de antecipar cenários, rever regras, fiscalizar usos e distribuir de maneira transparente as limitações impostas pela escassez.

Sob enfoque analítico integrado, a pesquisa permite afirmar que as mudanças climáticas e a crescente pressão sobre os reservatórios agravam a insegurança hídrica brasileira por mecanismos

interdependentes. As alterações climáticas reduzem a previsibilidade das precipitações, modificam as vazões, ampliam a evaporação e aumentam a frequência de extremos, enfraquecendo a reposição natural dos sistemas. Simultaneamente, a expansão das demandas acelera o consumo dos volumes armazenados, reduz a margem destinada a enfrentar estiagens futuras e intensifica os conflitos entre abastecimento, agricultura, indústria, energia e conservação ambiental. A pressão deixa de ser apenas hidrológica quando envolve qualidade degradada, acesso desigual, infraestrutura insuficiente e instituições com capacidades distintas de resposta. A adaptação exige incorporar cenários climáticos ao planejamento, aumentar a eficiência do uso, reduzir perdas, proteger mananciais e revisar critérios de alocação conforme o comportamento efetivo das bacias. A resiliência também depende da integração entre infraestrutura construída e processos naturais, porque áreas de recarga, nascentes, matas ciliares e áreas úmidas sustentam a infiltração, reduzem sedimentos e contribuem para a regularização das vazões. Reservatórios e adutoras preservam maior eficiência quando suas bacias contribuintes mantêm capacidade de armazenar, filtrar e liberar água ao longo do tempo. A insegurança hídrica brasileira resulta, desse modo, da combinação entre desigualdade espacial, instabilidade climática, pressão crescente sobre os estoques e capacidade variável de governança, tornando sua redução dependente de ações coordenadas que articulem ciência, conservação ambiental, infraestrutura, regulação e participação social.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2025**. Brasília: ANA, 2025.

BARLOW, M. **Blue Covenant: The Global Water Crisis and the Coming Battle for the Right to Water**. New York: The New Press, 2007.

BECK, U. **Risk Society: Towards a New Modernity**. London: Sage Publications, 1992.

BISWAS, A. K.; TORTAJADA, C. **Changing Global Water Management: Educational Challenges**. London: Routledge, 2009.

BISWAS, A. K.; TORTAJADA, C. **Water Security, Climate Change and Sustainable Development**. Singapore: Springer, 2016.

BISWAS, A. K.; TORTAJADA, C. **Water Security and the Sustainable Development Goals**. Singapore: Springer, 2022.

BORCHARDT, D.; BOGARDI, J. J.; IBISCH, R. B. (eds.). **Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

BURTON, I.; KATES, R. W.; WHITE, G. F. **The Environment as Hazard**. 2. ed. New York: Guilford Press, 1993.

CUTTER, S. L. **American Hazardscapes: The Regionalization of Hazards and Disasters**. Washington, DC: Joseph Henry Press, 2001.

DOS SANTOS, A. N. S. et al. Territórios dos ventos – geopolítica, impactos ambientais e desafios da energia eólica no Brasil. **ARACÊ** , *[S. l.]*, v. 7, n. 6, p. 29407–29458, 2025. DOI: 10.56238/arev7n6-024. Disponível em: https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/5619. Acesso em: 06 jul. 2026.

FAUSTO, J. P., PEREIRA, K. R. de O., GLAVAM, R. B., DRUZIAN, M. E. B. et al. Tecnologia material regenerativa: biodegradabilidade, análise do ciclo de vida e integração de biofibras em compósitos sustentáveis para aplicações avançadas em engenharia. **Revista DCS,** 23(91), e5858. Disponível em: https://doi.org/10.54899/dcs.v23i91.5858 Acesso em 01 jul. 2026.

FAUSTO, J. P., PEREIRA, K. R. de O., PONTES, M. V. A., da SILVA, R. C. et al. "Mapa do caminho": a construção de roteiros políticos para a transição energética e a justiça climática no contexto contemporâneo. **Revista De Geopolítica,** 17(5), e2459. Disponível em: https://doi.org/10.56238/revgeov17n5-099 Acesso em 01 jul. 2026.

FAUSTO, J. P., PESSOA, A. C. N., PONTES, M. V. A., SILVA, R. C. da. et al. Planejamento urbano e segurança hídrica: gestão integrada do uso do solo, da drenagem e do saneamento na proteção dos recursos hídricos nas cidades. **Veredas Do Direito,** 23(6), e235790. Disponível em: https://doi.org/10.18623/rvd.v23.5790 Acesso em 01 jul. 2026.

FAUSTO, J. P., PONTES, M. V. A., SILVA, R. C. da, DORNELAS, C. S. M. et al. Meio ambiente e clima: impactos da poluição, do desmatamento e do uso intensivo de agroquímicos nos processos de degradação ambiental e assoreamento dos ecossistemas brasileiros. **Veredas Do Direito,** 23(5), e235636. Disponível em https://doi.org/10.18623/rvd.v23.5636 Acesso em 01 jul. 2026.

FALKENMARK, M.; LINDH, G. **Water for a Starving World**. London: Routledge, 2019.

FLANNERY, T. **The Weather Makers: The History and Future Impact of Climate Change**. New York: Grove Press, 2010.

FELIPPE, J. N. de O., SILVA, R. C. da, DORNELAS, C. S. M. et al. Agroflorestas urbanas como rewilding social – Restaurar cadeias ecológicas, reduzir ilhas de calor urbano, ampliar a biodiversidade e promover saúde em cidades sustentáveis. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA,** 23(11), e12155. Disponível em: https://doi.org/10.55905/oelv23n11-04 Acesso em 01 jul. 2026.

FELIPPE, J. N. de O., PEREIRA, K. R. de O., FLUMINHAN, A. et al. Colheita em risco – os impactos das mudanças climáticas na produção de frutas, legumes e verduras no Brasil. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA,** 23(7), e10514. Disponível em: https://doi.org/10.55905/oelv23n7-001 Acesso em 01 jul. 2026.

FLICK, U. **Introdução à pesquisa qualitativa**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

GIDDENS, A. **A política da mudança climática**. Rio de Janeiro: Zahar, 2010.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GLEICK, P. H. **The World's Water: The Biennial Report on Freshwater Resources**. Washington, DC: Island Press, 2011.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP). **Integrated Water Resources Management**. Stockholm: Global Water Partnership, 2000.

GRIGG, N. S. **Water Resources Management: Principles, Regulations and Cases**. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

LEAL, R. S., SANTOS, R. R. dos, SANTOS, P. A. do. et al. Agronegócio e financeirização da terra: expansão das fronteiras agrícolas, concentração fundiária e intensificação dos conflitos territoriais no campo. **Veredas Do Direito,** 23(8), e236568. Disponível em: https://doi.org/10.18623/rvd.v23.6568 Acesso em 01 jul. 2026.

LEFF, E. **La geopolítica de la biodiversidad y el desarrollo sustentable**. México: Siglo XXI Editores, 1998.

LEFF, E. **Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade e poder**. Petrópolis: Vozes, 2001.

LEFF, E. **Ecologia, capital e cultura: a territorialização da racionalidade ambiental**. Petrópolis: Vozes, 2006.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Hydrology for Engineers**. New York: McGraw-Hill, 1958.

MINAYO, M. C. S. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 10. ed. São Paulo: Hucitec, 2007.

MOLDEN, D. (ed.). **Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**. London: Earthscan; Colombo: International Water Management Institute, 2007.

OSTROM, E. **Understanding Institutional Diversity**. Princeton: Princeton University Press, 2005.

OSTROM, E. **Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action**. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

PEREIRA, F. B. et al. Inteligência artificial no campo: inovação e limites da agricultura digital com uso de modelos de aprendizado profundo na detecção precoce de pragas em lavouras de grãos. **ARACÊ**, *[S. l.]*, v. 8, n. 6, 2026. DOI: 10.56238/arev8n6-110. Disponível em: https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/13590. Acesso em: 01 jul. 2026.

POSTEL, S. **The Last Oasis: Facing Water Scarcity**. New York: W. W. Norton & Company, 2013.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

SACHS, I. **Rumo à ecossocioeconomia: teoria e prática do desenvolvimento**. São Paulo: Cortez, 2007.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

SANTOS, C. A. G. dos, MARCHESINI, R., MIRANDA, R. O. et al. Espaço urbano, distribuição de infraestrutura e riscos: análise da ocupação em encostas instáveis, margens de rios poluídos e áreas ambientalmente vulneráveis no contexto da urbanização desigual. **Veredas Do Direito,** 23(10), e237305. Disponível em: https://doi.org/10.18623/rvd.v23.7305 Acesso em 12 jul. 2026.

SANTOS, C. A. G. dos., PONTES, M. V. A., SILVA, R. C. da, SILVA, V. F. da. et al. Reflorestamento e sustentabilidade: territórios agroecológicos comunitários como práticas de resistência, justiça ambiental e regeneração socioecossistêmica. **Veredas Do Direito,** 23, e235146. Disponível em: https://doi.org/10.18623/rvd.v23.5146 Acesso em 12 jul. 2026.

SANTOS, C. A. G. dos, MARCHESINI, R., SILVA, R. C. da. et al. Agroecologia urbana e sustentabilidade – soberania alimentar e justiça ambiental no brasil contemporâneo: desafios e potencialidades. **Revista DCS,** 23(86), e4388. Disponível em: https://doi.org/10.54899/dcs.v23i86.4388 Acesso em 10 jul. 2026.

SANTOS, A. N. S. dos, FELIPPE, J. N. de O., PEREIRA, K. R. de O. et al. Gestão integrada de riscos em engenharia: aplicação de tecnologias inovadoras para promover qualidade de vida, segurança e sustentabilidade. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA,** 23(6), e10196. Disponível em: https://doi.org/10.55905/oelv23n6-034 Acesso em 10 jul. 2026.

SANTOS, A. N. S. dos, FELIPPE, J. N. de O., SILVA, K. L. et al. Transição energética e preservação: integração de fontes renováveis, biodiversidade e economia verde em tempos de crise climática. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA,** 23(3), e9234. Disponível em: https://doi.org/10.55905/oelv23n3-041 Acesso em 10 jul. 2026.

SANTOS, M. **Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal**. Rio de Janeiro: Record, 2001.

SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 4. ed. São Paulo: EdUSP, 2006.

SETEGN, S. G.; DONOSO, M. C. (eds.). **Sustainability of Integrated Water Resources Management: Water Governance, Climate and Ecohydrology**. Cham: Springer, 2015.

STAKE, R. E. **Pesquisa qualitativa: estudando como as coisas funcionam**. Porto Alegre: Penso, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2001.

TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (org.). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2003.

VEIGA, J. E. **Para entender o desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Editora 34, 2015.

VEIGA, J. E. **O antropoceno e a ciência do sistema Terra**. São Paulo: Editora 34, 2019.

WEBER, M. **Metodologia das ciências sociais**. São Paulo: Cortez, 1949.

WHITE, G. F. **Human Adjustment to Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States**. Chicago: University of Chicago Press, 1942.

WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters**. 2. ed. London: Routledge, 2004.