



**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS**

FÁBIO MIRANDA GOMES XAVIER

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA DINÂMICA E MANUTENÇÃO DO
SERVIÇO ECOSISTÊMICO DE REGULAÇÃO HÍDRICA NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU, RIO DE JANEIRO, RJ**

Niterói-RJ
2020

FÁBIO MIRANDA GOMES XAVIER

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA DINÂMICA E MANUTENÇÃO DO
SERVIÇO ECOSISTÊMICO DE REGULAÇÃO HÍDRICA NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU, RIO DE JANEIRO, RJ**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Biosistemas da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Biosistemas. Área de concentração Recursos Naturais e Ambiente. Linha de Pesquisa: Sistemas Naturais.

Orientadora: Dra. Rachel Bardy Prado (Embrapa Solos)
Coorientadora: Dra. Elaine Cristina Cardoso Fidalgo (Embrapa Solos)

Niterói, RJ
2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

X3m Xavier, FÁBIO MIRANDA GOMES
METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA DINÂMICA E MANUTENÇÃO DO SERVIÇO
ECOSSISTÊMICO DE REGULAÇÃO HÍDRICA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO
RIO GUANDU, RIO DE JANEIRO, RJ / FÁBIO MIRANDA GOMES Xavier ;
Rachel Bardy Prado, orientadora ; Elaine Cristina Cardoso
Fidalgo, coorientadora. Niterói, 2020.
72 f.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PGEB.2020.m.13788871741>

1. Serviços Ambientais. 2. Segurança Hidrica. 3. Unidades
hidrológica de Planejamento. 4. Serviços Ecosistêmicos
Hídricos. 5. Produção intelectual. I. Prado, Rachel Bardy,
orientadora. II. Fidalgo, Elaine Cristina Cardoso,
coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. IV. Título.

CDD -


FÁBIO MIRANDA GOMES XAVIER

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA DINÂMICA E MANUTENÇÃO DO
SERVIÇO ECOSISTÊMICO DE REGULAÇÃO HÍDRICA NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU, RIO DE JANEIRO, RJ**

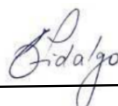
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Biosistemas da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Biosistemas. Área de concentração Recursos Naturais e Ambiente. Linha de Pesquisa: Sistemas Naturais.

Aprovada em 30 de junho de 2020.

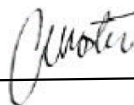
BANCA EXAMINADORA



Prof^a. Dra. Rachel Bady Prado - Orientadora
Embrapa Solos



Dra. Elaine Cristina Cardoso Fidalgo - Coorientadora
Embrapa Solos



Prof^a. Dra. Claudia Moster
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ



Prof^a. Dra. Dirlane de Fátima do Carmo
Universidade Federal Fluminense – UFF

Niterói, RJ
2020

Dedico esta dissertação a todas as instituições de ensino e pesquisa brasileiras, resilientes frente às ameaças sofridas nesses tempos estranhos. O conhecimento e a educação são as chaves para esse país se tornar uma grande nação.

AGRADECIMENTOS

À minha amada companheira Priscila, por compartilhar comigo as dores e recompensas dessa caminhada. Você tornou tudo isso bem mais fácil. Te amo.

Aos meus pais, Jayro e Telma, por toda uma vida de dedicação. Só espero conseguir retribuir à altura.

Ao meu sobrinho João Vicente, que chega a esse mundo no momento em que eu encerro esse ciclo. Que seja uma passagem leve para ambos.

Às minhas orientadoras, Rachel e Elaine, pelo permanente apoio e dedicação ao trabalho. Vocês são profissionais exemplares e muito bem representam o trabalho de excelência realizado pela Embrapa Solos.

Aos demais membros da banca, Dirlane do Carmo e Cláudia Moster, pela disponibilidade em tempos de pandemia e interesse em contribuir para este trabalho.

À Universidade Federal Fluminense, instituição que fez parte de toda a minha vida, como filho de professor e estudante de graduação e mestrado.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, onde me formei engenheiro florestal e me tornei uma pessoa melhor. Sou grato pela oportunidade que tive e feliz por tê-la abraçado.

“A água é tal qual a terra por onde ela atravessa.”

- Teofrasto (372 a.C. - 287 a.C)

RESUMO

O aumento da demanda pelo uso da água, impulsionado por fatores ambientais, sociais e econômicos, bem como a degradação dos ecossistemas terrestres e aquáticos ameaçam a segurança hídrica de populações de todos os continentes e apontam para a necessidade premente de uma melhor gestão dos recursos hídricos. No Brasil, se somam a essas demandas os níveis indesejáveis de saneamento básico, refletindo diretamente na qualidade e disponibilidade da água para os diferentes usos. Nesse contexto, o serviço ecossistêmico de regulação hídrica pela diluição de efluentes em corpos hídricos é de suma importância para a qualidade de vida das populações. A dinâmica desse serviço ocorre por meio de um fluxo ecossistêmico, influenciado pelo volume de água que se movimenta de uma região para outra. O presente estudo teve como foco principal desenvolver uma metodologia de análise da dinâmica e manutenção da regulação hídrica na Região Hidrográfica do Rio Guandu. Esta região, apesar de ser favorecida pelo volume de água transposto dos Rios Pirai e Paraíba do Sul, vem sofrendo com problemas de qualidade e escassez hídrica, o que prejudica e encarece o abastecimento de mais de nove milhões de pessoas no Rio de Janeiro. A metodologia consistiu em revisão de estudos de fluxos ecossistêmicos, construção de um banco de dados, classificação dos impactos sobre a regulação hídrica nas unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) a partir de um dendrograma de similaridade, análise de indicadores relacionados às demandas e disponibilidades hídricas dessas unidades e construção de um diagrama do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica. Também se analisaram os efeitos das transposições sobre a manutenção e o fluxo deste serviço ecossistêmico a partir da comparação entre o cenário real (que considera a presença da infraestrutura hidráulica existente) e o natural (que a desconsidera). As unidades hidrológicas de planejamento foram classificadas em quatro classes de impacto. Constatou-se que as demandas pelo serviço ecossistêmico de regulação hídrica requerem mais que o dobro do volume de água retirado para atendimento das demandas de provisão de água na Região Hidrográfica do Rio Guandu. Com relação à capacidade de manutenção e o balanço da regulação hídrica, observou-se que a pior situação (maior comprometimento hídrico) se encontra na UHP 10, por ser a mais populosa, e por não receber volume de água das transposições. As UHP 7 e UHP 8, da calha fluvial principal do Rio Guandu, junto da UHP 4, são as que apresentam o melhor balanço, em função do volume acrescido das transposições, contribuindo de forma mais positiva para a regulação hídrica. As UHP 9, UHP 10, UHP 11 e UHP 12 não contribuem para a regulação da água que é captada para o abastecimento da população, por não terem conexão hidrográfica com a calha do Rio Guandu, contribuindo diretamente para a baía de Sepetiba. Destas, somente a UHP 11 não apresenta um comprometimento hídrico acima de 100%. A metodologia experimentada se mostrou satisfatória, ao possibilitar uma análise integrada do serviço ecossistêmico de regulação hídrica, fornecendo informações úteis para tomada de decisão na Região Hidrográfica do Rio Guandu, apresentando potencial para ser utilizada em outras bacias hidrográficas.

Palavras-chave: fluxo de serviços ecossistêmicos; recursos hídricos; transposição de águas.

ABSTRACT

The increased demand for water use, driven by environmental, social and economic factors, as well as the degradation of terrestrial and aquatic ecosystems, threaten the water security of populations on all continents and point to the pressing need for better management of water resources. In Brazil, these demands are added to the undesirable levels of basic sanitation, directly reflecting on the quality and availability of water for different uses. In this context, the ecosystem service of water regulation by the dilution of effluents in water bodies is of paramount importance for the quality of life of the populations. The dynamics of this service occurs through an ecosystem flow, influenced by the volume of water that moves from one region to another. The present study had as main focus to develop a methodology for analyzing the dynamics and maintenance of water regulation in the Hydrographic Region of the Guandu River. This region, in spite of being favored by the volume of water transferred from the Piraí and Paraíba do Sul rivers, has been suffering from quality problems and water scarcity, which harms and increases the supply of more than nine million people in Rio de Janeiro. The methodology consisted of reviewing studies of ecosystem flows, building a database, classifying impacts on water regulation in hydrological planning units (UHPs) from a similarity dendrogram, analyzing indicators related to water demands and availability of these units and construction of an ecosystem flow diagram of water regulation. The effects of transpositions on the maintenance and flow of this ecosystem service were also analyzed from the comparison between the real scenario (which considers the presence of the existing hydraulic infrastructure) and the natural scenario (which disregards it). Hydrological planning units have been classified into four impact classes. It was found that the demands for the water regulation ecosystem service require more than twice the volume of water withdrawn to meet the demands for water supply in the Guandu River Hydrographic Region. Regarding the maintenance capacity and the balance of water regulation, it was observed that the worst situation (greatest water damage) is found in UHP 10, as it is the most populous, and for not receiving water volume from the transpositions. UHP 7 and UHP 8, on the main river channel of the Guandu River, next to UHP 4, are the ones that present the best balance, due to the increased volume of transpositions, contributing more positively to water regulation. The UHP 9, UHP 10, UHP 11 and UHP 12 do not contribute to the regulation of the water that is collected to supply the population, as they do not have a hydrographic connection with the Guandu River channel, contributing directly to Sepetiba Bay. Of these, only UHP 11 does not show a water level above 100%. The experimented methodology proved to be satisfactory, as it enabled an integrated analysis of the water regulation ecosystem service, providing useful information for decision making in the Guandu River Hydrographic Region, presenting potential to be used in other hydrographic basins.

Keywords: ecosystem services flow; water resources; water transpositions.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO, p.15

1.1 HIPÓTESE, p.18

1.2 OBJETIVOS, p.18

1.2.1 Geral, p.18

1.2.2 Específicos, p.18

2. REFERENCIAL TEÓRICO, p.19

2.1 POLUIÇÃO E AUTODEPURAÇÃO EM CORPOS HÍDRICOS, p.19

2.1.1 Vazão de diluição e comprometimento hídrico, p.21

2.2 SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS HÍDRICOS, p.22

2.2.1 Dinâmica dos serviços ecossistêmicos hídricos, p.24

2.2.2 Serviço ecossistêmico de regulação hídrica, p.25

2.3 PROBLEMÁTICA HÍDRICA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU, p.28

3 MATERIAL E MÉTODOS, p.33

3.1 DELINEAMENTO E ETAPAS DA METODOLOGIA, p.33

3.2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU, p.33

3.2.1 Divisão da RH-II em unidades hidrológicas de planejamento e blocos de compartimentos, p.35

3.3 CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS, p.38

3.4 CLASSIFICAÇÃO DOS IMPACTOS DA POPULAÇÃO SEM TRATAMENTO DE ESGOTO SOBRE O SERH REGULAÇÃO HÍDRICA, p.39

3.5 ANÁLISE DA MANUTENÇÃO DO SERH, p.41

- 3.6 ANÁLISE DA DINÂMICA DO SERH, p.45
- 3.7 EFEITOS DA INFRAESTRUTURA HIDRÁULICA SOBRE A DINÂMICA E A MANUTENÇÃO DO SERH, p.46
- 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO, p.48**
- 4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS IMPACTOS DA POPULAÇÃO SEM TRATAMENTO DE ESGOTO SOBRE O SERH, p.48
- 4.2 ANÁLISE DA MANUTENÇÃO DO SERH, p.50
- 4.3 ANÁLISE DA DINÂMICA DO SERH, p.55
- 4.4 ANÁLISE DOS EFEITOS DAS TRANSPOSIÇÕES SOBRE A MANUTENÇÃO E DINÂMICA DO SERH, p.58
- 5 CONCLUSÕES, p.62**
- 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, p.64**

LISTA DE TABELAS

- TABELA 1 - Estrutura geral de classificação do serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) segundo a Classificação Comum dos Serviços Ecossistêmicos (*The Common Classification of Ecosystem Services* – CICES), f.27
- TABELA 2 - Dados de esgoto coletado e tratado (%) por município da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.30
- TABELA 3 - Síntese dos principais aspectos ambientais ligados a regulação hídrica dos blocos de compartimentos da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.37
- TABELA 4 - Base de dados (matriz ambiental) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II) com as informações utilizadas e suas fontes, f.38
- TABELA 5 - População total com e sem tratamento (n° hab) e índice de tratamento de esgoto (%) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.40
- TABELA 6 - Cargas orgânicas lançadas (kgDBODia^{-1}), vazão dos efluentes (Q_{efl}) ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), concentração de DBO em efluentes (C_{efl}) (mg L^{-1}), disponibilidade hídrica modificada (Q_{dis}) e retiradas (Q_{ret}) ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) nas unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.45
- TABELA 7 - Disponibilidade hídrica natural ($Q_{\text{dis(nat)}}$) e consumos ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.47
- TABELA 8 - Índice de tratamento de esgoto (%), população total sem tratamento (n° hab) e *Classe de impacto* (baixo, médio, alto e muito alto) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.49
- TABELA 9 - Resultados de vazão de diluição de cargas orgânicas domésticas ($Q_{\text{dil(dom)}}$), industriais ($Q_{\text{dil(ind)}}$) e totais ($Q_{\text{dil(tot)}}$) ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), comprometimento hídrico (CH%)

nos cenários real e natural, balanço de contribuição ao serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) (positivo ou negativo), demandas totais ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e participação das demandas por provisão de água e regulação hídrica (%) nas demandas totais (indicadores Q_{ret} e Q_{dil}) por unidade hidrológica de planejamento (UHP) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.51

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Fig.1 Delineamento geral e etapas da metodologia, f.31
- Fig. 2 Mapa das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.36
- Fig. 3 Diagrama de blocos dos compartimentos e unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.36
- Fig. 4 Diagrama base para análise do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica sinalizando o transporte de água entre as unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.46
- Fig. 5 Dendrograma de similaridade gerado no *software Past* a partir das distâncias euclidianas entre as unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II) e o agrupamento realizado em *Classes de impacto* de população total sem tratamento de esgoto (n° mil. hab.), f.48
- Fig. 6 Demandas de uso da água em termos absolutos ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e relativos (%) para provisão de água e regulação hídrica de efluentes domésticos e industriais da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.54
- Fig. 7 Percentuais das demandas totais requeridos para os serviços ecossistêmicos de regulação hídrica ($Q_{\text{dil}(\text{tot})}$) e provisão de água (Q_{ret}) por unidade hidrológica de planejamento (UHP) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II), f.55
- Fig. 8 Diagrama do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II) sinalizando o balanço de contribuição das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs), no cenário real, f.56
- Fig. 9 Mapa da capacidade de manutenção do serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs),

sinalizando o balanço de contribuição das UHPs (positivo ou negativo), a partir do indicador de comprometimento hídrico (CH%), no cenário real, f.58

Fig. 10 Diagrama do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II) sinalizando o balanço de contribuição das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs), no cenário natural, f.59

Fig 11 Mapa da capacidade de manutenção do serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs), sinalizando o balanço de contribuição das UHPs (positivo ou negativo), a partir do indicador de comprometimento hídrico (CH%), no cenário natural, f.61

1. INTRODUÇÃO

O uso da água vem crescendo globalmente cerca de 1% por ano desde a década de 1980, em função do crescimento populacional, desenvolvimento socioeconômico e da mudança nos padrões de consumo. Espera-se que essa demanda continue aumentando em uma taxa similar até 2050, contabilizando-se um crescimento de 20 a 30% acima do nível atual de uso da água, principalmente em função de maiores demandas industriais e residenciais. Mais de 2 bilhões de pessoas vivem em países com alto nível de estresse hídrico, e aproximadamente 4 bilhões de pessoas sofrem, em algum grau, com a escassez de água em pelo menos um mês do ano. Os níveis de estresse continuarão a crescer conforme crescem as demandas por água e se intensificam as mudanças climáticas (UNESCO, 2019).

No Brasil, a água é utilizada principalmente para irrigação, abastecimento, fins industriais, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, turismo e lazer. Cada uso apresenta particularidades ligadas à quantidade ou à qualidade do recurso hídrico, e altera as condições naturais das águas superficiais e subterrâneas (ANA, 2019). O aumento da demanda hídrica no país associado ao uso inadequado do solo e da água tem causado sérios impactos negativos à quantidade e à qualidade dos recursos hídricos, implicando em escassez hídrica (LIMA et al., 2001).

Um dos principais problemas encontrados principalmente em regiões mais populosas do país como o Sudeste, em que se insere a área do presente estudo, é a poluição hídrica, implicando na redução da disponibilidade de água para atender aos diferentes usos. No Brasil, 35 milhões de brasileiros ainda não têm acesso à água tratada. Quase 100 milhões, ou 47,6% da população, não têm coleta de esgotos. Do que é gerado de efluente nacionalmente, apenas 46% são tratados. Isso faz com que os corpos de água e oceanos estejam sujeitos à contaminação, comprometendo a saúde principalmente da população mais vulnerável (SNIS, 2019).

Neste contexto, um grande desafio que se impõe é a gestão dos recursos hídricos de forma eficiente em nível de bacias hidrográficas. Isto significa atender às demandas pelos diferentes usos da água e concomitantemente assegurar o equilíbrio dos ecossistemas, que são fornecedores de serviços essenciais ao bem-estar da humanidade (MEA, 2003).

Entende-se por serviços ecossistêmicos (SEs) “os benefícios que o homem obtém dos ecossistemas”, segundo definição da Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA, 2003). Trata-se de uma abordagem multidisciplinar, orientada por conceitos ambientais, sociais e

econômicos, cuja finalidade é contribuir para o desenvolvimento de melhores práticas relacionadas aos ecossistemas. Priorizam-se, nesse campo de conhecimento, as informações que sejam úteis para a tomada de decisão, visando assegurar os benefícios obtidos dos ecossistemas, e garanti-los para gerações futuras.

A crescente demanda mundial por água, associada à redução global no volume disponível e à contaminação de mananciais, evidencia a importância dos chamados “serviços ecossistêmicos hídricos ou hidrológicos” (SEHs), que são os benefícios obtidos pela sociedade relativos aos corpos hídricos, como a provisão de água para nutrição, a sustentação da vida aquática e a regulação das condições do meio aquático (BRAUMAN et al., 2007). Os SEHs são dinâmicos e se estabelecem através de fluxos ecossistêmicos, que podem ser entendidos como o movimento de substâncias, compostos ou nutrientes em um ecossistema passando de um compartimento para outro (JENKINS, 2005).

O fluxo de um SE depende de um agente intermediário que carrega o benefício, da provisão ou regulação natural correspondente, dos atributos físicos da paisagem e da presença de feições naturais ou alterações antropogênicas. Estas podem agir como absorvedoras dos agentes intermediários, impedindo a chegada de benefícios aos usuários. A água é o agente intermediário do fluxo de SEHs como provisão de água e regulação hídrica. No caminho entre os ecossistemas que produzem esses SEHs e os beneficiários que os consomem, há uma depleção na sua disponibilidade, sendo a compreensão desse fluxo de extrema importância para a segurança hídrica de populações (VILLA et al., 2014).

A Região Hidrográfica do Rio Guandu (Região Hidrográfica II - RH-II) do estado do Rio de Janeiro, alvo do presente estudo, compreende a bacia hidrográfica do Rio Guandu (BHRG) e as bacias dos Rios da Guarda e Guandu Mirim. Esse complexo hidráulico é de fundamental importância para o abastecimento de água de 9,4 milhões de pessoas que vivem na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), por meio da captação e tratamento de água na Estação de Tratamento do Guandu (ETA) da CEDAE, além do fornecimento para a geração de energia elétrica, pelo complexo de Ribeirão das Lajes. A água tratada também é usada para fins produtivos por indústrias.

A BHRG tem passado por situação de escassez hídrica, que ganhou maior visibilidade no período de 2014-2015, devido à extrema queda nas vazões do Rio Paraíba do Sul, decorrentes do regime pluvial, e a conseqüente redução do volume transposto. Esses fatores causaram efeitos significativos sobre o abastecimento da RMRJ (ELIZARDO, 2015). Há, ainda, problemas com as condições da água, como visto no episódio de 2020, quando se

observou alta turbidez, e odor e sabor desagradáveis na água que abastece a população da RMRJ, associados à presença de uma substância similar à geosmina, produzida por microrganismos prejudiciais à sua qualidade para consumo, como as cianobactérias (algas azuis). Além disso, constata-se a presença de bactérias entéricas potencialmente patogênicas e tóxicas, que têm seu crescimento favorecido pelo aumento da concentração de matéria orgânica decorrente da poluição por dejetos domésticos (esgoto), fertilizantes agrícolas e efluentes industriais despejados diretamente nos corpos hídricos (REGUEIRO, 2020).

O aspecto quantitativo da provisão de água mediante a captação no Rio Guandu é pouco afetado pelas condições ambientais locais, já que a maior parte do seu volume é proveniente das transposições de 120 a 160m³ s⁻¹ de água da bacia do Rio Paraíba do Sul. No entanto, o aspecto qualitativo é diretamente influenciado pelas condições ambientais, sociais e econômicas da RH-II, que apresenta uma grande população residente e uma diversidade de atividades industriais, agropecuárias e de mineração, sem que, para isso, tenha uma estrutura adequada de tratamento dos efluentes (AGEVAP, 2018).

Tendo em vista a precariedade do sistema de esgotamento sanitário frente às demandas existentes na RH-II, os corpos hídricos exercem um papel fundamental na qualidade de vida da população local, não só pela provisão de água, mas também pela diluição dos seus efluentes, através do fenômeno de autodepuração, responsável por regular as condições da água. Essa capacidade confere a eles o potencial de dirimir os impactos antrópicos e evitar um colapso sanitário na região.

O fluxo ecossistêmico para a regulação das condições bioquímicas da água pela diluição de efluentes em corpos hídricos (regulação hídrica) tem como agente carreador o volume de água que se movimenta na forma de corpos hídricos, passando de uma região para outra (VILLA et al., 2014). A análise desse fluxo pode ser feita a partir da capacidade de autodepuração dos corpos hídricos receptores dos efluentes (TAVARES, 2019), observando as relações espaciais entre a disponibilidade hídrica e o lançamento de efluentes ao longo de uma bacia hidrográfica.

A proposta deste trabalho consiste em um estudo de caso da RH-II que relaciona os impactos causados pelos efluentes das suas unidades hidrológicas de planejamento sobre a manutenção e a dinâmica do serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) proveniente da autodepuração dos corpos hídricos, a qual é modificada por transposições e se interrelaciona com o SEH de provisão de água.

1.1 HIPÓTESE

É possível avaliar a contribuição e os impactos do funcionamento hidráulico das unidades hidrológicas de planejamento na dinâmica e manutenção do SERH na RH-II.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Analisar a dinâmica e a manutenção do SERH na RH-II.

1.2.2 Específicos

Classificar as unidades hidrológicas de planejamento da RH-II quanto ao impacto do volume de água recebido a partir da população sem tratamento de esgoto sobre a regulação hídrica.

Analisar a manutenção do SERH na RH-II.

Analisar a dinâmica do SERH na RH-II.

Analisar os efeitos da infraestrutura hidráulica (transposições dos Rios Piraí e Paraíba do Sul) sobre a manutenção e a dinâmica do SERH na RH-II.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 POLUIÇÃO E AUTODEPURAÇÃO EM CORPOS HÍDRICOS

A poluição das águas pode ser definida como qualquer alteração em suas características químicas, físicas e biológicas provocadas por ações ou interferências naturais ou humanas. A sua fonte pode ser pontual, quando é possível se identificar o local, o volume e a frequência da descarga do efluente, como no caso dos esgotos domésticos ou industriais; ou difusa, quando não é possível identificar a origem das fontes poluidoras pela sua dispersão no ambiente, como é o caso da drenagem urbana, o despejo de resíduos sólidos e os resíduos advindos das práticas agropecuárias (VON SPERLING, 1996).

A água contém diversos elementos provenientes do ambiente natural, ou introduzidos por atividades antrópicas. Existem muitos parâmetros (químicos, físicos e biológicos) capazes de caracterizar a água, sendo utilizados como indicadores para avaliar ou monitorar a qualidade de um corpo hídrico ou um efluente líquido. A poluição de um determinado curso d'água é diagnosticada quando os valores destes parâmetros não atendem aos limites estabelecidos para determinada classe dos corpos hídricos, segundo a legislação vigente (CONAMA, 2005; ANA, 2013).

A legislação relacionada à qualidade da água estabelece o enquadramento dos corpos hídricos em classes, de acordo com os seus usos preponderantes e estabelecendo critérios. A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) número 357/2005 dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e dá as diretrizes ambientais para o enquadramento, baseada nos princípios do direito ambiental, da função ecológica da propriedade, da prevenção, da precaução, do poluidor-pagador, do usuário-pagador e da integração (CONAMA, 2005). Também define a classe de qualidade da água como o conjunto de condições e padrões de qualidade necessários ao atendimento dos usos preponderantes dos recursos hídricos, atuais e futuros. Baseada nessa definição, a resolução estabeleceu para o território brasileiro treze classes, sendo cinco para águas doces. Assim, cada classe possui limites individuais permitidos de concentração de substâncias consideradas poluidoras. As condições e os padrões de lançamento de efluentes foram, posteriormente, complementados pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (CONAMA, 2011).

A condição da qualidade dos rios, especialmente os localizados em áreas urbanas, no Brasil, reflete problemas infraestruturais típicos de países de terceiro mundo. Há uma enorme

carência de políticas e recursos para saneamento básico, o que resulta em um déficit no acesso a essa estrutura fundamental, principalmente para as populações mais pobres. Mais da metade da população brasileira não possui sequer coleta de esgoto (SANTIAGO NUNES, 2015; SNIS, 2019).

Dentre os problemas relacionados à água decorrentes do avanço da urbanização, podem ser apontados como principais, segundo Tucci (2005): a ocorrência de inundações, pelo aumento da capacidade de escoamento, por meio de condutos e canais e impermeabilização das superfícies; a ocorrência de erosão e sedimentação dos cursos de água, devido à exposição das superfícies e à deposição inadequada de resíduos sólidos; a ocupação irregular em áreas de risco: ribeirinhas (sujeitas a inundações) e com alta declividade (sujeitas a deslizamentos); e a diminuição da qualidade da água superficial e subterrânea.

O lançamento de efluentes domésticos e industriais, somado ao escoamento superficial da água em solos sem cobertura vegetal, leva a diversos problemas ambientais. Estes promovem reflexos negativos para a sociedade, como a sedimentação de corpos hídricos, depleção da concentração de oxigênio dissolvido, contaminação por organismos patogênicos, eutrofização, danos decorrentes de substâncias tóxicas, dentre outros (CASTRO, 2007).

Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água, sendo a fração restante, de 0,1%, a responsável pela necessidade de tratamento para o consumo. Essa fração inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, e microrganismos. As características particulares dos efluentes são resultados dos tipos de usos da água, que variam de acordo com questões sociais, econômicas, ambientais e culturais. A qualidade desses efluentes pode ser medida pelos seus parâmetros físicos, químicos e biológicos (VON SPERLING, 1996).

Um parâmetro relacionado à qualidade de corpos hídricos e efluentes é a quantidade de matéria orgânica presente, uma das principais causas da poluição das águas. Em condições naturais, um rio recebe cargas de matéria orgânica oriundas de plantas e animais. Em regiões populosas e com baixos índices de tratamento como a RH-II, a alta concentração de matéria orgânica dos rios deve-se a lançamentos de efluentes domésticos e industriais. Em condições extremas, isso pode levar o corpo hídrico a uma condição de anoxia (ausência de oxigênio dissolvido), causando o processo de eutrofização e prejudicando a sustentação da vida aquática, produzindo odores desagradáveis (CETESB, 2010; AGEVAP, 2018).

O parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um indicador de qualidade da água que possibilita a determinação da quantidade de matéria orgânica presente nos corpos

hídricos pela medição do consumo de oxigênio de uma amostragem de sua água. Como esse consumo é feito pela microflora existente para decompor e estabilizar a matéria orgânica, ele relaciona-se diretamente ao aumento nos teores de matéria orgânica na água, que reduz a quantidade de oxigênio disponível na amostra, constituindo um parâmetro de medição indireta dessas cargas (CETESB, 2010).

Os impactos causados pelo lançamento de efluentes são atenuados pela capacidade intrínseca dos corpos hídricos de, por meio de processos químicos, físicos e biológicos recuperarem suas características naturais. A essa capacidade se dá o nome de autodepuração, ou autopurificação, que consiste em uma sucessão espaço-temporal de processos ecológicos vinculada ao restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, por mecanismos essencialmente naturais (VON SPERLING, 1996; CAMARGO e PEREIRA, 2003). Esse processo está diretamente relacionado ao volume de água do corpo hídrico, isto é, à sua disponibilidade hídrica (vazão) (ANA, 2013).

2.1.1 Vazão de diluição e comprometimento hídrico

Vazão de diluição é um indicador que reflete a demanda pelo fenômeno de autodepuração de corpos hídricos, e significa o quanto um usuário se apropria de água para diluir determinado efluente. O atendimento dessa demanda depende do volume dos corpos hídricos que recebem esses efluentes, isto é, da sua disponibilidade hídrica, ou vazão. Quando um efluente é lançado, a vazão de diluição somada à vazão de lançamento resulta em uma vazão de mistura, cujos valores dos parâmetros de qualidade não devem ultrapassar os limites estabelecidos para a classe do corpo hídrico, em função do enquadramento previsto na Resolução CONAMA 357/2005 (CONAMA, 2005; ANA, 2013; TUCCI, 2017).

A Agência Nacional de Águas (ANA) utiliza a vazão de diluição e a disponibilidade hídrica como parâmetros para avaliar o comprometimento hídrico na gestão de outorgas, instrumento legal para assegurar o controle quali-quantitativo dos usos da água. Realizada por órgãos ambientais estaduais, o processo de emissão da outorga está associado tanto às permissões para o uso da água (captações) quanto aos lançamentos de efluentes de usuários, controlando o atendimento das concentrações permitidas pela legislação. As demandas para captação são expressas em termos de vazão demandada (em unidades de m^3h^{-1} ou Ls^{-1} , usualmente), enquanto os lançamentos são expressos em cargas poluentes (kg dia^{-1} ou t ano^{-1}),

resultantes do produto da vazão de lançamento pela concentração de determinado parâmetro de qualidade presente no efluente (ANA, 2013).

A Lei nº 9.433/1997, que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos, denota claramente a interrelação entre os dois tipos de usos outorgáveis (captações e lançamentos). Essa relação pode ocorrer, por exemplo, quando captações retiram água do corpo hídrico, diminuindo a capacidade de diluição do manancial para poluentes advindos dos efluentes. No entanto, se posicionadas a jusante de um lançamento, captações podem retirar poluentes, ao retirarem água poluída do corpo hídrico, que será tratada para abastecimento. Lançamentos a montante de captações aumentam a quantidade de água disponível (não sem consequências para a sua qualidade), enquanto lançamentos a montante de outro lançamento reduzem a capacidade de diluição de efluentes (ANA, 2013). As vazões indisponíveis por lançamentos de efluentes podem se tornar progressivamente menores em um corpo hídrico, ficando novamente disponíveis para novos usuários, em função do fenômeno de autodepuração. Cabe ressaltar que esta afirmação só é válida para lançamentos de poluentes não-conservativos, em que algum decaimento é esperado, notadamente a DBO, que é um parâmetro presente na legislação e mais importante atualmente no país, pois está diretamente relacionado ao lançamento de esgotos domésticos (ANA, 2013).

Segundo a resolução CONAMA nº 357/2005, os corpos hídricos enquadrados na classe 1 (apropriados para o consumo humano após tratamento simplificado) devem ter um teor de DBO de, no máximo, $3\text{mgL}^{-1}\text{ O}_2$, enquanto os rios de classe 2 e 3 (apropriados para o consumo humano, após tratamento convencional ou avançado) podem apresentar até 5 e $10\text{mgL}^{-1}\text{ O}_2$, respectivamente (CONAMA, 2005).

2.2 SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS HÍDRICOS

A intensificação dos impactos provocados pela atividade humana, e as consequências no suprimento dos benefícios produzidos pelos ecossistemas para a manutenção da qualidade de vida, acentuaram a necessidade de transpor o mero reconhecimento da dependência que deles temos e criar formas de interação mais sustentáveis com o meio (MEA, 2003). Nesse sentido, a abordagem multidisciplinar dos SEs tem ganhado importância, na medida em que o crescimento econômico mundial explora e degrada os ecossistemas e seus recursos naturais. Essa foi a justificativa para a realização da Avaliação Ecológica do Milênio (MEA, 2003), a maior avaliação global já feita sobre os impactos das atividades humanas no ambiente, que

durou quatro anos e contou com a participação de mil e trezentos autores e colaboradores de noventa e cinco países.

O documento divulgado pela MEA (2003) contribuiu para a popularização da ciência dos SEs, ao apresentar de forma sistemática os conhecimentos científico, governamental e privado, local e global, acerca do tema, existentes até então. Em sua primeira publicação, intitulada “*Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*”, a MEA se propôs a consolidar e sistematizar o conceito de serviço ecossistêmico, trazendo o tema para a luz dos debates envolvendo governos, empresas e sociedade como um todo. MEA (2003) define SEs como “os benefícios que os seres humanos obtêm dos ecossistemas”.

Os SEs são resultados de complexas interações entre componentes bióticos e abióticos, que desencadeiam processos ecológicos e funções ecossistêmicas. Ressaltou-se, em MEA (2003), a necessidade do aprimoramento das pesquisas relacionadas ao tema e, dez anos depois, o número de publicações científicas acerca da quantificação, valoração e importância na elaboração de políticas ambientais havia se multiplicado em grande velocidade (KAREIVA et al., 2011; SEPPELT et al., 2012).

Villa et al. (2014) apresentam uma lista simplificada de itens desejáveis a serem contemplados mais adequadamente em estudos relacionados aos SEs, que são: (a) manter o foco na relação homem-ecossistema; (b) prover informação quantitativa apropriada; (c) considerar os valores reais e potenciais dos SEs; (d) considerar os *tradeoffs*¹ em uma perspectiva dinâmica e sensível à escala; e (e) não utilizar fórmulas prontas para a valoração do SE, mas sim, adequadas ao contexto.

As questões associadas ao uso da água pelas sociedades vêm se firmando cada vez mais como imperativas em termos de preservação de SEs. Essa crescente necessidade é resultado, dentre outros fatores, da proximidade que mananciais provedores de água vêm atingindo os seus limites máximos de fornecimento (BARRETO, 2015). Isso vem conferindo uma maior atenção aos SEHs, que são aqueles que decorrem da existência e da dinâmica dos corpos hídricos, e que propiciam benefícios diretos e indiretos, assim como os recursos necessários às atividades e condições de vida e bem-estar humanos (BRAUMAN et al., 2007).

Os SEHs são encontrados em todas as quatro categorias estabelecidas pela MEA (2005): provisão, suporte, regulação e cultural. Provisão abrange as diferentes finalidades de provisão de água (nutrição, matéria-prima, energia, dentre outros). O controle de enchentes e a regulação das condições da água, por exemplo, são considerados serviços de regulação. Em

¹ Quando a prestação de um serviço ecossistêmico é reduzida em consequência do aumento de outro (RODRÍGUEZ et al., 2006).

serviços culturais, estão o uso espiritual da água, apreciação estética, recreação e turismo. Os serviços de suporte incluem a disponibilidade de água para o crescimento das plantas e habitat para seres vivos.

2.2.1 Dinâmica dos serviços ecossistêmicos hídricos

A dinâmica dos SEs, de forma geral, pode ser sintetizada pela interação de três processos nos ecossistemas: produção (de SEs e benefícios), uso (pelos beneficiários) e fluxo (transmissão dos benefícios da natureza para a sociedade) (BAGSTAD et al., 2013). A produção é amplamente tratada em estudos que quantificam os benefícios obtidos pelas sociedades, ou a produção dos SEs nos ecossistemas, pontos de partida necessários para análise, mas que frequentemente não refletem a localização dos beneficiários nem o fluxo espacial e temporal de serviços (DAILY et al., 2009). Diante desse problema, vem crescendo na última década o número de publicações que se propõem a analisar o fluxo de SEs (fluxo ecossistêmico) (VILLA et al., 2014; SERNA-CHAVES et al., 2014; SCHOROTER et al., 2018).

Não é possível com as ferramentas atuais disponíveis o entendimento completo da dinâmica dos sistemas ecológico, social e econômico que expressam um SE. Assim, a compreensão do seu fluxo é um caminho metodológico alcançável em muitas situações e um aspecto fundamental para a análise da segurança de populações com relação aos benefícios recebidos (VILLA et al., 2014). Análises do fluxo de SEs podem prover informações de grande utilidade como, por exemplo, ao quantificar a diferença entre os benefícios adquiridos pelas sociedades e o potencial produtivo de um ecossistema, contribuindo para uma maior precisão na valoração de SEs, ou ao identificar padrões de distribuição de SEs, embasando a resolução de questões de equidade de acesso (SYRBE e WALZ, 2012; BURKHARD et al., 2012; PALOMO et al., 2013).

Cada benefício pode ser definido no espaço por uma área de fornecimento (fonte) capaz de prover o fluxo de benefícios que intercepta locais de demanda. Esse fluxo se dá através de um agente carreador de matéria, como a água; ou de informação, como a informação estética (VILLA et al., 2014).

Segundo Falkenmark (2003), a água pode ser um agente carreador de fluxo nas suas formas azul (água líquida que se desprende por gravidade das partes mais elevadas das bacias hidrográficas até os rios e o mar, podendo ser armazenada de forma subterrânea, nos

aquíferos) e verde (componente invisível da água que se refere ao fluxo de vapor de água entre atmosfera, solos e plantas). A dinâmica desse fluxo depende das características dos ecossistemas, que definem as parcelas da precipitação que se convertem em águas superficiais e subterrâneas. Cada uma dessas formas da água (azul e verde) possui SEs associados, dentro das quatro categorias da MEA (2003), como visto por Martin-Lopez (2013), em um estudo de mapeamento de SEs em bacias hidrográficas. A autora ressalta que a gestão das bacias hidrográficas deve se basear em ambos os fluxos, com a finalidade de assegurar a provisão diversa de serviços à sociedade. Dentre os SEs ligados ao fluxo de águas azuis, estão a regulação hídrica e a depuração da água.

O fluxo, juntamente com a quantidade, localidade e qualidade de um SE formam o conjunto de atributos que o define. De acordo com cada cenário estabelecido para estes atributos, alguns serviços serão favorecidos à custa de outros nas situações de *trade-offs* entre SEs (BRAUMAN et al., 2007). Por exemplo, a provisão de matéria-prima madeireira pode resultar na redução do volume hídrico para a provisão de água (JACKSON et al., 2005; FOLEY et al., 2005), enquanto o uso de água para agricultura e abastecimento da população pode ter efeito negativo no serviço de suporte para a vida aquática, prejudicando a pesca (BARON et al., 2002). A retirada de água para provisão pode indiretamente prejudicar a regulação das suas condições, em função da redução do volume dos corpos hídricos. Já o uso desses corpos para a diluição de efluentes prejudica o atributo de qualidade da provisão de água (BRAUMAN et al., 2007; ANA, 2013).

2.2.2 Serviço ecossistêmico de regulação hídrica

O SERH tratado neste estudo refere-se ao benefício obtido dos corpos hídricos ao diluírem efluentes lançados, como apresentado em Tavares (2019), que realizou um estudo sobre o fornecimento de SEs em áreas urbanas relacionando as condições inadequadas de esgotamento sanitário de capitais amazônicas (com o uso do teste de similaridade) com a depuração da água realizada pelos abundantes corpos hídricos da região. A hipótese reforçada foi de que “o potencial de autodepuração dos rios locais é a última fronteira para que as pessoas continuem tendo qualidade de vida, considerando a quase inexistência de tratamento de esgoto doméstico na região”.

Visando uma maior conexão com outros estudos na área, o SERH foi classificado em acordo com a estrutura da versão mais recente (V5.1) da Classificação Comum dos Serviços

Ecosistêmicos (*The Common Classification of Ecosystem Services – CICES*), o sistema mais popular atualmente, sobretudo na Europa (COSTANZA et al., 2017; HAINES-YOUNG e POTTSCHIN, 2018).

CICES não visa substituir outros sistemas de classificação, como o proposto pela MEA (2003), mas permitir que estudos transitem mais facilmente entre eles, e que as pessoas possam entender, de forma mais clara, como são feitas as medições e análises. Apresenta ampla equivalência com os principais sistemas de classificação de SEs existentes, como TEEB, IPBES e FECS-CS (HAINES-YOUNG e POTTSCHIN, 2018).

Nesse sistema, os SEs são divididos em categorias de provisão, regulação e culturais, se diferenciando da classificação proposta em MEA (2003) pela ausência da categoria de suporte. Essa diferença visa evitar as situações de dupla contagem dos SEs da categoria de suporte, que passam a ser considerados em CICES como parte das estruturas, processos e funções que caracterizam os ecossistemas geradores de SEs (HAINES-YOUNG e POTTSCHIN, 2018).

CICES foi construído sob o princípio que a classificação dos SEs precisa descrever a contribuição de ecossistemas para o bem-estar humano em termos de “o que os ecossistemas fazem”. Assim, a definição do SE deve ressaltar os resultados ecológicos que características particulares de ecossistemas ou processos geram, que podem beneficiar pessoas. CICES V5.1 busca identificar os propósitos ou usos que as pessoas têm para os diferentes tipos de serviços ecossistêmicos, e associá-los aos atributos ou comportamentos que lhes dão suporte (HAINES-YOUNG e POTTSCHIN, 2018).

Para a definição do SE, CICES utiliza uma estrutura hierárquica em cinco níveis, havendo uma progressão em termos de detalhamento e especificidade a cada um deles (seção, divisão, grupo, classe e tipo de classe). Cada categoria nos diferentes níveis de classificação pode ser identificada por um código numérico, de forma que cada nível de classe possui um código único de quatro dígitos. Apresenta-se na Tabela 1 as categorias dos diferentes níveis de classificação do SERH, com seus respectivos códigos de identificação (HAINES-YOUNG e POTTSCHIN, 2018).

Tabela 1: Estrutura geral de classificação do serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) segundo a Classificação Comum dos Serviços Ecossistêmicos (*The Common Classification of Ecosystem Services – CICES*).

Código	Níveis	Classificação
5	Seção	Regulação e manutenção (abiótica)
1	Divisão	Transformações de inputs bioquímicos ou físicos nos ecossistemas
1	Grupo	Mediação de resíduos, substâncias tóxicas e outras perturbações por processos não vivos
1	Classe	Diluição por água doce e ecossistemas marinhos

Fonte: Haines-Young e Potschin (2018).

Baseado nessa estrutura, o SERH relacionado à capacidade de autodepuração dos rios pode ser mais especificamente denominado como “regulação das condições bioquímicas da água pela diluição de efluentes nos corpos hídricos”. Se insere na categoria dos SEs abióticos e o código que o identifica em nível de classe é 5.1.1.1.

A regulação hídrica, além de ser um SE em si, influencia o atributo “qualidade” de todos os outros SEs, incluindo culturais, como de recreação e apoio, por exemplo, o que reforça a sua importância. Conforme a água se movimenta em uma bacia hidrográfica, as suas condições são influenciadas pelas características dos ecossistemas, e os recursos naturais que o compõem sofrem contínuas mudanças ocasionadas por fenômenos naturais, ou atividades humanas, que alteram a provisão de SEs prestados e, conseqüentemente, nos benefícios obtidos pelo homem (BRAUMAN et al., 2007).

Ecossistemas com cobertura de solo intacta tendem a ser eficazes para a regulação hídrica. Os sistemas radiculares das plantas mantêm o solo estável e a cobertura vegetativa afeta a força e o tamanho das chuvas que atingem o mesmo (HALL e CALDER, 1993; KEIM e SKAUGSET, 2003; GYSSELS et al., 2005). Os solos, a vegetação e a microfauna ajudam a retirar poluentes do fluxo terrestre e das águas subterrâneas, capturando fisicamente a água e os sedimentos, aderindo aos contaminantes, reduzindo a velocidade da água para melhorar a infiltração, transformando bioquimicamente os nutrientes e contaminantes, absorvendo a água e os nutrientes na zona das raízes, estabilizando bancos de erosão e diluindo a água contaminada (NAIMAN, 1997). Quando a água se move desimpedida através de um ecossistema, não há oportunidade para essa filtragem ambiental. Por isso, os planos de proteção de bacias hidrográficas têm como premissa a capacidade de certos tipos de uso e cobertura da terra de melhorarem as condições da água, ou de mantê-la, através da adição limitada de contaminantes ao fluxo de água (BRAUMAN et al., 2007).

Além do uso e cobertura da terra, o relevo também exerce um papel preponderante nas condições da água que chega aos corpos hídricos. Ecossistemas com características que impedem a formação ou canalização de valas têm maior probabilidade de melhorar as condições da água pela redução do escoamento superficial (WORRAL e SWANK, 2003; CROKE e HAIRSINE, 2006).

As características naturais dos ecossistemas têm grande influência sobre o SERH, mas são as ações humanas que mais impactam este serviço, especialmente em áreas urbanas. O saneamento básico, que é um conjunto de estruturas essenciais para a qualidade de vida das populações e o aproveitamento sustentável de ecossistemas, não é uma realidade para grande parte da população brasileira, e de outros países subdesenvolvidos da América Latina (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2011; SANTIAGO NUNES, 2015; SNIS, 2015).

2.3 PROBLEMÁTICA HÍDRICA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU

Há uma crescente dependência do abastecimento do Rio de Janeiro e dos municípios da Baixada Fluminense do sistema de captação Guandu, que vem sendo sucessivamente ampliado desde a década de 1950, com o investimento de um grande volume de recursos públicos na construção da estrutura responsável pelo aumento da sua vazão (PAIVA BRITTO e QUINTSLR, 2017). Assim, embora a maior demanda para abastecimento humano no estado esteja na Região Hidrográfica V (RH-V) do estado do Rio de Janeiro, a maior parte da água que atende a esta demanda provém da RH-II, através de captação da CEDAE no Rio Guandu (INEA, 2014).

Essa capacidade de abastecimento da RH-II ocorre em função do Complexo Hidrelétrico de Lajes, o maior conjunto de estruturas hidráulicas do estado do Rio de Janeiro. Apesar da sua importância no setor elétrico, propósito da sua construção, o seu maior impacto na vida da população ocorre pelo abastecimento hídrico. Ele é formado por cinco usinas, sendo três geradoras (Nilo Peçanha, Fontes Nova e Pereira Passos) e duas elevatórias (Santa Cecília e Vigário), e seis reservatórios de água. As usinas elevatórias são as responsáveis pela transposição de uma vazão de cerca de $150\text{m}^3\text{s}^{-1}$ dos Rios Paraíba do Sul e Piraí, pertencentes à bacia do Rio Paraíba do Sul (57.000km^2), para a bacia do Rio Guandu (1.400km^2) (AGEVAP, 2018).

Assim, esse complexo viabiliza a geração de energia elétrica por intermédio das usinas hidrelétricas de grande e pequeno porte; o uso de alguns locais da RH-II para fins de turismo e

lazer; a implantação de diversos empreendimentos de importância econômica, como usinas termelétricas, indústrias e agropecuária; e a implantação da estação de tratamento de água responsável por 80% do abastecimento da RMRJ, a ETA Guandu. Além do sistema de captação Guandu, os dois outros principais sistemas integrados da RMRJ tanto em termos de vazão quanto de população atendida, também se localizam na RH-II: Lajes e Acari (AGEVAP, 2018).

O percentual de pessoas residentes na RH-II atendidas pelo sistema público de abastecimento é de 96,5%. Excluindo-se o Rio de Janeiro, que possui o maior índice de abastecimento da RH-II, esse percentual diminui pra 89,4%, abaixo da média da região Sudeste (91,2%). Esse déficit no atendimento faz com que uma parte da população busque utilizar fontes alternativas de abastecimento. Recentemente, foram identificadas mais de cinquenta minas d'água e poços rasos utilizados para abastecimento humano na RH-II para uso coletivo (AGEVAP, 2017).

Estima-se que sejam retirados $89,07\text{m}^3\text{s}^{-1}$ da RH-II para atendimento dos principais setores usuários de água: abastecimento urbano ($54,15\text{m}^3\text{s}^{-1}$), termelétricas ($30,08\text{m}^3\text{s}^{-1}$) e indústrias ($4,42\text{m}^3\text{s}^{-1}$). As maiores captações para o abastecimento urbano são feitas pelos sistemas integrados Guandu e Ribeirão das Lajes. Com relação às indústrias e termelétricas, as maiores captações são feitas, além do Rio Guandu, no canal de São Francisco, que conecta a BHRG à baía de Sepetiba (AGEVAP, 2018).

Um dos cenários tendenciais de demanda por captação na RH-II estimado pelo IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), na publicação “Brasil 2035: cenários para o desenvolvimento”, prevê o comprometimento total da água disponível até 2030 (IPEA, 2017). Segundo o Plano Estratégico de Recursos Hídricos (INEA, 2014), o Sistema Guandu/Lajes/Acari necessita de ampliação imediata da ordem de $3.000\text{L}\text{s}^{-1}$ somente para as áreas atendidas na RH-II, além de outros $15.000\text{L}\text{s}^{-1}$ para a RH-V.

O lançamento *in natura* de esgotos sanitários; a poluição e a contaminação dos mananciais por efluentes industriais, urbanos e agropecuários; a extração mineral de areia e a intrusão salina são as principais questões ambientais da BHRG. A poluição e contaminação das águas decorrem da precariedade de infraestrutura de saneamento básico. Os rios Queimados, Poços e Ipiranga, que compõem os afluentes do baixo Guandu, recebem os efluentes do pólo industrial de Queimados, e também do esgotamento sanitário de parte da Baixada Fluminense (PAIVA BRITTO e QUINTSLR, 2017), cujos municípios apresentam

baixos índices de tratamento de esgoto, como pode ser visto na Tabela 2, onde são apresentados os índices de tratamento e coleta de esgoto dos quinze municípios da RH-II.

Por vezes, a situação da qualidade da água que chegou a ETA Guandu esteve tão crítica que a CEDAE teve que paralisar totalmente o funcionamento (ANA/SONDOTECNICA, 2006). Ressalta-se, também, o episódio ocorrido no início de 2020, quando se observou a proliferação de bactérias e a intensa produção de uma substância similar a geosmina, que comprometeram drasticamente a qualidade da água para abastecimento da população. Algumas dessas bactérias são potencialmente patogênicas e tóxicas, tendo o seu crescimento favorecido pelo aumento da concentração de matéria orgânica decorrente da poluição por dejetos domésticos (esgoto), fertilizantes agrícolas e efluentes industriais despejados diretamente nos corpos hídricos (REGUEIRO, 2020).

Tabela 2: Dados de esgoto coletado e tratado (%) por município da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

Município da RH-II	%	
	Coleta de esgoto	Tratamento de esgoto
Rio de Janeiro	60	73,22
Rio Claro*	49	-
Engenheiro Paulo de Frontin*	40	-
Paracambi	37,5	0
Seropédica	37,4	18,27
Queimados	36,8	0
Nova Iguaçu	36,2	4,01
Itaguaí	34,7	0
Piraí	28,6	58,76
Japeri*	28,1	-
Miguel Pereira*	27,5	-
Vassouras	25,8	18,39
Barra do Piraí	24,6	0
Mendes	20	0
Mangaratiba*	10,9	-
<i>Sudeste</i>	67,4	50,09
<i>Brasil</i>	55,2	46

*municípios sem informações sobre tratamento de esgoto.

Fonte: SNIS (2019).

O Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim (Comitê Guandu-RJ) foi criado em 2002, a partir do Decreto Estadual n° 31.178, vinculado ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERHI), com atribuições consultivas, normativas e

deliberativas. Ele realiza estudos, programas de educação ambiental, mobilização social, projetos e obras que visam à melhoria da quantidade e qualidade das águas. Foi responsável pelo acompanhamento do Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim (PERH Guandu) feito pela Agência da Bacia do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP, 2018), que atualiza e aperfeiçoa as informações do Plano realizado em 2006 (ANA/SONDOTECNICA, 2006), com o intuito de caracterizar as principais potencialidades, problemas e conflitos identificados nas bacias.

No PERH Guandu, foram feitos o diagnóstico e o prognóstico das condições sociais, econômicas e ambientais das bacias que compõem a RH-II, além de um plano de ações. Algumas agendas do plano de ação são: o balanço qualitativo e a gestão integrada dos recursos hídricos; a restauração e conservação de áreas prioritárias; melhorias no sistema de saneamento e redução do lançamento de cargas poluidoras nos corpos hídricos. Dentre as dificuldades que se impõem para a realização dessas agendas, segundo o próprio Plano, destacam-se: a pouca participação da sociedade; a falta de integração nas políticas públicas; o baixo reconhecimento do valor econômico da água; os interesses distintos; a crise política, econômica e ética do estado do Rio de Janeiro; a falta de pertencimento e valorização da cultura local, e interesses externos nas águas da bacia, especialmente do estado de São Paulo. São propostas no Plano, como medidas de aperfeiçoamento, o fortalecimento da representatividade da sociedade civil junto ao Comitê Guandu-RJ, a qualificação dos atores envolvidos na gestão dos recursos hídricos e a aproximação com os municípios para a solução de problemas recorrentes, em especial, a falta de saneamento básico. O PERH Guandu também ressalta a carência de reforço operacional (material e de recursos humanos) da AGEVAP (AGEVAP, 2018).

Atualmente, está em andamento um projeto encomendado pelo Comitê Guandu-RJ para realizar o diagnóstico das necessidades de esgotamento sanitário da RH-II, com as especificações técnicas e orçamentárias para execução de obras em áreas rurais e periurbanas dos quinze municípios que a compõem, priorizando a universalização do atendimento e as alternativas mais adequadas ambiental e economicamente. A partir da entrega do projeto, a responsabilidade de implantação e execução será dos municípios. O Comitê Guandu-RJ estuda ainda formas de financiamento ou auxílio financeiro às prefeituras, para a viabilização dos projetos (COMITÊ GUANDU-RJ, 2020).

Com relação ao monitoramento dos corpos hídricos, há uma proposta do consórcio Envex-ferma já aprovada pelo Comitê Guandu-RJ que consiste na instalação de uma nova

rede de monitoramento para avaliar a qualidade e a quantidade de água, já que há uma escassez de dados disponíveis para a RH-II, com muitas estações fora de funcionamento, e outras sem séries de dados consistentes. A rede de monitoramento poderá, por exemplo, além de informar os indicadores de qualidade, controlar a ocorrência de enchentes na região; subsidiar projetos que exijam utilização de água; validar a qualidade da água em pontos diversos e apoiar a ampliação e o monitoramento do enquadramento de corpos hídricos (COMITÊ GUANDU-RJ, 2020).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DELINEAMENTO E ETAPAS DA METODOLOGIA

A Figura 1 apresenta o delineamento geral com as principais etapas da metodologia.

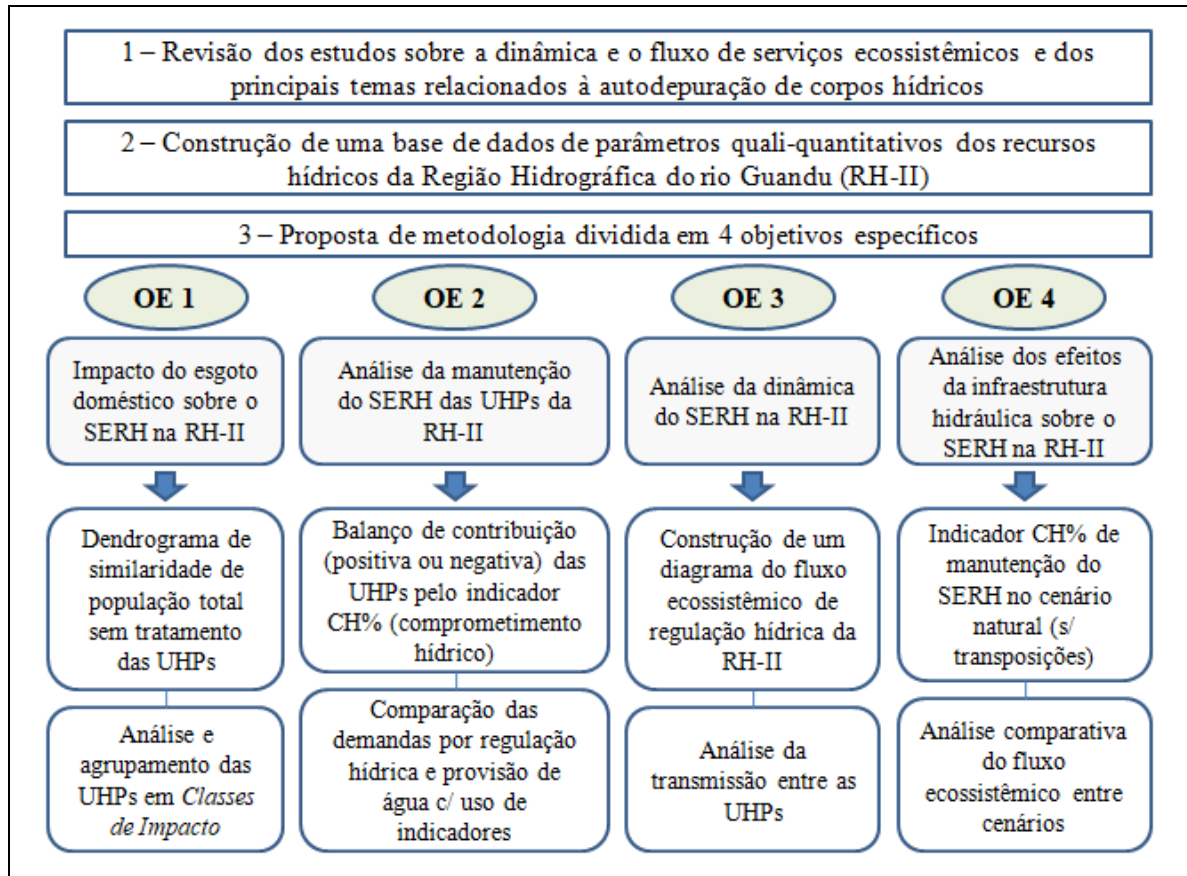


Figura 1: Delineamento geral e etapas da metodologia.

3.2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU

A área de estudo (RH-II) é uma das regiões hidrográficas definidas a partir da Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos, nº 107 de 22 de maio de 2013 (CERHI-RJ, 2013). Localiza-se na região sudoeste do estado do Rio de Janeiro e abrange a bacia hidrográfica do Rio Guandu, além das bacias do Rio da Guarda, Guandu-Mirim, Pirai e Litorâneas. Ocupa uma área de 3.815,6km² da Região Hidrográfica Atlântico Sudeste no bioma Mata Atlântica, o que significa aproximadamente 1,7% do território brasileiro. Essa área divide-se entre quinze municípios: Itaguaí, Seropédica, Queimados, Japeri, Paracambi e

Engenheiro Paulo de Frontin, que estão totalmente inseridos na RH-II, e Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Miguel Pereira, Vassouras, Piraí, Rio Claro, Mendes, Mangaratiba e Barra do Piraí, que estão parcialmente inseridos (AGEVAP, 2018).

Uma das principais singularidades da RH-II é a interligação com a bacia do Rio Paraíba do Sul, através da transposição da estação elevatória de Santa Cecília, que transfere 60% do volume de água deste rio para o reservatório de Santana e, em seguida, para a vertente sul da Serra do Mar. Além disso, também há a transposição do túnel de Tócos, a qual contribui para o abastecimento do reservatório Ribeirão das Lajes. Assim, a RH-II recebe contribuições de drenagem da baía de Sepetiba e da parte fluminense da bacia do Piraí, que é um contribuinte do Paraíba do Sul (AGEVAP, 2018).

A sua fisiografia é formada por dois conjuntos distintos: o Domínio Serrano, representado por montanhas e escarpas da vertente oceânica da Serra do Mar, na parte sudoeste e nordeste da bacia, e pelos maciços, ao longo da faixa costeira na direção N-NE, onde as partes mais elevadas variam entre 200m e 800m; e o Domínio da Baixada, que consiste em uma extensa planície flúvio-marinha, que forma a Baixada de Sepetiba. A fitofisionomia original da região é composta por floresta ombrófila densa e manguezais, remanescentes do bioma Mata Atlântica (AGEVAP, 2018).

Observa-se que os maiores índices anuais de precipitação estão localizados nas cabeceiras do Rio Piraí, além das regiões de maior altitude dos Rios São Pedro e Santana. Observa-se ainda uma tendência de menores índices pluviométricos na região do Vale do Paraíba do Sul, acompanhando o efeito orográfico, que influencia no regime pluviométrico da região. Já em termos temporais, observam-se dois padrões distintos de precipitação média mensal: período mais chuvoso, entre março e outubro, e um período mais seco, entre abril e setembro (AGEVAP, 2018).

As maiores disponibilidades hídricas na RH-II tanto em termos de vazão natural quanto modificada (real) encontram-se no Rio Guandu e no canal de São Francisco, respectivamente. Em Ribeirão das Lajes, assim como no Rio Guandu e no canal de São Francisco, há um aumento da disponibilidade hídrica em função das transposições e da infraestrutura hidráulica presente, em comparação com a sua condição natural. Já a região da cabeceira do Rio Piraí apresenta uma disponibilidade hídrica modificada menor do que a natural (AGEVAP, 2018).

O PIB (Produto Interno Bruto) do conjunto dos municípios que compõem a RH-II, em 2014, chegou a quase 340 bilhões de reais, praticamente a metade do PIB estadual (50,6%),

enquanto a população estimada destes municípios representava 48,7% do estado. O PIB per capita do conjunto dos municípios (R\$42.301, em 2014) era, então, um pouco maior que o do estado do Rio de Janeiro (R\$40.767) e significativamente maior que o da RMRJ (R\$35.900). Há uma maior concentração econômica no setor de serviços e no valor de impostos (IBGE, 2017).

3.2.1 Divisão da RH-II em unidades hidrológicas de planejamento e blocos de compartimentos

Este estudo considerou a subdivisão geográfica da RH-II em unidades hidrológicas de planejamento (UHPs), que se baseiam na homogeneidade de condições físicas (hidrográficas, hidrológicas, geológicas, morfológicas, dentre outras), socioeconômicas, culturais, político-administrativas e institucionais voltadas aos recursos hídricos. Essa subdivisão visa uma compreensão mais detalhada da RH-II, ao permitir a determinação da disponibilidade hídrica e a demanda de uso de recursos hídricos por unidade geográfica, possibilitando um planejamento sustentável desses recursos, e o entendimento global a partir do reconhecimento das especificidades locais (AGEVAP, 2018).

A Figura 2 apresenta um mapa com a distribuição das UHPs da RH-II, conforme o PERH Guandu (AGEVAP, 2018).

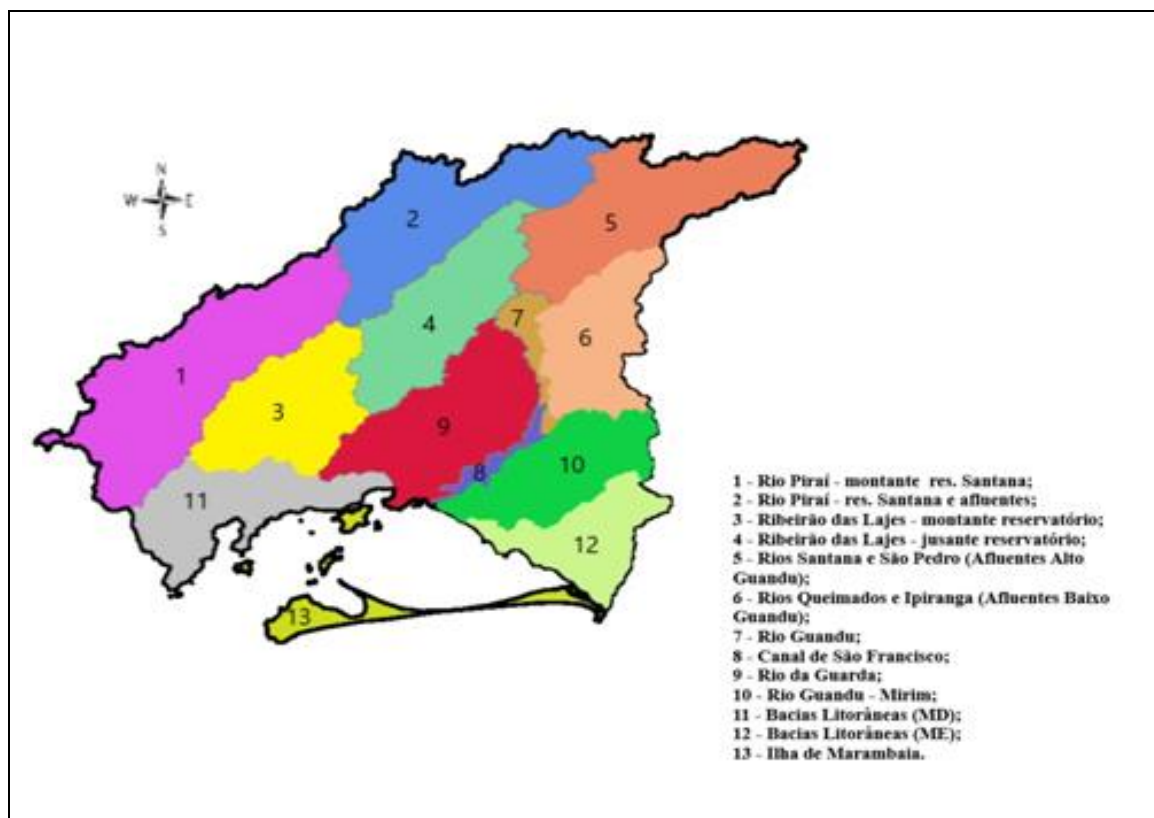


Figura 2: Mapa das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

Fonte: SIGA – Guandu.

São 13 UHPs, que podem ser agrupadas para análise em blocos de compartimentos (AGEVAP, 2018) (Figura 3). A UHP 13 constitui um bloco de compartimento à parte, denominado Ilha de Marambaia. Esta UHP não foi considerada neste estudo por estar fora da parte continental da RH-II.

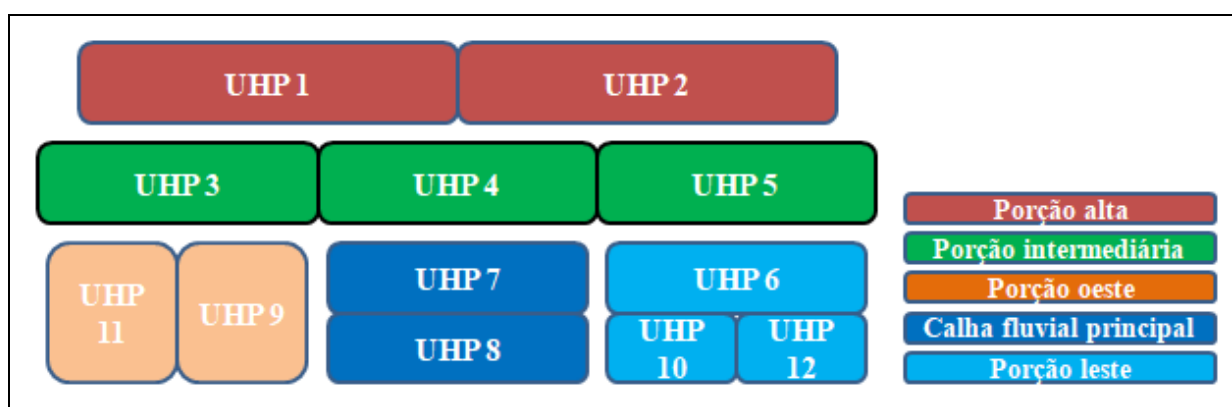


Figura 3: Diagrama de blocos dos compartimentos e unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

Fonte: PERH Guandu (AGEVAP, 2018).

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos principais aspectos ambientais relacionados ao SERH dos blocos de compartimentos da RH-II.

Tabela 3: Síntese dos principais aspectos ambientais ligados ao serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) dos blocos de compartimentos da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

Bloco	UHP (bacia hidrográfica)	Síntese
Porção alta	1 (bacia do Rio Piraí)	Predomínio de áreas antrópicas agrícolas (com pastagens); situação preocupante de cobertura natural nas Áreas de Preservação Permanente (APPs) de cursos de água; presença das estruturas hidráulicas relacionadas à transposição do Rio Paraíba do Sul e geração de energia; comprometimento localizado da qualidade das águas superficiais; considerado como um compartimento em boa situação ambiental e dos seus recursos hídricos.
	2 (bacia do Rio Piraí)	
Porção intermediária	3 (bacia do Rio Guandu)	Predomínio de áreas naturais; presença considerável de unidades de conservação; disponibilidade de água superficial elevada em razão da transposição, aproveitada para a geração hidrelétrica; há comprometimento da qualidade das águas superficiais no Rio dos Macacos, na UHP 4, com situação preocupante nas APPs de cursos d'água; balanços hídricos com situação, em geral, confortável; considerado com muito boa condição ambiental e dos recursos hídricos, sendo os problemas quali-quantitativos localizados.
	4 (bacia do Rio Guandu)	
	5 (bacia do Rio Guandu)	
Calha fluvial principal	7 (bacia do Rio Guandu)	Responsável pela condução das águas transpostas até a captação de água da ETA Guandu e das captações das indústrias e termoeletricas; situação preocupante das APPs de cursos de água; elevada disponibilidade hídrica na calha do Rio Guandu por conta da transposição; alta demanda de captação pela ETA Guandu.
	8 (bacia do Rio Guandu)	
Porção leste	6 (bacia do Rio Guandu)	Elevada concentração populacional; predomínio de áreas antropizadas urbanizadas; presença de remanescentes vegetais e algumas importantes unidades de conservação; situação do uso do solo nas APPs chega a muito preocupante. Elevado lançamento de carga orgânica nos cursos de água; disponibilidades hídricas superficiais baixas, e demandas elevadas.
	10 (bacia do Rio Guandu-Mirim)	
	12 (bacia Litorânea - ME)	

Bloco	UHP (bacia hidrográfica)	Síntese
Porção oeste	11 (bacia Litorânea – MD)	Diversidade de situações: UHP 9 com predomínio de áreas antropizadas, uso do solo nas APPs de cursos de água preocupante, alta disponibilidade hídrica subterrânea, atividades minerais intensas e presença do centro de tratamento de resíduos (CTR Rio), em Seropédica, com riscos de contaminação; UHP 11 com predominância de áreas naturais, presença significativa de Unidades de Conservação, comprometimento localizado de águas superficiais, principalmente em Mangaratiba.
	9 (bacia do Rio da Guarda)	

Fonte: PERH Guandu (AGEVAP, 2018).

3.3 CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS

A base de dados construída para executar a metodologia proposta e subsidiar as análises realizadas foi organizada na forma de uma matriz ambiental, apresentada na Tabela 4 com as fontes e as informações utilizadas. Ressalta-se que parte das informações obtidas foi compilada e convertida para a subdivisão geográfica de UHPs no PERH Guandu (AGEVAP, 2018).

Tabela 4: Base de dados (matriz ambiental) da Região Hidrográfica do Rio Guandu(RH-II) com as informações utilizadas e suas fontes.

Caracterização geral	Resolução CERHI-RJ nº 107 de 2013; ANA/SONDOTECNICA (2006)
Demografia	IBGE (2010)
Esgotamento sanitário	SNIS (2019, 2015, 2014 E 2012); ANA/SONDOTECNICA (2006); AGEVAP/SEP CONSULTORIA (2014)
Disponibilidade hídrica	Hidroweb, INEA; ANA/SONDOTECNICA (2006); DNOS; CEMADEN; CPRM
Demandas hídricas	PERH Guandu (AGEVAP, 2018)
Enquadramento dos rios	Resolução Comitê Guandu nº 107, de 29 de abril de 2014
Hidrografia	SIGA-Guandu
Socioeconomia	IBGE (2017)

3.4 CLASSIFICAÇÃO DOS IMPACTOS DA POPULAÇÃO SEM TRATAMENTO DE ESGOTO SOBRE O SERH

A avaliação dos impactos das UHPs decorrentes do lançamento do esgoto doméstico da população nos seus corpos hídricos foi feita com o uso de testes de similaridade. Essa etapa se baseou na metodologia utilizada por Tavares (2019).

O teste de similaridade foi feito no *software* livre *Past (Paleontological Statistics software package for education)* (HAMMER et al., 2001), que permite a geração de um dendrograma de similaridade para a formação de agrupamentos, a partir de uma matriz de dados inserida pelo usuário e do uso de técnicas classificatórias multivariadas. Os dendrogramas foram construídos segundo o método das médias aritméticas de grupos não ponderados (UPGMA), que é uma técnica SAHN (SNEATH e SOKAL, 1973), a qual considera cada dado de entrada como um indivíduo, que são agrupados de forma sucessiva, baseando-se em sua proximidade. Vão se formando, assim, pares de indivíduos mais próximos até a reunião de todos os indivíduos em um único grupo.

O dendrograma é a representação gráfica dos passos dos agrupamentos na forma de um diagrama de árvore, que permite a observação das alterações dos níveis de similaridade para as sucessivas etapas do agrupamento, onde o eixo vertical contempla o nível de similaridade ou dissimilaridade; o eixo horizontal, os indivíduos; e as linhas verticais partindo dos indivíduos agrupados têm altura correspondente ao nível que os indivíduos são considerados semelhantes (VICINI, 2005). Foi utilizada como medida de dissimilaridade a distância euclidiana entre os indivíduos. Quanto maiores as distâncias, menores as semelhanças entre indivíduos ou subgrupos.

Os dados de saneamento utilizados foram obtidos no PERH Guandu, o qual realizou uma estimativa da população das UHPs combinando dados censitários do IBGE com técnicas de SIG, e utilizou as informações referentes às capacidades de atendimento das estações de tratamento de efluentes da RH-II. Para a parcela da população desprovida de tratamento de efluentes, o PERH Guandu considerou os abatimentos relativos ao tipo de esgotamento que é dado às cargas orgânicas previamente ao descarte nos mananciais hídricos, como no caso de fossas sépticas (AGEVAP, 2018).

Os testes de similaridade foram realizados para a análise das UHPs em termos de impactos decorrentes da sua população sem tratamento de esgoto (Tabela 5) sobre o SERH, a partir das informações de população total sem tratamento, que é proporcional ao total de

cargas orgânicas domésticas lançadas por UHP. A partir desta metodologia, foi possível verificar as semelhanças e as diferenças (distâncias euclidianas) que existem entre as UHPs em termos de impactos sobre o SERH.

Tabela 5: População total com e sem tratamento (n° hab) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

UHP	Nome da UHP	n°hab		
		População	Pop. c/ tratamento	Pop. s/ tratamento
1	Rio Pirai - montante res. Santana	23492	1239	22253
2	Rio Pirai - res. Santana e afluentes	64129	1766	62363
3	Ribeirão das Lajes - montante reservatório	1426	102	1324
4	Ribeirão das Lajes - jusante reservatório	60274	15190	45084
5	Rios Santana e São Pedro (Afluentes Alto Guandu)	26901	1713	25188
6	Rios Queimados e Ipiranga (Afluentes Baixo Guandu)	344958	49699	295259
7	Rio Guandu	29703	7145	22558
8	Canal de São Francisco	26287	6487	19800
9	Rio da Guarda	171577	18433	153144
10	Rio Guandu-Mirim	832862	178909	653953
11	Bacias Litorâneas (MD)	27281	7429	19852
12	Bacias Litorâneas (ME)	333314	66901	266413

Fontes: PERH Guandu (AGEVAP, 2018) e IBGE (2010).

Os algoritmos de agrupamento não apresentam solução para a determinação do número ideal de grupos. Uma maneira de determiná-lo é por meio do exame do dendrograma. Assim, neste estudo a definição do número de categorias foi feita pelo princípio de se equilibrar o maior nível de similaridade possível dentro dos grupos com a existência de um número prático e razoável dos mesmos (PIETROBOM e BARROS, 2006; SANTOS, 2010).

Dessa forma, a partir da análise das distâncias euclidianas dos dendrogramas, foram feitas as partições das UHPs em *Classes de impacto*, referentes aos impactos provocados pelas UHPs, em função dos lançamentos de efluentes domésticos sobre os seus corpos hídricos. Ao final, foram quatro *Classes de impacto* definidas: baixo impacto, médio impacto, alto impacto e muito alto impacto.

3.5 ANÁLISE DA MANUTENÇÃO DO SERH

Para essa etapa da metodologia foi proposto como indicador de manutenção do SERH o comprometimento hídrico das UHPs, parâmetro relacionado à capacidade de autodepuração dos corpos hídricos, obtido a partir da integração de três sub-indicadores: vazão de diluição de efluentes (Q_{dil}), vazão retirada (retiradas) (Q_{ret}) e disponibilidade hídrica (Q_{dis}) nos cursos d'água da RH-II.

A vazão de diluição de efluentes (Q_{dil}) é a vazão necessária para diluição de um efluente em um corpo hídrico, em função de um determinado parâmetro de qualidade outorgável, como a DBO. Ela é calculada com base na classe em que o corpo hídrico receptor está enquadrado (ANA, 2013), e representa o quanto de água um usuário se apropria para diluir os seus efluentes. Este conceito foi proposto por Kelman (1997) e é baseado na equação de mistura. A Equação 1 é sugerida pelo autor para o cálculo da Q_{dil} , sendo utilizada por órgãos que fazem a gestão de outorgas (SUDERHSA, 2006; ANA, 2013).

$$Q_{dilx} = Q_{efl} * \frac{C_{efl} - C_{max}}{C_{max} - C_{nat}}$$

(Equação1)

Onde:

Q_{dilx} - vazão de diluição de um poluente “x” em um trecho do rio ($m^3 s^{-1}$);

Q_{efl} - vazão do efluente lançado pelo usuário ($m^3 s^{-1}$);

C_{efl} - concentração do poluente lançado no local ($mg L^{-1}$);

C_{max} - concentração máxima permitida do poluente no corpo d'água, conforme enquadramento ($mg L^{-1}$);

C_{nat} - concentração natural do poluente no corpo hídrico ($mg L^{-1}$).

Na Equação 1, C_{nat} representa a concentração natural do parâmetro no corpo receptor, imediatamente à montante da seção onde é realizado o lançamento (mgL^{-1}) e, em muitos casos, não se tem essa informação. Na ausência de estudos, ANA (2013) considera no cálculo a C_{nat} de DBO de $1mgL^{-1}O_2$. Neste estudo, admitiremos que C_{nat} é igual a zero, como é feito pela Superintendência de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA, 2006) na análise de pleitos de outorga para lançamento individual de efluentes, a fim de avaliar o comprometimento das condições associado a cada usuário.

As classes dos rios e os seus respectivos limites para teores de DBO (C_{max}) são definidas pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (CONAMA, 2005). O enquadramento

vigente dos corpos hídricos da RH-II foi definido na Resolução Comitê Guandu nº 107, de 29 de abril de 2014 (COMITÊ, 2014).

Os dados de carga orgânica lançada em efluentes domésticos por UHP obtidos no PERH Guandu consideram um valor de carga potencial per capita de $54\text{ghab}^{-1}\text{dia}^{-1}$ para fins de cálculo de DBO lançado, conforme Von Sperling (2014). A concentração de DBO do esgoto doméstico (C_{efl}) considerada neste estudo foi de 300mgL^{-1} , valor médio baseado em Jordão e Pessoa (2014) e Sant'anna Jr. (2010), que relatam uma faixa entre 100 e 500mgL^{-1} O_2 de DBO em esgotos domésticos brasileiros.

A partir das informações de carga potencial per capita de DBO e concentração de DBO em efluentes domésticos (C_{efl}), estimou-se a vazão desses efluentes (Q_{efl}) em $180\text{Lhab}^{-1}\text{dia}^{-1}$, o que configura uma taxa de retorno de 0,58 com relação ao volume consumido estimado pelo PERH Guandu de $310\text{Lhab}^{-1}\text{dia}^{-1}$. Os dados de vazão (Q_{efl}) e concentração (C_{efl}) de DBO em efluentes industriais foram obtidos do cadastro de usuários de outorgas do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) e estão disponíveis no PERH Guandu (AGEVAP, 2018).

Foram então calculadas e somadas as vazões de diluição dos lançamentos domésticos e industriais de cada UHP, resultando em um valor de vazão de diluição total, conforme Equação 2.

$$Q_{\text{dil}_{\text{ind}}} + Q_{\text{dil}_{\text{dom}}} = Q_{\text{dil}_{\text{tot}}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$Q_{\text{dil}(\text{ind})}$ – vazão de diluição de efluentes industriais ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

$Q_{\text{dil}(\text{dom})}$ – vazão de diluição de efluentes domésticos ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

$Q_{\text{dil}(\text{tot})}$ – vazão de diluição total ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

A soma entre $Q_{\text{dil}(\text{tot})}$ e Q_{ret} resulta nas denominadas “demandas totais” (D_t) das UHPs, que representam neste estudo a demanda total por volume de água para o suprimento do SERH (Q_{dil}) e provisão de água (Q_{ret}) (Equação 3). A comparação entre essas demandas foi realizada de forma complementar a análise proposta neste item para uma melhor compreensão quali-quantitativa das demandas totais na RH-II.

$$D_t = Q_{dil_{tot}} + Q_{ret}$$

(Equação 3)

Onde:

D_t – demandas totais (m³ s⁻¹);Q_{dil(tot)} – vazão de diluição total (m³ s⁻¹);Q_{ret} – vazão retirada para abastecimento (m³ s⁻¹).

Enquanto Q_{dil} e Q_{ret} representam demandas por SEHs, a disponibilidade hídrica (Q_{dis}) representa a oferta desses benefícios. A Q_{dis} utilizada nesta análise consiste na disponibilidade hídrica modificada das UHPs da RH-II, segundo definição do PERH Guandu (AGEVAP, 2018), que é a vazão existente nos principais rios que passam pelas suas UHPs, onde são diluídos os seus efluentes não tratados, e retirados os volumes de água destinados a provisão. O termo “modificada” refere-se a infraestrutura hidráulica presente que altera a vazão natural dos seus rios. Portanto, trata-se da disponibilidade hídrica real, que resulta dos efeitos das transposições sobre o volume natural dos corpos hídricos da RH-II, sendo referida neste estudo simplesmente como disponibilidade hídrica, em oposição à disponibilidade hídrica “natural”, considerada na análise do item 3.6.1.

Os valores de disponibilidade hídrica (modificada e natural) utilizados neste estudo estão em termos de Q₉₅, o que significa que em 95% do tempo a vazão naquele ponto é igual ou superior ao valor apresentado. Em geral, a ANA adota como vazão de referência a Q₉₅ por considerar que o risco de 5% é um valor médio entre os riscos considerados toleráveis pelos diversos setores usuários (ANA, 2013).

Como a água para abastecimento não está disponível para diluição da carga orgânica, o cálculo do comprometimento hídrico se dá através da razão entre Q_{dil(tot)} e a disponibilidade hídrica resultante (Q_{res}), que consiste na disponibilidade hídrica restante após as retiradas das UHPs.

$$Q_{dis_{res}} = Q_{dis} - Q_{ret}$$

(Equação 4)

Onde:

Q_{dis(res)} – disponibilidade hídrica resultante após as retiradas (m³ s⁻¹);Q_{dis} – disponibilidade hídrica (modificada) (m³ s⁻¹);Q_{ret} – vazão retirada para abastecimento (m³ s⁻¹).

O comprometimento hídrico (CH%) das UHPs, utilizado neste estudo como indicador da manutenção do SERH, quantifica em termos percentuais a relação entre a sua demanda e oferta (Equação 5). Sendo assim, a relação entre o volume de água necessário para a diluição das suas cargas orgânicas lançadas (de acordo com os respectivos enquadramentos vigentes dos seus rios principais) e o volume de água existente para tal após as retiradas pelos sistemas de captação (FRANCISCO e OLIVEIRA, 2009; ANA, 2013; INEA, 2014).

$$CH\% = \frac{Q_{dil_{tot}}}{Q_{dis_{res}}} * 100$$

(Equação 5)

Onde:

CH% - comprometimento hídrico (%);

$Q_{dil(tot)}$ – vazão de diluição total ($m^3 s^{-1}$);

$Q_{dis(res)}$ – disponibilidade hídrica resultante após as retiradas ($m^3 s^{-1}$).

Valores de CH% superiores a 100 indicam que a vazão final da UHP, após as retiradas, não é capaz de diluir as cargas orgânicas lançadas por ela. Valores abaixo denotam um potencial de contribuição para a diluição de cargas orgânicas de origem externa à UHP (AGEVAP, 2015). A partir dessas considerações, os resultados do CH% das UHPs da RH-II foram utilizados para classificá-las em termos de balanço de contribuição ao SERH: negativo, com CH% superior a 100; e positivo, com CH% inferior a 100.

A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros utilizados para os cálculos e a classificação do balanço de contribuição das UHPs ao SERH realizados neste item. Os dados de cargas orgânicas lançadas, vazão e concentração de efluentes industriais (Q_{efl} e C_{efl}), disponibilidade hídrica (Q_{dis}) e retiradas (Q_{ret}) foram obtidos no PERH Guandu – 2018 (AGEVAP, 2018). A vazão dos efluentes domésticos foi estimada a partir dos dados de cargas orgânicas lançadas e considerando uma concentração de DBO dos efluentes de $300mg L^{-1}$.

Tabela 6: Cargas orgânicas lançadas (kgDBOdia^{-1}), vazão dos efluentes (Q_{eff}) ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), concentração de DBO em efluentes (C_{eff}) (mgL^{-1}), disponibilidade hídrica modificada (Q_{dis}) e retiradas (Q_{ret}) (m^3s^{-1}) nas unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

UHP	Efluentes domésticos			Efluentes industriais			m^3s^{-1}	
	kgDBOdia^{-1}	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	mg L^{-1}	kgDBOdia^{-1}	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	mg L^{-1}		
	Cargas org. lanç.	Q_{eff}	C_{eff}	Cargas org. lanç.	Q_{eff}	C_{eff}	Q_{dis}	Q_{ret}
1	1026,40	0,0396	300	0,00	0,0000	0	2,21	0,116
2	2848,30	0,1099	300	2011,70	0,1990	117	1,97	0,165
3	60,00	0,0023	300	0,00	0,0000	0	10,03	0,233
4	2162,80	0,0834	300	583,20	0,0150	450	122,04	6,037
5	1129,70	0,0436	300	0,00	0,0000	7	3,82	1,267
6	13742,50	0,5302	300	2385,90	0,0350	789	2,47	0,942
7	1058,10	0,0408	300	0,00	0,0000	0	126,33	50,933
8	943,40	0,0364	300	314,50	0,0260	140	126,47	27,963
9	7043,80	0,2718	300	1449,80	0,0180	932	2,53	0,295
10	31522,10	1,2161	300	240,30	0,0270	103	1,49	0,507
11	836,80	0,0323	300	0,00	0,0000	0	3,6	0,424
12	12823,80	0,4947	300	571,30	0,0250	264	1,15	0,178

Fontes: Sant'anna Jr. (2010), Jordão e Pessoa (2014) e PERH Guandu (AGEVAP, 2018).

3.6 ANÁLISE DA DINÂMICA DO SERH

Para a análise da dinâmica do SERH foram combinados os resultados do indicador CH% com as características da hidrografia da RH-II para a construção de um diagrama do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica, representando as transferências do agente carreador (água) de um compartimento (UHP) para o outro, e a contribuição das UHPs em termos de potencial de diluição dos efluentes (autodepuração). O diagrama permite a visualização da dinâmica do SERH, ao representar as mudanças no balanço de contribuição que ocorrem ao longo da RH-II nas UHPs, possibilitando uma análise espacial da relação entre a sua demanda e oferta. Apresenta-se na Figura 4 o diagrama base para a análise do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica na RH-II.

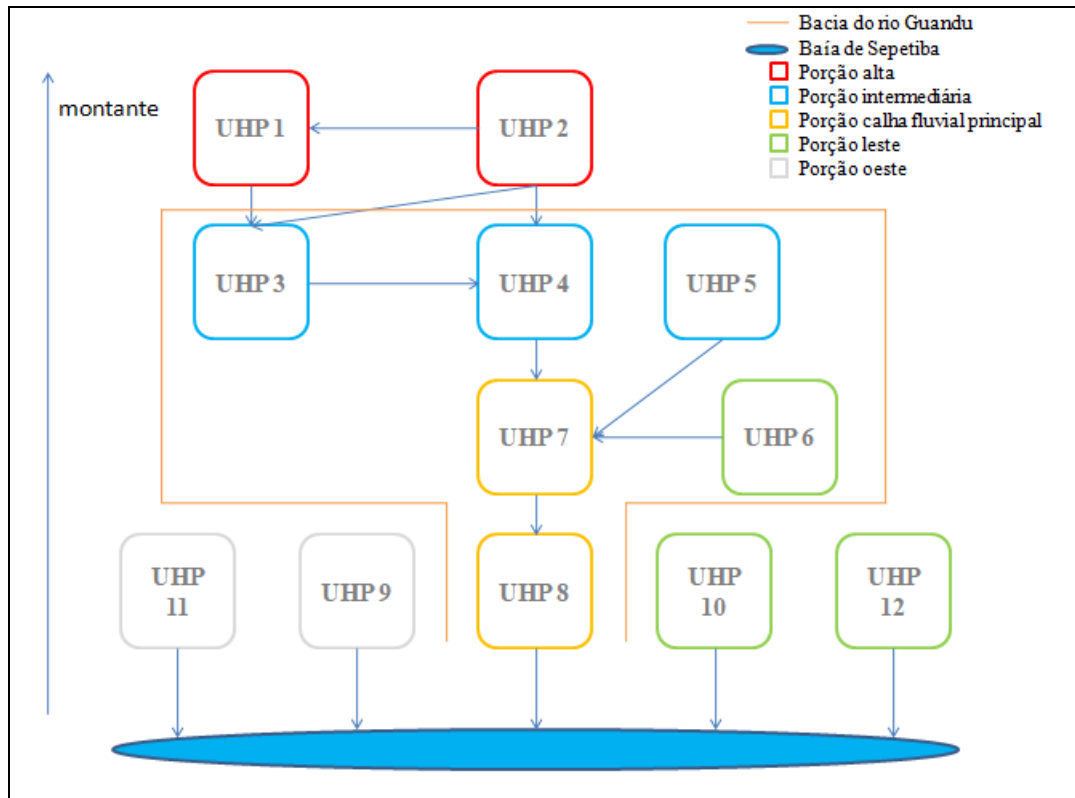


Figura 4: Diagrama base para análise do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica sinalizando o transporte de água entre as unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

3.7 EFEITOS DA INFRAESTRUTURA HIDRÁULICA SOBRE A DINÂMICA E A MANUTENÇÃO DO SERH

Para a análise do efeito da infraestrutura hidráulica sobre a dinâmica e manutenção da regulação hídrica, repetiram-se os procedimentos realizados nos itens 3.5 e 3.6 para um cenário alternativo denominado natural, que considera a disponibilidade hídrica natural ($Q_{dis(nat)}$) dos corpos hídricos da RH-II. Ou seja, a disponibilidade hídrica hipotética caso não houvesse transposições e as retiradas fossem feitas somente para o consumo interno (consumos) das UHPs. Os dados de $Q_{dis(nat)}$ e consumo das UHPs foram obtidos no PERH Guandu (AGEVAP, 2018) e são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Disponibilidade hídrica natural ($Q_{\text{dis(nat)}}$) e consumos ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

UHP	m^3s^{-1}	
	$Q_{\text{dis(nat)}}$	Consumos
1	5,79	0,099
2	7,56	0,178
3	2,54	0,011
4	4,63	0,410
5	3,82	0,096
6	2,47	1,073
7	8,92	0,925
8	9,05	0,452
9	2,53	0,999
10	1,49	2,620
11	3,6	0,100
12	1,15	0,855

Fonte: AGEVAP, 2018.

Calculou-se a diferença entre os resultados de CH% do cenário natural, aqui calculados, e do cenário real, calculados no item 3.5, para medir a influência da infraestrutura hidráulica e, portanto, das transposições dos Rios Piraí e Paraíba do Sul para a BHRG, sobre o balanço de contribuição das UHPs da RH-II ao SERH. Os resultados de CH% do cenário natural servem para apresentar o contraste entre as condições hídricas naturais das UHPs e o total de cargas orgânicas lançadas em seus corpos hídricos. Complementarmente, o cenário real expõe o quanto essa situação é alterada em cada UHP devido às alterações nas vazões dos seus rios decorrentes das transposições, que permitem a retirada de um grande volume de água pelos sistemas de captação.

Foi também construído um diagrama do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica no cenário natural, cujo contraste com o cenário real permite a análise das mudanças na dinâmica desse serviço decorrentes da infraestrutura hidráulica da RH-II.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS IMPACTOS DA POPULAÇÃO SEM TRATAMENTO DE ESGOTO SOBRE O SERH

Apresenta-se na Figura 5 o dendrograma gerado a partir do teste de similaridade feito para os dados de população total sem tratamento das UHPs, que embasou a classificação das mesmas nas quatro *Classes de impacto* (baixo, médio, alto e muito alto) expostas na Tabela 8, em conjunto com o índice de tratamento das UHPs.

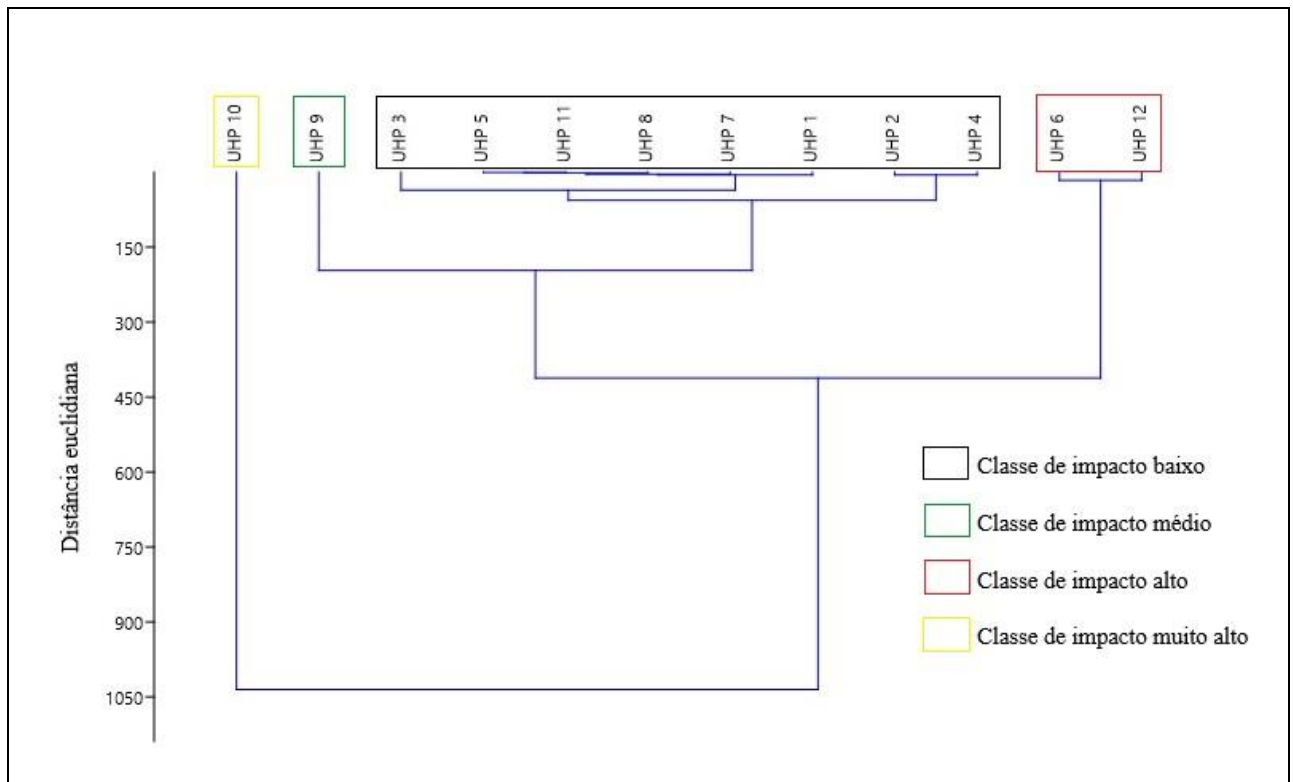


Figura 5: Dendrograma de similaridade gerado no *software Past* a partir das distâncias euclidianas entre as unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II) e o agrupamento realizado em *Classes de impacto* de população total sem tratamento de esgoto (nº mil. hab.).

Tabela 8: Índice de tratamento de esgoto (%), população total sem tratamento (n° hab) e *Classe de impacto* (baixo, médio, alto e muito alto) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

UHP	Nome da UHP	%	n° hab	Classe de impacto
		Índice de tratamento de esgoto	População total s/ tratamento	
1	Rio Pirai - montante res. Santana	5,3	22.253	Baixo
2	Rio Pirai - res. Santana e afluentes	2,8	62.363	Baixo
3	Ribeirão das Lajes - montante reservatório	7,2	1.324	Baixo
4	Ribeirão das Lajes - jusante reservatório	25,2	45.084	Baixo
5	Rios Santana e São Pedro (Afluentes Alto Guandu)	6,4	25.188	Baixo
6	Rios Queimados e Ipiranga (Afluentes Baixo Guandu)	14,4	295.259	Alto
7	Rio Guandu	24,1	22.558	Baixo
8	Canal de São Francisco	24,7	19.800	Baixo
9	Rio da Guarda	10,7	153.144	Médio
10	Rio Guandu-Mirim	21,5	653.953	M. Alto
11	Bacias Litorâneas (MD)	27,2	19.852	Baixo
12	Bacias Litorâneas (ME)	20,1	266.413	Alto

Fonte: PERH Guandu (AGEVAP, 2018) e IBGE (2010).

O índice de tratamento de esgoto das UHPs da RH-II varia entre 2,8% (UHP 1) e 27,2% (UHP 11). A média nacional é de 40%, e da região Sudeste 50%, o que evidencia a distância da condição de tratamento de esgoto das UHPs da RH-II de uma situação adequada, dada a sua importância hídrica para a região. A população total sem tratamento da RH-II é de 1.587.191 habitantes.

Observa-se no dendrograma (Figura 5) que a UHP 10 apresentou a maior distância euclidiana (1040) com relação às demais. Isto se deve ao fato desta UHP abranger grande parte da RMRJ, com alta densidade populacional, e um índice de tratamento de esgoto de 21,5%. Essa UHP pode ser considerada a de maior impacto sobre o SERH na RH-II, com uma população que equivale a mais que o dobro da segunda colocada nesse quesito (UHP 6), diferenciando-as em termos de *Classe de impacto*. Assim, a UHP 10 integrou sozinha a *Classe de impacto* muito alto.

A *Classe de impacto* alto (distância euclidiana = 420) foi composta pelas UHP 6 e UHP 12, ambas com mais de 250.000 habitantes sem tratamento. A UHP 6 é formada majoritariamente pelas bacias dos Rios Queimados, Ipiranga e dos Poços, e é caracterizada por uma intensa ocupação urbana, pelos polos industriais e pelo baixo nível de eficiência do tratamento de esgoto. A UHP 12 tem como principal destino dos efluentes o Rio Cabuçu-

Piraquê, que possui boas condições de água na nascente, onde a ocupação humana é rarefeita, mas, após atravessar a área urbana dos bairros da Zona Oeste do Rio de Janeiro, tem as suas condições comprometidas.

A *Classe de impacto* médio (distância euclidiana = 200) foi formada unicamente pela UHP 9, bacia vizinha à do Rio Guandu (UHP 8), com 153.144 habitantes sem tratamento. É uma UHP com predomínio de áreas antropizadas e com as APPs de cursos de água em situação considerada “preocupante”, segundo o PERH Guandu (AGEVAP, 2018).

A *Classe de impacto* baixo abrange as UHPs com totais de população sem tratamento abaixo de 70.000 habitantes (UHP 1, UHP 2, UHP 3, UHP 4, UHP 5, UHP 7, UHP 8 e UHP 11). Somadas, as populações sem tratamento de todas as UHPs da *Classe de impacto* baixo são inferiores a qualquer uma das UHPs da *Classe de impacto* alto (UHP 6 e UHP 12), ficando na casa das dezenas de milhares, e constituem menos de um terço da população sem tratamento da UHP 10 (*Classe de impacto* muito alto). As UHPs da *Classe de impacto* baixo estão em áreas com predomínio de áreas naturais (florestas e pastagens) e baixa taxa de urbanização, com exceção da UHP 8, que possui 35% da sua cobertura ocupada por áreas urbanas, mas que é a menor UHP da RH-II, o que se reflete na sua população relativamente baixa.

4.2 ANÁLISE DA MANUTENÇÃO DO SERH

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para a análise da manutenção e do balanço de contribuição das UHPs ao SERH na RH-II.

Tabela 9: Resultados de vazão de diluição de cargas orgânicas domésticas ($Q_{dil(dom)}$), industriais ($Q_{dil(ind)}$) e totais ($Q_{dil(tot)}$) ($m^3 s^{-1}$), comprometimento hídrico (CH%) nos cenários real e natural, balanço de contribuição ao serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) (positivo ou negativo), demandas totais ($m^3 s^{-1}$) e participação das demandas por provisão de água e regulação hídrica (%) nas demandas totais (indicadores Q_{ret} e Q_{dil}) por unidade hidrológica de planejamento (UHP) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

UHP	Nome da UHP	$m^3 s^{-1}$				%		real		natural		%
		$Q_{dil(dom)}$	$Q_{dil(ind)}$	$Q_{dil(tot)}$	Dt	Provisão (Q_{ret})	Reg. Híd. (Q_{dil})	%	Balanço	%	Balanço	Δ CH
								CH		CH		
1	Rio Pirai - montante res. Santana	2,34	0,00	2,34	2,45	5	95	112	Negativo	41	Positivo	-71
2	Rio Pirai - res. Santana e afluentes	6,48	4,46	10,94	11,11	1	99	606	Negativo	148	Negativo	-458
3	Ribeirão das Lajes - montante reservatório	0,23	0,00	0,23	0,46	50	50	2	Positivo	9	Positivo	7
4	Ribeirão das Lajes - jusante reservatório	4,92	1,34	6,26	12,30	49	51	5	Positivo	148	Negativo	143
5	Rios Santana e São Pedro (Afluentes Alto Guandu)	2,57	0,00	2,57	3,84	33	67	101	Negativo	69	Positivo	-32
6	Rios Queimados e Ipiranga (Afluentes Baixo Guandu)	31,28	5,49	36,77	37,71	2	98	2406	Negativo	2632	Negativo	226
7	Rio Guandu	2,41	0,00	2,41	53,34	95	5	3	Positivo	30	Positivo	27
8	Canal de São Francisco	2,15	0,70	2,85	30,81	91	9	3	Positivo	33	Positivo	30
9	Rio da Guarda	16,03	3,34	19,37	19,67	2	98	867	Negativo	1265	Negativo	399
10	Rio Guandu-Mirim	71,75	0,53	72,28	72,79	1	99	7353	Negativo	-6395	Negativo	-
11	Bacias Litorâneas (MD)	1,90	0,00	1,90	2,33	18	82	60	Positivo	54	Positivo	-6
12	Bacias Litorâneas (ME)	29,19	1,30	30,49	30,67	1	99	3137	Negativo	10328	Negativo	7192
-	Total	171,26	17,15	188,41	277,47	-	-	-	-	-	-	-

A vazão de diluição calculada para toda a RH-II foi de $188\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, o que significa que esse é o volume estimado de água necessária para que o SERH seja suficiente para equacionar o lançamento dos efluentes da RH-II em termos de cargas orgânicas, considerando a DBO como parâmetro das condições bioquímicas da água. As condições químicas e biológicas da água que chega a ETA – Guandu evidenciam que, como um todo, a capacidade de autodepuração dos corpos hídricos da RH-II não é suficiente para uma diluição satisfatória dos efluentes nela lançados (AGEVAP, 2018). Ressalta-se que essa estimativa feita baseia-se nos dados oficiais, não considerando os possíveis lançamentos clandestinos, e que não foi realizada coleta de água ou monitoramento para confirmar os dados de lançamento.

A UHP com maior comprometimento hídrico é a UHP 10, que abrange parte da RMRJ. Seria necessária uma disponibilidade hídrica 74 vezes maior do que a existente para a diluição adequada dos seus efluentes. Ela é seguida nesse quesito pela UHP 12, com 3137 de CH%, e UHP 6, com 2406 de CH%. A UHP6 é a que mais requer vazão para diluição dos seus efluentes industriais ($5,49\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, o que representa 15% da sua vazão de diluição total demandada).

As UHP 10, UHP 12 e UHP 6 são as mais populosas da RH-II, e também têm em comum o fato de não possuírem diferenças entre as suas disponibilidades hídricas naturais e modificadas (Tabelas 6 e 7, respectivamente), o que significa que a transposição das águas da bacia do Rio Paraíba do Sul não altera as vazões dos seus corpos hídricos, sendo estas muito desproporcionais às cargas orgânicas lançadas, em função dos índices de tratamento de esgoto que não ultrapassam 22% (Tabela 9). São essas características que colocam as três como as UHPs mais comprometidas em termos de manutenção do SERH na RH-II.

Das UHPs com balanço negativo de contribuição (com CH% superior a 100) restantes, UHP 9 (867%) e UHP 5 (101%), igualmente às anteriores, não possuem diferenças entre a disponibilidade hídrica natural e modificada; e UHP 1 (112%) e UHP 2 (606%) possuem disponibilidades hídricas modificadas inferiores às naturais, devido à infraestrutura hidráulica presente que as reduzem em 62 e 74%, respectivamente.

As UHPs com balanço positivo (CH% inferior a 100) são aquelas cujas disponibilidades hídricas são suficientes para a diluição das suas cargas orgânicas e, portanto, podem contribuir para a diluição de efluentes de origem externa. As UHPs com menor CH% e, portanto, melhor manutenção do SERH são as UHP 4, UHP 7 e UHP 8, com Q_{dis} acima de $120\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, e comprometimento hídrico não ultrapassando 5%, em função do incremento no volume de água decorrente das transposições. A UHP 3 também tem sua vazão favorecida

pela infraestrutura hidráulica existente, contribuindo para a diluição de efluentes, porém em menor proporção, com Q_{dis} de $10\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, e CH% de 2.

Das UHPs com balanço positivo, somente a UHP 11 não possui alteração positiva da sua vazão no cenário real, sendo destas a de menor Q_{dis} (Tabela 6) e maior CH% (Tabela 9). Sua população, na casa dos 27.000 habitantes, representa somente 1,4% da população total da RH-II, e é a UHP que apresenta o melhor índice de tratamento de esgoto (Tabela 8), fatores que explicam a sua situação de manutenção do SERH, e a sua presença como uma exceção entre as UHPs com balanço positivo. Ainda assim, possui CH% superior a 50, o que significa que mais da metade da sua disponibilidade hídrica é requerida pelos seus usuários para diluição das suas cargas orgânicas.

As atividades industriais na RH-II requerem uma vazão de diluição de cerca de $17\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, o que corresponde à aproximadamente 9% das cargas orgânicas totais lançadas, considerando os dados de outorgas do INEA, havendo ainda a possibilidade de lançamentos clandestinos. Na UHP 2, com CH% de 606, os lançamentos industriais são responsáveis por 40% da vazão de diluição demandada.

Ressalta-se que a metodologia utilizada considera que a água chega às UHPs com concentração nula de DBO ($C_{nat}=0$) para avaliar os seus papéis individuais na dinâmica do SERH dentro dos limites da RH-II. A realidade encontrada é ainda mais grave, visto que as águas transpostas dos Rios Paraíba do Sul e Pirai já não se encontram em condições químicas e biológicas ideais, e os poluentes vão se acumulando ao longo das UHPs, de modo que mesmo os rios com alta Q_{dis} em UHPs com baixa $Q_{dil(tot)}$ se encontram com as condições comprometidas, como é o caso do Rio Guandu na UHP 7 (AGEVAP, 2018). Devido à grande concentração de esgotos domésticos e industriais que são lançados sem tratamento nas suas águas, a bacia do Rio Paraíba do Sul é vulnerável a poluição e a freqüentes acidentes ambientais (MALAFAIA et al., 2012), além da poluição adicional decorrente do escoamento superficial, principalmente em áreas urbanas (BISCAINO NETO et al., 2015).

Segundo Malafaia et al. (2012), o volume transposto para a BHRG é três vezes maior do que o necessário para abastecer o Rio de Janeiro por razões de diluição de efluentes. Essa afirmação vai ao encontro da análise das participações nas demandas totais da vazão de diluição total (que indica a demanda por regulação hídrica) e retiradas (que indicam a demanda por provisão de água), como se observa na Figura 6. As demandas de água para diluição de efluentes equivalem a aproximadamente 68% das demandas totais, sendo 62% para efluentes industriais, e 6% para domésticos. Isto representa pouco mais que o dobro do

volume retirado pelos sistemas de captação da RH-II, responsável pelo seu abastecimento e de grande parte da RMRJ. No entanto, essa demanda não é inteiramente atendida, haja visto as condições da água que chega a ETA Guandu.

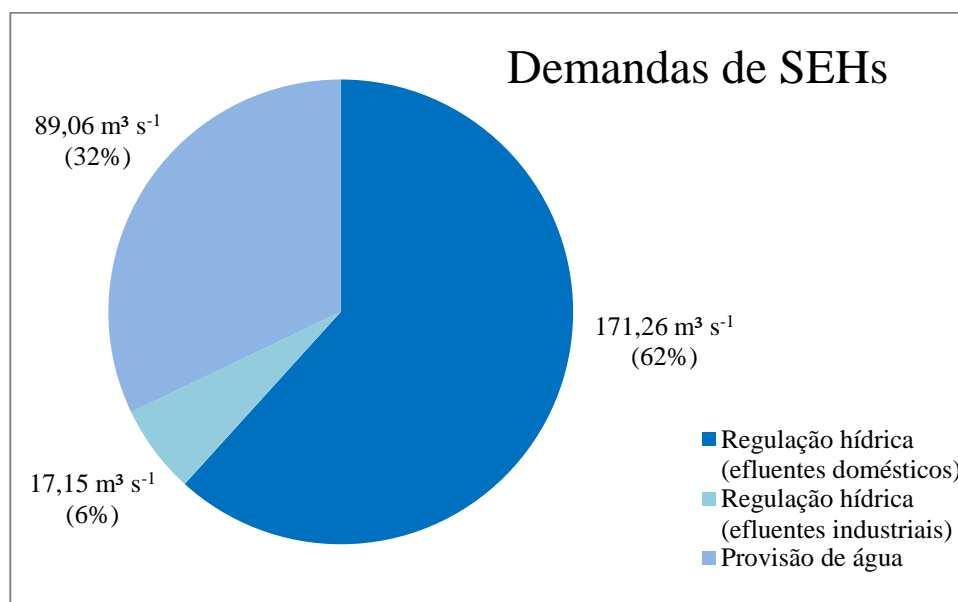


Figura 6: Demandas de uso da água em termos absolutos ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e relativos (%) para provisão de água e regulação hídrica de efluentes domésticos e industriais da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

As UHP 7 e UHP 8, em função dos baixos índices populacionais (que resultam em uma relativamente baixa vazão de diluição) e das volumosas retiradas decorrentes dos sistemas de abastecimento, são as que apresentam maior parte das suas demandas totais relativas às retiradas (provisão de água), seguidas da UHP 4, onde também há retiradas para exportação, porém em menor volume, tendo uma população superior às das UHP 7 e UHP 8 somadas, o que equilibra a participação entre as demandas por esses SEHs. A UHP 3 também apresenta equilíbrio entre as demandas, porém em uma escala menor, por ser a UHP de menor população, e uma das menores em termos de retiradas (Tabelas 5 e 6).

As demais UHPs apresentaram uma demanda muito maior de água para a diluição de seus efluentes (regulação hídrica) do que para retiradas (provisão de água), conforme se observa no gráfico da Figura 7, em que se apresenta a participação em termos percentuais das demandas pelos serviços ecossistêmicos de regulação hídrica (vazão de diluição) e de provisão de água (retiradas) nas demandas totais das UHPs.

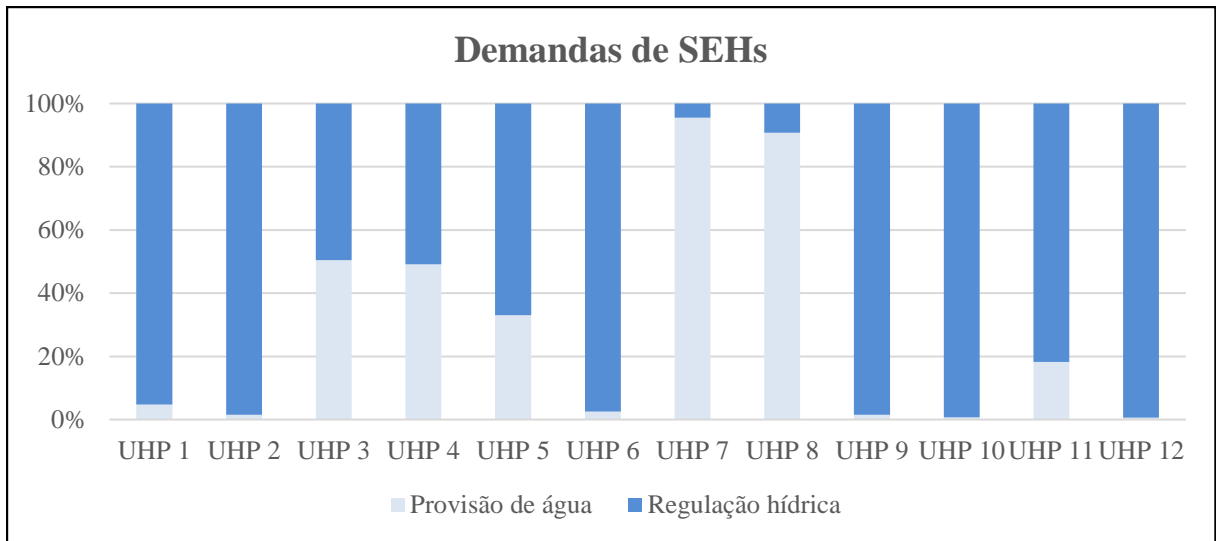


Figura 7: Percentuais das demandas totais requeridos para os serviços ecossistêmicos de regulação hídrica ($Q_{dil(tot)}$) e provisão de água (Q_{ret}) por unidade hidrológica de planejamento (UHP) da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II).

4.3 ANÁLISE DA DINÂMICA DO SERH

A dinâmica do SERH nas UHPs da RH-II foi esquematizada, conforme a Figura 8. O diagrama do fluxo ecossistêmico resultante sinaliza o transporte da água (agente carreador) entre os compartimentos (UHPs) da RH-II e a contribuição das UHPs em termos de manutenção da regulação hídrica (balanço positivo ou negativo de contribuição), a partir do indicador CH%.

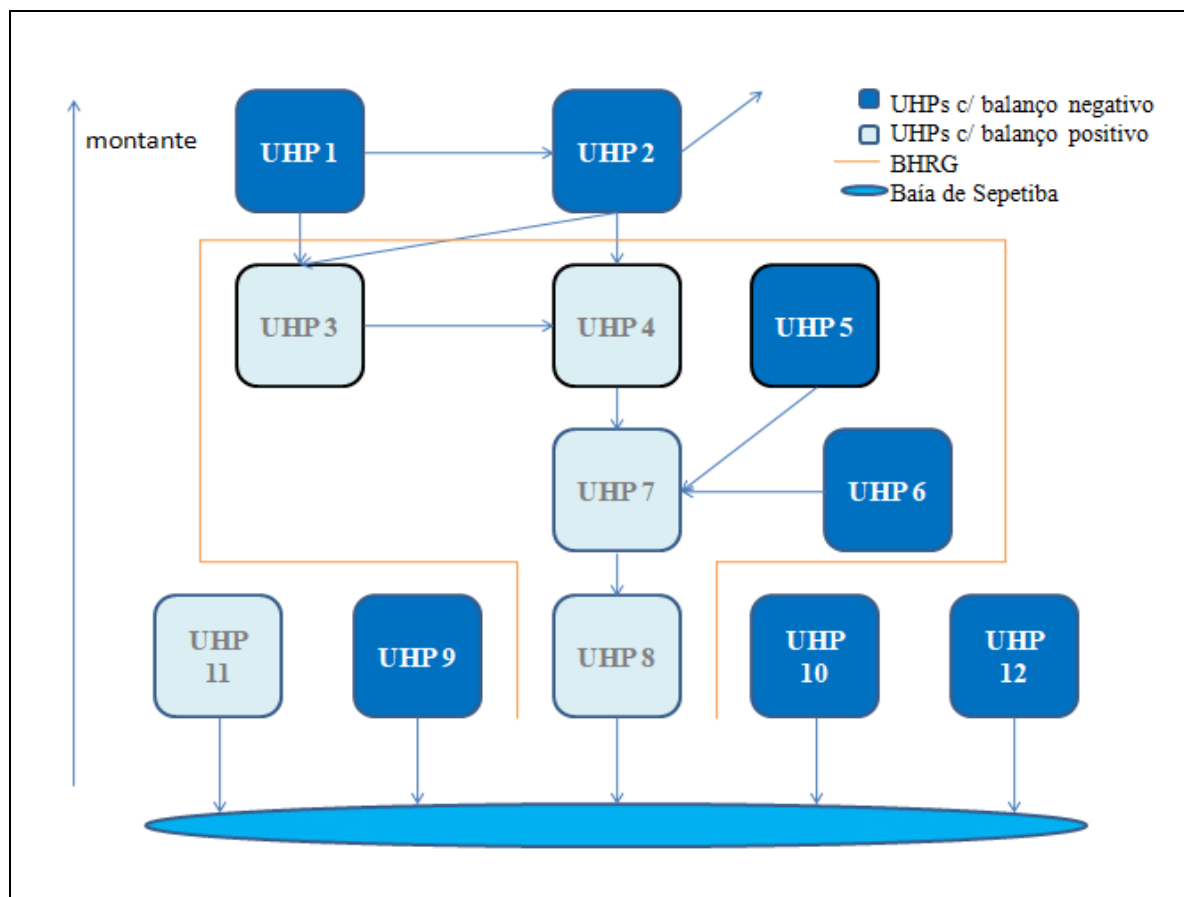


Figura 8: Diagrama do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II) sinalizando o balanço de contribuição das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs), no cenário real.

As UHPs da porção alta (UHP 1 e UHP 2) contribuem com um volume de água que ajuda a diluir os efluentes na RH-II. Essas UHPs pertencem à bacia do Rio Piraí, e se conectam com as UHP 3 e UHP 4 da BHRG, através de barragens e estações elevatórias. No caso da UHP 1, o CH% acima de 100 ocorre somente por essa perda do volume de água que é transposto para a UHP 3, o que pode ser verificado pelo resultado do CH% no cenário natural. A UHP 2 apresenta CH% acima de 100 nos dois cenários, porém a infraestrutura hidráulica aumenta este comprometimento em aproximadamente quatro vezes, o que reduz a sua capacidade de manutenção do SERH, e aumenta a das UHPs que recebem o volume transposto.

As UHP3 e UHP 4 contribuem positivamente para a diluição de efluentes, enquanto a UHP 5, que complementa a porção intermediária da RH-II à leste, negativamente. Essa é a porção que alimenta a calha fluvial principal da RH-II (UHP 7 e UHP 8) com o volume recebido das transposições, conferindo-a um grande aumento na disponibilidade hídrica.

A calha fluvial principal da RH-II, relativa ao Rio Guandu, apresenta uma baixa relação entre a vazão de diluição requerida pelos seus efluentes e a disponibilidade hídrica, com CH% igual a 3 (Tabela 9). Isso ocorre devido à sua alta disponibilidade hídrica resultante das contribuições naturais à montante e, principalmente, do volume acrescido pelas transposições dos Rios Paraíba do Sul e Piraí, sendo esta a porção de maior disponibilidade hídrica da RH-II (Tabela 6). Por esta razão, é o local em que são realizadas as captações de aproximadamente $51\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ do Sistema Guandu e $28\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ do Canal de São Francisco. Além disso, são UHPs com um baixo número de habitantes.

Verifica-se, a partir do diagrama da Figura 8, o comprometimento hídrico de toda a porção leste da RH-II, que é a mais populosa e urbanizada da região, e cujas vazões não são afetadas pelas transposições, sendo insuficientes para a diluição dos seus efluentes. Essa porção tem uma alta demanda pelo SERH, e os seus impactos poderiam ser drasticamente reduzidos com melhores níveis de tratamento de esgoto. A UHP 6, com extremo comprometimento hídrico das suas vazões e uma grande vazão de diluição demandada (Tabela 9), é a única UHP da porção leste conectada ao Rio Guandu, com grandes impactos sobre as condições da água que chega a ETA Guandu. As demais UHPs constituem bacias separadas que contribuem diretamente para a baía de Sepetiba.

As UHPs da porção oeste da RH-II (UHP 11 e UHP 9) também constituem bacias que contribuem diretamente para a baía de Sepetiba. São UHPs de muito menor impacto que as da porção leste, como se observa pelos valores de vazão de diluição calculados (Tabela 9), e sem influência sobre as condições da água que chega à ETA Guandu.

Apresenta-se na Figura 9 o mapa da capacidade de manutenção do SERH na RH-II, considerando a infraestrutura hidráulica existente (cenário real) e indicando o balanço de contribuição das UHPs, a partir dos resultados de CH%.

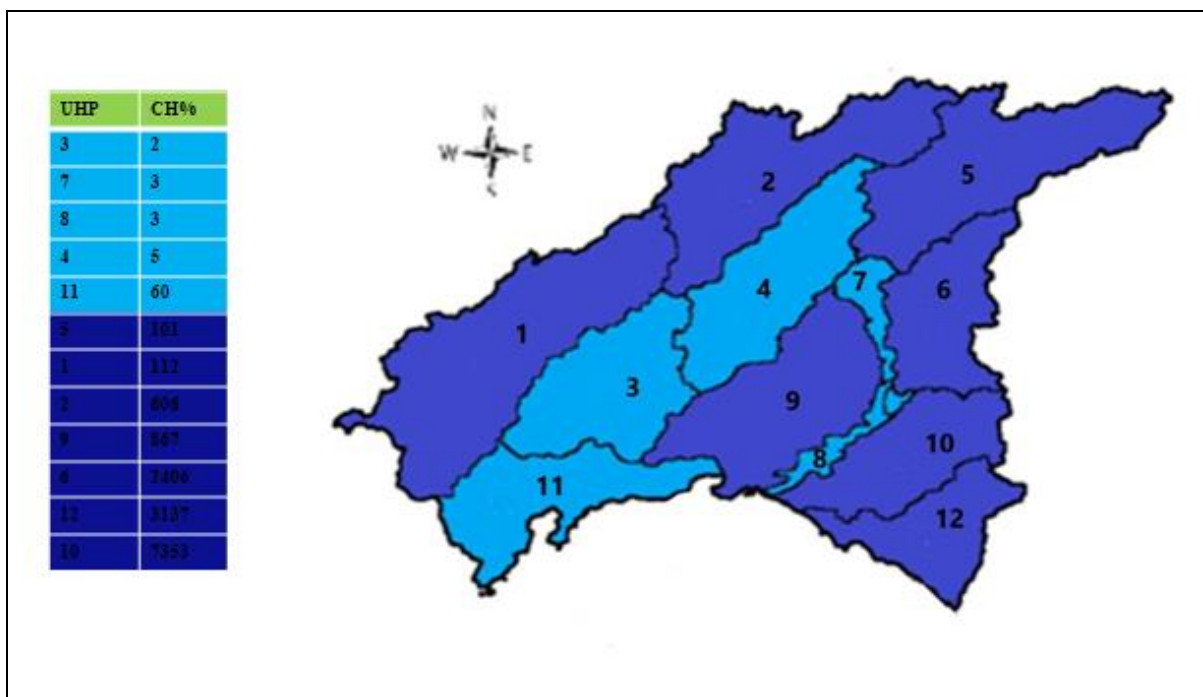


Figura 9: Mapa da capacidade de manutenção do serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs), sinalizando o balanço de contribuição das UHPs (positivo ou negativo), a partir do indicador de comprometimento hídrico (CH%), no cenário real.

4.4 ANÁLISE DOS EFEITOS DA INFRAESTRUTURA HIDRÁULICA SOBRE A MANUTENÇÃO E A DINÂMICA DO SERH

As UHP 3, UHP 4, UHP 7 e UHP 8, com resultado positivo de delta comprometimento hídrico ($\Delta\text{CH}\%$), possuem melhor desempenho do indicador no cenário real por serem beneficiadas pelo volume proveniente das transposições. Já as UHP 6, UHP 9 e UHP 12, que não têm a disponibilidade hídrica alterada pelas transposições, possuem um $\Delta\text{CH}\%$ positivo pelo fato de que as captações feitas nessas UHPs são inferiores às suas necessidades. Como o cenário natural considera que as UHPs retiram da sua própria vazão a água para consumo, essas UHPs têm uma menor disponibilidade hídrica para a diluição de efluentes nesse cenário, o que significa um maior comprometimento hídrico.

A UHP 10, que também é uma UHP importadora de água, teve um resultado negativo para o indicador por ter um consumo superior à sua disponibilidade hídrica (Tabela 7). Isso significa que o seu rio principal sequer seria capaz de suprir a sua demanda por abastecimento no cenário natural, estando indisponível para a diluição de efluentes. Sendo assim, é uma UHP naturalmente insustentável, em termos de consumo de água e diluição de cargas orgânicas lançadas.

As UHPs com resultado negativo de $\Delta CH\%$ são desfavorecidas quanto à manutenção do SERH pelo efeito negativo da infraestrutura hidráulica sobre as suas vazões (UHP 1 e UHP 2), ou por serem UHPs que consomem menos do que captam, isto é, que exportam água (UHP 5 e UHP 12). No caso das UHP 5 e UHP 12, o cenário natural desconsidera as suas exportações, o que aumenta a sua disponibilidade hídrica e a sua capacidade de autodepuração, reduzindo os resultados de $CH\%$ obtidos para este cenário.

Esses efeitos denotam as interrelações existentes entre as captações e os lançamentos de efluentes na RH-II, como citado em ANA (2013). Captações retiram água dos corpos hídricos, o que minimiza a sua capacidade de autodepuração e, portanto, de regulação hídrica. Os lançamentos de efluentes, ao requererem volumes de água para diluição, indisponibilizam parte da água que poderia ser captada, reduzindo o fornecimento de SEHs de provisão, além de encarecer os custos com tratamento da água.

O diagrama do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica no cenário natural é apresentado abaixo para ilustrar a análise dos efeitos das transposições sobre o mesmo (Figura 9).

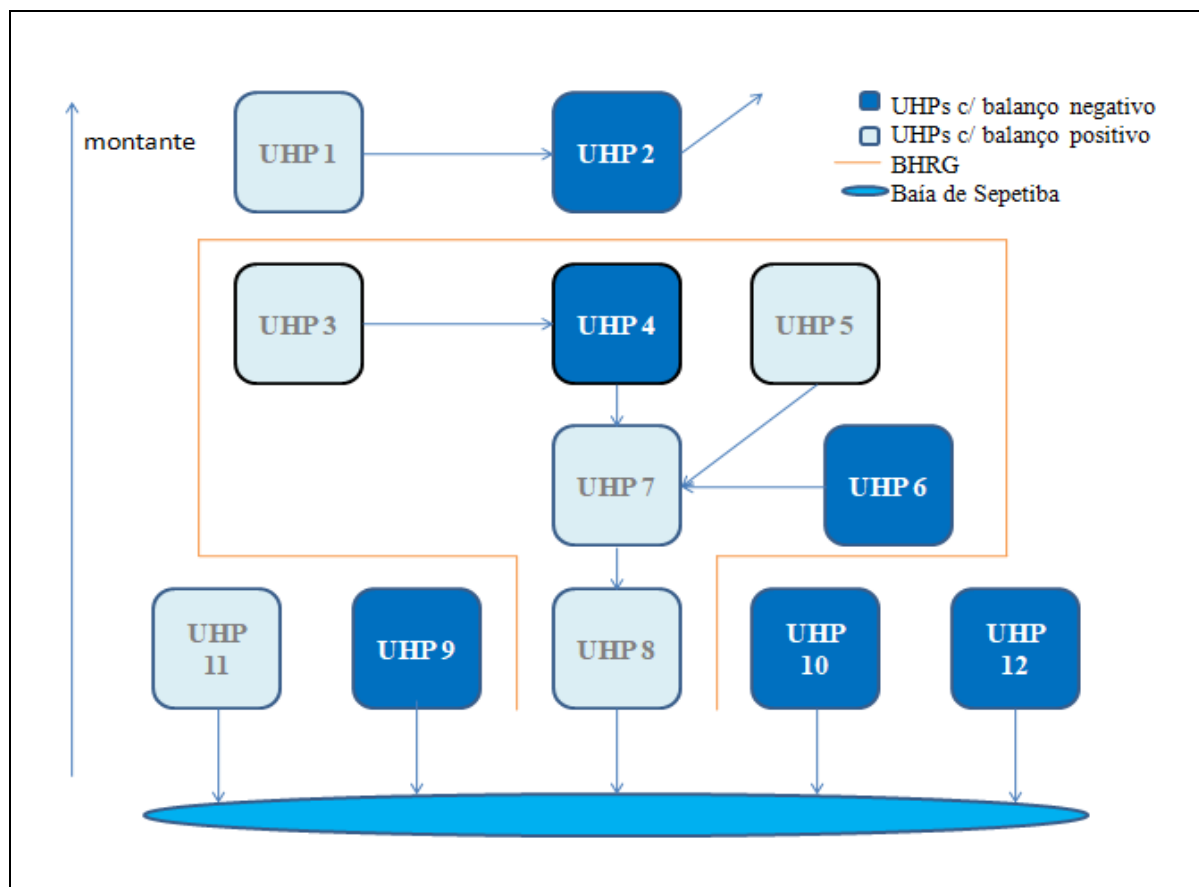


Figura 10: Diagrama do fluxo ecossistêmico de regulação hídrica da Região Hidrográfica do Rio Guandu (RH-II) sinalizando o balanço de contribuição das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs), no cenário natural.

Observa-se, a partir da análise do diagrama, que as UHPs da porção alta (UHP 1 e UHP 2), pertencentes à bacia do Rio Pirai, não se conectam à BHRG no cenário natural, em função da ausência das transposições. Portanto, as suas contribuições para o fluxo ecossistêmico estudado para as outras UHPs decorrem diretamente da infraestrutura hidráulica existente. Ao não se considerarem os volumes transpostos, a UHP 1 apresentou um menor CH% no cenário natural, em que possui maior disponibilidade hídrica.

A UHP 4, por não receber o volume de águas do Rio Pirai no cenário natural, perde o seu potencial de contribuição positiva ao SERH. Calculou-se 148 de CH% neste cenário, havendo um aumento de 143% com relação ao cenário real. Essa é a UHP de maior aumento relativo da vazão decorrente da transposição, e possui retiradas bem inferiores às das UHPs da calha fluvial principal (UHP 7 e UHP 8), o que lhe confere o balanço hídrico ($Q_{dis} - Q_{ret}$) mais positivo da RH-II (Tabela 6).

A UHP 3, que também deixa de receber as contribuições diretas do Rio Pirai no cenário natural, tem a sua disponibilidade hídrica reduzida em aproximadamente 75% neste cenário. Os valores baixos de vazão de diluição e demandas para consumo interno, decorrentes da baixa densidade populacional, mantém o seu balanço de contribuição positivo.

As UHP 7 e UHP 8 também perdem muito em potencial de diluição, mas permanecem com balanço positivo de contribuição pelos valores de CH%, no cenário natural. Em termos percentuais, há um aumento do comprometimento hídrico de aproximadamente 30%, apesar da queda superior a 1.000% das disponibilidades hídricas locais. Isso se dá pelas volumosas retiradas realizadas nessas UHPs no cenário real, que contrabalanceiam, em parte, o aumento da disponibilidade hídrica resultante das transposições. Sendo assim, em condições naturais, as UHP 7 e UHP 8 continuariam contribuindo positivamente para o SERH, mas com menor potencial, e sem contribuir para a provisão de água fora dos seus limites.

A UHP 5 é uma exportadora de água e, por isso, mesmo sem ter diferenças de disponibilidade hídrica entre cenários, já que não recebe volume de água das transposições, o seu balanço de contribuição torna-se positivo no cenário natural, já que este cenário desconsidera as exportações de água. Isso significa que a contribuição dessa UHP para a provisão de água fora dos seus limites torna insuficiente o volume dos seus corpos hídricos para a diluição dos seus efluentes. Já a UHP 6 apresenta agravamento no quadro de CH% no cenário natural, por ser uma UHP importadora de água, sendo um caso inverso ao da UHP 5.

A UHP 6, cujos efluentes atingem o Rio Guandu, e as demais UHPs da RH-II, que constituem bacias desconectadas da BHRG, não tiveram a sua classificação em termos de balanço de contribuição alterada no cenário real, mas houve alterações nos valores de CH%, o que indica mudanças nos seus potenciais de diluição.

Apresenta-se na Figura 11 o mapa da capacidade de manutenção do SERH na RH-II, considerando as suas condições naturais (cenário natural), indicando o balanço de contribuição das UHPs, a partir dos resultados de CH% obtidos para este cenário.

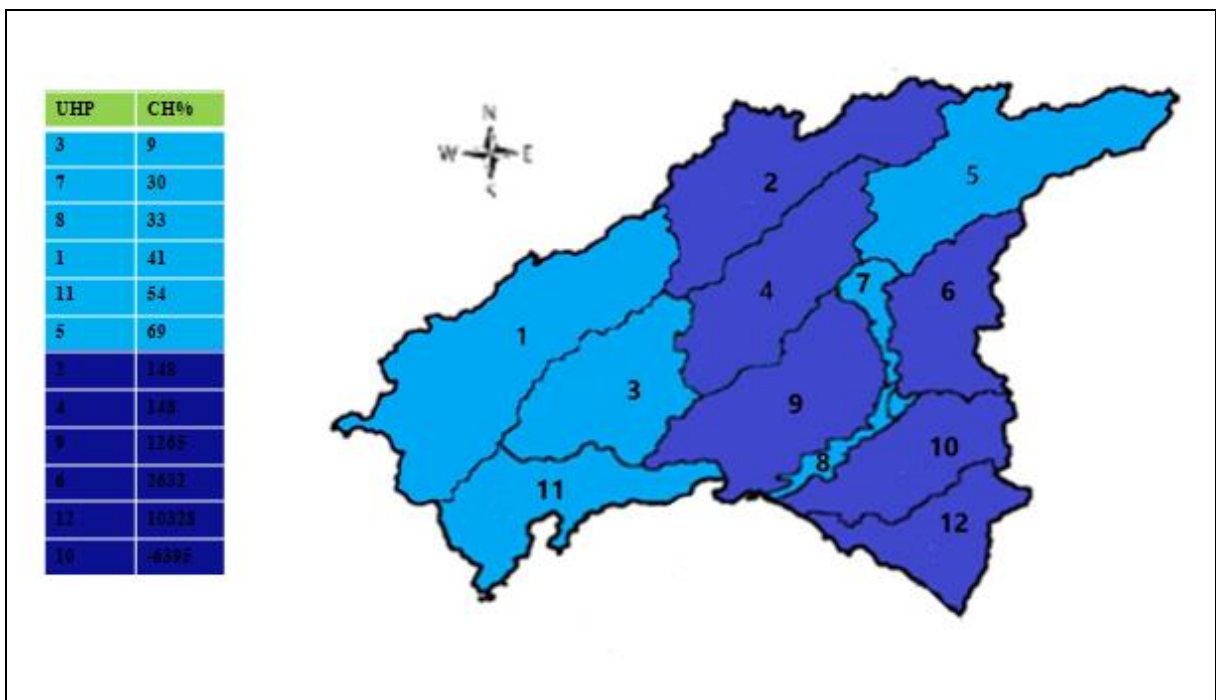


Figura 11: Mapa da capacidade de manutenção do serviço ecossistêmico de regulação hídrica (SERH) das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs), sinalizando o balanço de contribuição das UHPs (positivo ou negativo), a partir do indicador de comprometimento hídrico (CH%), no cenário natural.

5. CONCLUSÕES

Foi possível avaliar a contribuição das UHPs e os impactos da infraestrutura hidráulica presente sobre a dinâmica e manutenção do SERH na RH-II, a partir de indicadores. A metodologia mostrou-se efetiva, ao integrar informações de diferentes tipos e fontes em uma análise de utilidade prática para a gestão dos recursos hídricos, recomendando-se a sua replicação em outras bacias ou regiões hidrográficas.

Apesar da relevância da BHRG para o estado do Rio de Janeiro, e da existência de inúmeras estações instaladas para o monitoramento dos seus corpos hídricos por diferentes entidades, há um grande déficit e inconsistência nos dados de qualidade da água e vazão disponíveis. A compilação dos dados existentes, e a extrapolação por meio de modelagem para toda a região, feitos pela AGEVAP (2018), tornaram possível a aplicação desta metodologia na RH-II, sendo uma alternativa a ser explorada em estudos como este em bacias com limitações de dados.

As deficiências do sistema de tratamento de esgoto têm profundos impactos sobre o SERH na RH-II, podendo as UHPs serem classificadas, conforme proposto neste estudo, em 4 *Classes de impacto*: baixo (UHP 1, UHP 2, UHP 3, UHP 4, UHP 5, UHP 7, UHP 8 e UHP 11), médio (UHP 9), alto (UHP 6 e UHP 12) e muito alto (UHP 10).

As demandas de água para regulação hídrica equivalem ao dobro das demandas para provisão de água na RH-II, mesmo esta sendo uma região de volumosas retiradas para abastecimento, não só das suas necessidades internas, mas também de parte da RMRJ fora dos seus domínios.

Cinco UHPs apresentaram balanço positivo de contribuição ao SERH, e sete, negativo. Na ausência das transposições, seriam seis UHPs com balanço positivo, e seis, negativo. No entanto haveria uma grande perda da capacidade de autodepuração dos corpos hídricos das UHPs que mais contribuem para o fornecimento do SERH, além da provisão de água: UHP 4, UHP 7 e UHP 8.

As transposições decorrentes da infraestrutura hidráulica existente modificam a dinâmica natural da RH-II, ao conectar as bacias dos Rios Pirai e Paraíba do Sul ao Rio Guandu, conferindo-o um grande aumento de disponibilidade hídrica e conseqüente aumento da regulação hídrica nas UHP 3, UHP 4, UHP 7 e UHP 8. O impacto sobre as UHP 1 e a UHP 2, pertencentes à bacia do Rio Pirai, é negativo, em função da redução da disponibilidade hídrica decorrente das transposições. As UHP 9, UHP 10, UHP 11 e UHP 12 contribuem

diretamente para a Baía de Sepetiba, sem conexão com a calha fluvial do Rio Guandu, e sem alterações na sua disponibilidade hídrica pelas transposições. Essas constatações foram possíveis a partir da análise comparativa entre resultados do cenário real e natural da RH-II.

Atualmente, existem finalizados os projetos executivos de saneamento básico para os municípios de Rio Claro, Piraí e Barra do Piraí, que, se executados, deverão impactar positivamente o SERH das UHP 1, UHP 2 e UHP 3. O segundo lote será dos projetos dos municípios de Miguel Pereira, Mendes e Vassouras, com influência sobre as UHP 2 e UHP 5. Os projetos para os municípios de Seropédica, Itaguaí, e Rio de Janeiro também estão em andamento, podendo favorecer as UHP 7, UHP 8 e UHP 9.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. p.110, 2019. Disponível em:<<http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.bb39ac07.pdf>>. Acesso em: 17 de setembro de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos. p.252, 2013. Disponível em:<<https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/manual-de-outorga.pdf>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim. Relatório gerencial. p.75, 2006. Disponível em:<<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2007/PlanoEstrategicoRHGuandu.pdf>>. Acesso em: 10 de março de 2019.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL-AGEVAP. Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim – RF.01 Relatório Final. *PERH Guandu* p.627, 2018. Disponível em:<https://www.comiteguandu.org.br/conteudo/AGVP_GUANDU_PRH-RF01_R01.pdf>. Acesso em: 19 de junho de 2019.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL-AGEVAP. Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim – RP.03 Prognóstico. *PERH Guandu* p.345, 2017. Disponível em:<http://sigaceivap.org.br:8080/publicacoesArquivos/guandu/arq_pubMidia_Processo_063-2013_P3.pdf>. Acesso em: 15 de novembro de 2019.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL-AGEVAP. Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim – Relatório de situação. *PERH Guandu* p.78, 2015. Disponível em:<<http://comiteguandu.org.br/downloads/relatorio-de-situacao-2015.pdf>>. Acesso em: 01 de julho de 2019.

BAGSTAD, K. J.; JOHNSON, G. W.; VOIGT, B.; VILLA, F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: a comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*. v.4, p.117-125, 2013.

BARBIERI, R. F.; OZMENT, S.; HAMEL, P.; GRAY, E.; MANSUR, H. L.; VALENTE, T. P.; RIBEIRO, J. B.; MATSUMOTO, M. M. Infraestrutura Natural para Água no Sistema Guandu, Rio de Janeiro. *WRI Brasil*. p.72, 2018.

BARON, J. S.; POFF, N. L.; ANGERMEIER, P. L.; DAHM, C. N.; GLEICK, P. H.; HAIRSTON JR, N. G.; STEINMAN, A. D. Meeting ecological and societal needs for freshwater. *Ecological Applications*. v.12, n.5, p.1247-1260, 2002.

BARRETO, D. Água de abastecimento urbano: por que e como economizar? *Revista AEASC.com*. n.14, ano VI, p.8-13, 2015.

BISCAINO NETO, J.; RABELO, G. C.; FREIRE, R. Efeito da poluição devido ao escoamento superficial urbano. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*. v.3, n.20, 2015

BONNET, B. R. P; FERREIRA, L. G; LOBO, F. C. Relações entre qualidade da água e uso do solo em Goiás: uma análise à escala da bacia hidrográfica. *Revista Árvore*, v. 32, n. 2, p. 311-322, 2008.

BRASIL. Decreto nº 31.178, de 03 de abril de 2002. Governo do Estado do Rio de Janeiro. Cria o Comitê da bacia hidrográfica do Guandu. Disponível em:<<http://comiteguandu.org.br/downloads/decreto-31.178.pdf>>. Acesso em: 10 de abril de 2019.

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. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 10 de setembro de 2019.

BRASIL. Resolução CERHI-RJ 107, de 22 de maio de 2013. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Definição das regiões hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro e revogação da resolução CERHI nº 18 de 08 de novembro de 2006. Disponível em:<<https://www.comiteguandu.org.br/legislacoes/ResolucoesCERHI/Resolucao-CERHI-107.pdf>>. Acesso em: 11 de setembro de 2019.

BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2019.

BRASIL. Resolução CONAMA 430, de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2019.

BRASIL. Resolução COMITÊ GUANDU N° 107, de 29 de Abril de 2014. Comitê das Bacias Hidrográficas dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim – COMITÊ GUANDU. Disponível em: <<http://www.comiteguandu.org.br/conteudo/resolucao-107-29-4-2014.pdf>>

BRAUMAN, K. A.; DAILY, G. C.; DUARTE, T. K. E.; MOONEY, H. A. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*. v.32, p.67-98, 2007.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; NEDKOV, S.; MÜLLER, F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological indicators*. v.21, p.17-29, 2012.

CAMARGO, A. F. M.; PEREIRA, A. M. M. Qualidade da água em áreas urbanas. In: Recursos Hídricos e Planejamento Urbano e Regional. *Deplan – IGCE – UNESP*, 2003.

CASTRO, L. M. A. Proposição de metodologia para a avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água. *Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais*. p.321, 2007.

COMITÊ GUANDU-RJ. Acontece Guandu. *Houseongan*. 2ªed,2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO-CETESB. Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas de Amostragem. p.1-37, 2010. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2020.

COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.S.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R.V.; PARUELO, J.; RASKIN, R.G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of world's ecosystem services and natural capital. *Nature*.v.387, n.6630, p.253- 260, 1997.

COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; BRAAT, L.; KUBISZEWSKI, I.; FIORAMONTI, L.; SUTTON, P.; FARBER, S.; GRASSO, M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem services*. v.28, p.1-16, 2017.

CROKE, J. C.; HAIRSINE, P. B. Sediment delivery in managed forests: a review. *Environmental Reviews*.v.14, n.1, p.59–87, 2006.

DAILY, G. C. Nature's services. *Island Press*. v.3, p.4, 1997.

DAILY, G. C.; POLASKY, S.; GOLDSTEIN, J.; KAREIVA, P. M.; MOONEY, H. A.; PEJCHAR, L.; RICKETTS, T. H.; SALZMAN, J.; SHALLENBERGER, R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*.v.7, n.1, p.21–28, 2009.

ELIZARDO, MARCELO. Com nova baixa nos reservatórios do RJ, secretário pede economia de água. *Jornal G1*, Rio de Janeiro, 26 de agosto de 2015. Disponível em:<<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2015/08/com-nova-baixa-nos-reservatorios-do-rj-secretario-pede-economia-de-agua.html>>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2020.

FALKENMARK, M. Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. v.358, n.1440, p.2037-2049, 2003.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN G.; CARPENTER, S. R. Global consequences of land use. *Science*. v.309, n.5734, p.570-574, 2005.

FRANCISCO, C. N.; OLIVEIRA, C. A. V. Sustentabilidade hídrica da Região Hidrográfica da Baía da Ilha Grande, RJ. *XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. p.4707-4714, 2009.

GYSSSELS, G.; POESEN, J.; BOCHET, E.; LI, Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in physical geography*.v.29, n.2, p.189–217, 2005.

HAINES-YOUNG, R.; POTSCHINI, M. B. Common international classification of ecosystem services (CICES) V5. 1 and guidance on the application of the revised structure. *European Environment Agency*. v.53, 2018.

HALL, R. L.; CALDER, I. R. Drop size modification by forest canopies: measurements using a disdrometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. v.98, n.D10, p.18465–18470, 1993.

HAMMER, O; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: Paleotological Statistics software package for education and data analysis. *Palaeotologia Electronica*. 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE.Censo 2010. Disponível em:<<https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE.PIB -Produto Interno Bruto 2017. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA-IPEA. Brasil 2035 cenários para o desenvolvimento, 2017. Disponível em:<https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/170606_brasil_2035_cenarios_para_desenvolvimento.PDF>. Acesso em: 10 de janeiro de 2020.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE-INEA. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro. Relatório gerencial. p.69, 2014. Disponível em:<<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdcx/~edisp/inea0071538.pdf>>. Acesso em: 15 de abril de 2019.

JACKSON, R. B.; JOBBAGY, E. G.; AVISSAR, R.; ROY, S. B.; BARRETT, D. J.; COOK, C. W.; FARLEY, K. A.; LE MAITRE, D. C.; MCCARL, B. A.; MURRAY, B. C. Trading water for carbon with biological sequestration. *Science*. v.310, n. 5756, p.1944–1947, 2005.

JENKINS, C. H. Nutrient flux assessment in the Port waterways. *Environment Protection Authority*. p.43, 2005.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. *SEGRAC*. ed.7, 2014.

KAREIVA, P.; TALLIS, H.; RICKETTS, T. H.; DAILY, G. C.; POLASKY, S. Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services. *Oxford Scholarship Online*., p.365, 2011.

KEIM, R. F.; SKAUGSET, A. E. Modeling effects of forest canopies on slope stability. *Hydrological Processes*. v.17, n.7, p.1457–1467, 2003.

KELMAN, J. Gerenciamento de recursos hídricos. Parte I: Outorga. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.v.12, p.123-128, 1997.

LIMA, J. E. F. W. Recursos hídricos no Brasil e no mundo. *Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E)*. 2001.

MALAFAIA, J. P.; DE MIRANDA, A. C.; GOMES, H. P. A bacia do rio paraíba do sul: cenário de uma atividade de EAA partir de problemas ambientais. *Revista Científica ANAP Brasil*, v.5, n.5, 2012.

MARTÍN LÓPEZ, B.; GARCÍA-LLORENTE, M.; INIESTA ARANDIA, I.; CASTRO, A. J.; WILLAARTS, B.; AGUILERA, P. A.; MONTES, C. La Evaluación de los

serviços de los ecossistemas suministrados por las cuencas hidrográficas del sureste semiárido andaluz. *Eubacteria*. n.31, 2013.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT-MEA. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. *Island Press*. p.245, 2003.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT-MEA. Ecosystems and human well-being: wetlands and water. *World Resources Institute*. p.80, 2005.

MINISTÉRIO DAS CIDADES – SECRETÁRIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Manual para apresentação de propostas - Drenagem urbana e controle de erosão marítima e fluvial. p.40, 2011. Disponível em:<http://aprece.org.br/wp-content/uploads/2015/11/ManualDrenagem2010_2011.pdf>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.

MOONEY, H. A.; EHRLICH, P. R.; DAILY, G. E. Ecosystem services: a fragmentary history. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. p.11–19, 1997.

NAIMAN, R. J.; DECAMPS, H. The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*. v.28, n.1, p.621–58, 1997.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA-UNESCO. Relatório mundial das nações unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos – United Nations World Water Development Report 2019. p.2. Disponível em:<https://en.unesco.org/sites/default/files/wwdr_2019_main_messages.pdf>. Acesso em: 20 de março de 2019.

PAIVA BRITTO, A. L. N.; QUINTSLR, S. Redes técnicas de Abastecimento de água no Rio de Janeiro: história e dependência de trajetória. *Revista Brasileira de História & Ciências Sociais*. v.9, n.18, p.137-162, 2017.

PALOMO, I.; MARTÍN-LOPEZ, B.; POTSCHEIN, M.; HAINES-YOUNG, R.; MONTES C. National parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows. *Ecosystem Services*. v.4, p.104–116, 2013.

PERREAULT, T.; BRIDGE, G.; MCCARTHY, J. The Routledge Handbook of Political Ecology. *Routledge International Handbooks*. p.645, 2015.

PIETROBOM, M. R.; BARROS, I. C. L. Associações entre as espécies de pteridófitas em dois fragmentos de Floresta Atlântica do Nordeste Brasileiro. *Biotemas*. v.19, n.3, p.15-26, 2006.

REGUEIRA, CHICO. Cheiro e gosto ruins na água do RJ não foram por geosmina, segundo análises da UFRJ. *Jornal G1*, Rio de Janeiro, 04 de junho de 2020. Disponível

em:<<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2020/06/04/cheiro-e-gosto-ruins-na-agua-do-rj-nao-foram-causados-pela-geosmina-segundo-analises-da-ufrj.ghtml>>. Acesso em: 10 de junho de 2020.

RODRÍGUEZ, J. P.; BEARD JUNIOR, T. D.; BENNETT, E. M.; CUMMING, G. S.; CORK, S.; AGARD, J.; DOBSON, A. P.; PETERSON, G. D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, v. 11, n. 1, 2006.

SANT'ANNA JR., G. L. Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações. *Interciência*, p.418, 2010.

SANTIAGO NUNES, V. R. O setor de saneamento básico no Brasil: desafios e perspectivas. *Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro*. p.79, 2015.

SANTOS, C. A. F.; OLIVEIRA, V. R.; RODRIGUES, M. A.; RIBEIRO, H. L. C. Caracterização molecular de cultivares de cebola com marcadores microssatélites. *Embrapa Semiárido-Artigo (ALICE)*. 2010.

SCHRÖTER, M.; KOELLNER, T.; ALKEMADE, R.; ARNHOLD, S.; BAGSTAD, K. J.; ERB, K. H.; FRANK, K.; KASTNER, T.; KISSINGER, M.; LIU, J.; LÓPEZ-HOFFMAN, L.; MAESM, J.; MARQUES, A.; MARTIN-LÓPEZ, B.; MEYER, C.; SCHULP, C. J. E; THOBER, J.; WOLFF, S.; BONN, A. Interregional flows of ecosystem services: Concepts, typology and four cases. *Ecosystem Services*, v.31, p.231-241.

SEPPELT, R.; FATH, B.; BURKHARD, B.; FISHER, J. L.; GRÊT-REGAMEY, A.; LAUTENBACH, S.; PERT, P.; HOTES, S.; SPANGENBERG, J.; VERBURG, P. H.; VAN OUDENHOVEN, A. P. E. Form follows function? Proposing a blueprint for ecosystem service assessments based on reviews and case studies. *Ecological Indicators*, v.21, p.145-154, 2012.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO-SNIS. Diagnóstico dos serviços de água e esgoto. p.186, 2019. Disponível em:<http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico_AE2018.pdf>. Acesso: 20 de maio de 2020.

SNEATH, P. H.; SOKAL, R. R. Numerical taxonomy. The principles and practice of numerical classification. *W H Freeman & Co*. p.588, 1973.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL-SUDERHSA. Manual Técnico de Outorgas. p.107, 2006. Disponível em:<http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/manual_outorgas.pdf>. Acesso: 10 de março de 2019.

SYRBE, R. U.; WALZ, U. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics. *Ecological Indicators*. v.21, p.80–88, 2012.

TAVARES, P. A.; DOS SANTOS GONÇALVES, P. V.; NEVES, F. Corpos hídricos nas cidades amazônicas: Estudo sobre a provisão de serviços ecossistêmicos em áreas urbanas. Sessão Temática: biodiversidade, serviços ecossistêmicos e valoração. *XIII Encontro Nacional da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica*. p.11, 2019.

TUCCI, C. E. M. Gestão de águas pluviais urbanas. *Ministério das Cidades*.p. 192, 2005.

TUCCI, C. E. M. Indicador de sustentabilidade hídrica urbana. *Revista Gestão de Água da América Latina*. v.14, p.1-12, 2017.

VICINI, L. Análise multivariada: da teoria à prática. 2005.

VILLA, F.; VOIGT, B.; ERICKSON, J. D. New perspectives in ecosystem services science as instruments to understand environmental securities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*.v.369, n.1639, 2014.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG. v.4, ed.4, p.452, 2014.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1996.

WARD, J. V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*. v.8, n.1, p.2–8, 1989.

WORRALL, F.; SWANK, W. T.; BURT, T. P. Changes in stream nitrate concentrations due to land management practices, ecological succession, and climate: developing a systems approach to integrated catchment response. *Water Resources Research*. v.39, n.7, 2003.