



MODELAGEM DE QUALIDADE DA ÁGUA

Aplicação do SPARROW

*SPAtially Referenced
Regressions On Watershed
attributes*



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
E SANEAMENTO BÁSICO

República Federativa do Brasil

Jair Bolsonaro

Presidente da República

Ministério do Desenvolvimento Regional

Daniel Ferreira

Ministro

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Diretoria Colegiada

Veronica Sánchez da Cruz Rios (Diretora-Presidente)

Vitor Eduardo de Almeida Saback

Maurício Abijaodi Lopes de Vasconcellos

Ana Carolina Argolo Nascimento de Castro

Filipe de Mello Sampaio Cunha






MODELAGEM DE QUALIDADE DA ÁGUA

Aplicação do SPARROW

*SPAtially Referenced
Regressions On Watershed
attributes*

BRASÍLIA - DF
ANA
2022



© 2022, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Edifício Sede, Bloco M
CEP: 70.610-200 – Brasília/DF
Telefone: (61) 2109-5400 / 5252
Endereço eletrônico: <https://www.gov.br/ana/pt-br>.

COMITÊ DE EDITORAÇÃO

Joaquim Guedes Corrêa Gondim (Coordenador)
Flávio Hadler Tröger
Humberto Cardoso Gonçalves
Nazareno Araújo (Secretário Executivo)

As ilustrações, tabelas e gráficos sem indicação de fonte foram elaborados pela ANA.

Informações, críticas, sugestões, correções de dados: cedoc@ana.gov.br

Disponível também em: <http://www.ana.gov.br>

Todos os direitos reservados

É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Qualquer uso de nomes comerciais, de firmas ou de produtos é apenas para fins descritivos e não implica endosso do Governo dos Estados Unidos.

Any use of trade, firm, or product names is for descriptive purposes only and does not imply endorsement by the U.S. Government.

EQUIPE EDITORIAL

Supervisão editorial

Marcelo Luiz de Souza
Diana Leite Cavalcanti
Flávio Hadler Tröger

Revisão dos originais

Thiago Henriques Fontenelle
Daniel E. Restivo
Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes
Eber José de Andrade Pinto

Diagramação e Capa

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Adílio Lemos da Silva
Phabrica de Produções e Serviços de Propaganda e Publicidade Ltda.
Alecsander Coelho
Daniela Bissiguini
Érsio Ribeiro
Paulo Ciola

Fotografias

Banco de Imagens ANA

Produção e Projeto Gráfico

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Phabrica de Produções e Serviços de Propaganda e Publicidade Ltda.

Catálogo na fonte - CEDOC/Biblioteca

A265m Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil).

Modelagem de qualidade da água : aplicação do SPARROW : SPATIally Referenced Regressions On Watershed attributes / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. -- Brasília : ANA, 2022.

44 p. : il.

ISBN: 978-65-88101-22-3

1. Água – Qualidade. 2. Água – Uso. II. Título

CDU 543.3

Ficha catalográfica elaborada por: Fernanda Medeiros – CRB-1/1864



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO

Equipe Técnica

Coordenação Geral

Flávio Hadler Tröger
Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares

Coordenação Executiva

Diana Leite Cavalcanti
Marcelo Luiz de Souza

Coordenação Técnica

Marcelo Luiz de Souza
Daniel E. Restivo
Olivia Miller

Colaboradores

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Ana Paula Generino Montenegro
Alexandre de Amorim Teixeira
Carlos Alberto Perdigão Pessoa
Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares
Thiago Henriques Fontenelle

United States Geological Survey

Olivia Miller
Daniel E. Restivo
Brian McCallum
MacKenzie Friedrichs (KBR-Contractor)
Bruce Worstell (KBR-Contractor)

Universidade Federal do Paraná

Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes

Serviço Geológico Brasileiro

Eber José de Andrade Pinto



Rio Pardo, entre os municípios de Brodowski (SP) e Ribeirão Preto (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA





Rio Mogi-Guaçu, no limite entre Rincão (SP) e Guataporá (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA



Sumário

Apresentação	9
1. Contexto.....	11
1.1 A gestão da qualidade da água no Brasil	12
1.2 O enquadramento dos corpos de água	12
1.3 A cooperação técnica USGS-CPRM-ANA	13
2. O modelo SPARROW.....	17
2.1 Especificações do modelo	21
3. Aplicação do RSPARROW no Brasil.....	23
3.1 Estudo-piloto na bacia do rio Grande	23
3.2 Resultados	28
4. Conclusões	37
4.1 Potenciais aplicações no Brasil	37
4.2 Contribuições para a gestão da qualidade da água	38
4.3 Considerações finais	40
5. Referências bibliográficas.....	43



Rio Pardo, entre Barretos (SP) e Guará (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA



Apresentação



Conhecer a origem e dinâmica de constituintes que afetam a qualidade da água de rios e lagos é essencial para a aplicação dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos estabelecidos para assegurar a segurança hídrica no aspecto qualitativo, especialmente o enquadramento dos corpos de água em classes de qualidade.

A produção de dados hidrológicos é uma etapa inicial importante para a construção deste conhecimento. Outra etapa não menos importante e bastante complexa envolve analisar e interpretar tais informações gerando subsídios capazes de orientar a gestão da qualidade da água. Modelos de simulação da qualidade da água são ferramentas com grande potencial de dar suporte à decisão relativa às ações mais efetivas para o controle da poluição hídrica na escala da bacia hidrográfica.

Este estudo apresenta os resultados de uma cooperação técnica envolvendo o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O foco do estudo é a aplicação de uma ferramenta de modelagem com potencial de alavancar as análises de qualidade da água para a gestão dos recursos hídricos no Brasil.

O SPARROW - *SPAtially Referenced Regressions On Watershed attributes* é uma ferramenta computacional desenvolvida pelo USGS e aplicada nos Estados Unidos. Trata-se de um modelo de simulação da qualidade da água que pode ser utilizado para estimar as principais fontes poluidoras e fatores ambientais que afetam o aporte, transporte e o destino dos constituintes nos rios da bacia hidrográfica.

A experiência com o uso do SPARROW pela ANA se deu no âmbito da cooperação com o USGS a partir do desenvolvimento de um estudo de caso na bacia do Rio Grande (MG/SP). Neste estudo, a identificação das fontes de nitrogênio presentes em afluentes do rio Grande e simulações de cenários geraram informações úteis para a definição de ações de prevenção da eutrofização em reservatórios estratégicos para a segurança hídrica da região.

O potencial de aplicação dos resultados de ferramentas de modelagem como o SPARROW ilustra como a parceria entre USGS, CPRM e ANA pode ser benéfica no sentido de aperfeiçoar a gestão da qualidade da água no Brasil a partir da construção do conhecimento e da inovação.

Diretoria Colegiada da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico



Barragem de Furnas (UHE Furnas), no rio Grande
Raylton Alves/Banco de imagens ANA



1. Contexto

Um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) é assegurar a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados para os usos múltiplos, como o abastecimento humano, a irrigação, o uso industrial ou as demandas ambientais, por exemplo. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) tem atuado para atingir este objetivo desde a sua criação pela lei federal nº 9.984, de 17 de julho de 2000.

No Brasil, as seguidas crises hídricas enfrentadas na última década têm chamado a atenção em relação ao tema da qualidade das águas dos rios e reservatórios do país. Além das crises com origens em eventos climáticos críticos, há ainda a dificuldade histórica no país em universalizar o acesso aos serviços de saneamento básico para toda a população brasileira. Tudo isto justifica a crescente cobrança por ações efetivas e capazes de garantir água de boa qualidade para todos.

No entanto, a gestão da qualidade da água se apresenta como um desafio nada trivial para as instituições que possuem tal atribuição. Entre os obstáculos identificados neste processo, se faz necessária uma compreensão mais profunda sobre os processos envolvidos na degradação da qualidade da água dos rios e reservatórios, suas causas e ações mais efetivas para reduzir a poluição hídrica utilizando os instrumentos disponíveis na PNRH.

Neste trabalho apresentamos o potencial e os resultados da aplicação de uma ferramenta computacional capaz de gerar subsídios técnicos para controle da poluição e a gestão da qualidade da água no Brasil. A introdução desta ferramenta nos estudos de qualidade da água da ANA faz parte dos esforços de uma **cooperação com instituições parceiras, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM)**, firmada com o intuito de aperfeiçoar a

gestão das águas brasileiras com base na troca de conhecimentos técnicos e científicos. Cabe ressaltar que a participação dos pesquisadores do USGS ficou restrita ao suporte técnico e científico, incluindo o desenvolvimento da ferramenta de análise, sua aplicação em um estudo de caso e interpretação dos resultados, ficando qualquer recomendação ou conclusão relacionadas com o direcionamento de recursos e ações para a gestão dos recursos hídricos sob responsabilidade exclusiva da ANA.

1.1 A gestão da qualidade da água no Brasil

A lei federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), estabelecendo instrumentos para a gestão dos recursos hídricos, e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) e o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). O SINGREH busca uma gestão da água descentralizada por meio da integração entre a União e Unidades da Federação, sendo que seu caráter é participativo e assegurado pela presença dos usuários de água, sociedade civil e do poder público de todas as instâncias nos comitês de bacias hidrográficas.

Entre outros objetivos, a PNRH visa assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água em padrões de qualidade adequados aos seus respectivos usos. Para tanto, a PNRH prevê a implementação de cinco instrumentos de gestão:

- ◆ Planos de recursos hídricos;
- ◆ Enquadramento dos corpos de água em classes de qualidade, segundo os usos preponderantes da água;
- ◆ Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;
- ◆ Cobrança pelo uso de recursos hídricos;
- ◆ Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Todos estes instrumentos estão interrelacionados e buscam atingir os diversos objetivos da PNRH, incluindo a segurança hídrica em termos qualitativos. Porém, entre os ins-

trumentos citados, o enquadramento dos corpos de água em classes de qualidade é aquele que tem uma relação mais direta com a gestão da qualidade da água.

1.2 O enquadramento dos corpos de água

O enquadramento dos corpos de água em classes de qualidade, segundo os usos preponderantes da água tem como objetivo “assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas” e “diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes”.

O enquadramento oferece subsídios à outorga para o uso da água, sempre condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos e respeitando a classe em que o corpo de água estiver enquadrado. Seguindo a proposta da PNRH, o processo de enquadramento é participativo, uma vez que deve ser elaborado pelas agências de água ou entidades delegatárias vinculadas aos comitês de bacia, em articulação com os órgãos de recursos hídricos e de meio ambiente.

Para orientar o processo, a Resolução CNRH nº 91/2008 estabelece procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água, incluindo a elaboração de uma **proposta de enquadramento** que prevê etapas de **diagnóstico, prognóstico, propostas de metas relativas às alternativas de enquadramento e um programa de efetivação**.

A elaboração da proposta de enquadramento, assim como sua implementação, exige estudos para determinar os usos dos recursos hídricos na bacia e as condições de qualidade da água presentes e futuras de modo a se atingir as metas definidas na proposta e aprovadas pelos conselhos de recursos hídricos. Os **modelos de simulação de qualidade de água são componentes importantes destes estudos, uma vez que permitem a consolidação de diagnósticos mais abrangentes e precisos, capazes de indicar as principais fontes de poluição da água, seja ela de origem pontual ou difusa, e capazes de**

orientar as medidas necessárias para a garantia da qualidade da água compatível com os usos a que se destina.

No âmbito do instrumento de enquadramento, a qualidade da água bruta é avaliada basicamente por meio de parâmetros físico-químicos e biológicos. Com base nas concentrações destes parâmetros nas águas superficiais dos rios e reservatórios, a Resolução nº 357/2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), define padrões de qualidade para cinco classes distintas: Especial, 1, 2, 3 e 4.

A Classe Especial é a categoria em que a qualidade da água deve estar praticamente livre de interferências humanas, isto é, livre de lançamentos de cargas poluidoras decorrentes de atividades antrópicas. Portanto, é a classe adequada para a proteção e preservação dos ecossistemas aquáticos em sua integridade. Para as classes intermediárias são exigidos critérios de qualidade que permitem o uso da água para os usos preponderan-

tes mais comuns nas bacias. Por exemplo, para a Classe 2, são considerados como metas de enquadramento os padrões de qualidade da água bruta adequados para o abastecimento público após tratamento convencional. Por outro lado, a Classe 4 envolve padrões de qualidade da água menos exigentes, o que restringe o uso dos recursos hídricos a poucas atividades, como a navegação.

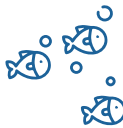










1.3 A cooperação técnica USGS/CPRM/ANA

Em 3 de junho de 2014, foi celebrado um Acordo de Cooperação Técnica (ACT) entre a ANA e a CPRM, visando a qualificação técnica de seus servidores voltada à gestão da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Em março do ano seguinte, no âmbito do referido ACT, a ANA e a CPRM decidiram assinar uma Carta de Entendimento com o USGS para a capacitação técnica de servidores sobre operação de redes hidrológicas e ferramentas relacionadas



Rio Mogi-Guaçu, entre Luiz Antônio (SP) e São Carlos (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA

USOS DA ÁGUA

		Classe ESPECIAL	Classe 01	Classe 02	Classe 03	Classe 04
	PRESERVAÇÃO DO EQUILÍBRIO NATURAL DAS COMUNIDADES AQUÁTICAS	Classe mandatória em Unidades de Conservação e Proteção Integral				
	PROTEÇÃO DAS COMUNIDADES AQUÁTICAS		Classe mandatória em Terras Indígenas			
	RECREAÇÃO COM CONTATO DIRETO					
	AQUICULTURA					
	ABASTECIMENTO PARA O CONSUMO HUMANO	Após desinfecção	Após tratamento simplificado	Após tratamento convencional	Após tratamento avançado	
	RECREAÇÃO COM CONTATO INDIRETO					
	PESCA					
	IRRIGAÇÃO		Hortalças consumidas cruas e frutas que se desenvolvem rentes ao solo e que sejam ingeridas com casca	Hortalças, frutíferas, parques, jardins, campos de esporte e lazer	Culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras	
	DESSEDENTAÇÃO DE ANIMAIS					
	NAVEGAÇÃO					
	HARMONIA PAISAGÍSTICA					

com a análise da qualidade da água e estimativas de usos de recursos hídricos. **Em 5 de agosto de 2015, USGS, CPRM e ANA celebraram o Memorando de Entendimento BR- 20.0000** como desdobramento da iniciativa das instituições de qualificação para a gestão da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

Trata-se de uma cooperação técnica internacional abrangente, com vigência prevista para 10 anos e espaço para projetos em áreas diversas da gestão de recursos hídricos. Em seu escopo foram incluídos os seguintes temas e atividades:

- ◆ Design e otimização de redes de monitoramento hidrológico;
- ◆ Sessões especiais de webinários, oficinas e treinamentos;
- ◆ Missões de sistemas de suporte;
- ◆ Missão de qualidade da água;
- ◆ Colaboração remota em estudos interpretativos.

Em setembro de 2015, representantes da CPRM e da Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos da ANA participaram de uma missão aos Estados Unidos que incluiu visitas e reuniões técnicas nos escritórios do USGS e do *United States Bureau of Reclamation*. O objetivo da missão era explorar métodos, técnicas e ferramentas que permitissem o aprimoramento das estimativas de uso da água e das análises de qualidade de água praticadas pela CPRM e ANA no Brasil.

No decorrer da missão os técnicos brasileiros avaliaram o potencial de aplicação da ferramenta de modelagem de qualidade de água em bacias hidrográficas SPARROW (Schwarz *et al.*, 2006, Alexander e Gorman Sanisaca, 2019).

O SPARROW foi desenhado pelo USGS para o desenvolvimento de modelos de simulação de qualidade de água ao nível de bacias hidrográficas. É uma ferramenta capaz de orientar ações de controle da poluição hídrica de origem pontual e difusa e simular diferentes cenários relacionados ao abatimento de cargas poluidoras e alterações do uso da terra, gerando subsídios importantes para o planejamento dos recursos hídricos e para a gestão da qualidade da água.

No âmbito da cooperação com o USGS e a CPRM, a implementação dos modelos SPARROW no Brasil ocorreu a partir de uma série de videoconferências iniciadas em 2016. Inicialmente, o SPARROW rodava somente com o pacote estatístico *Statistical Analysis System* (SAS, Statistical Analysis Systems Institute, Cary, NC, SAS Institute, Inc., https://www.sas.com/en_us/home.html), que consiste em um sistema integrado de aplicações para o processamento e análise de dados.

No entanto, à época, os pesquisadores do USGS tinham planos de desenvolver uma versão do SPARROW que não dependesse da licença SAS e que, portanto, fosse mais acessível para uma diversidade maior de instituições e usuários. Em meados de 2017, como resultado desta cooperação técnica, os pesquisadores do USGS apresentaram aos técnicos da CPRM e da ANA a versão **RSPARROW** (Alexander e Gorman Sanisaca, 2019), desenvolvida em linguagem R (R Core Team, 2022).

Além do RSPARROW, também foram apresentadas versões de uma ferramenta complementar chamada **Loadflex** (Appling *et al.*, 2015, <https://github.com/USGS-R/loadflex>), também desenvolvida em linguagem R. O Loadflex foi desenvolvido para a estimativa de cargas de constituintes da água a partir de dados produzidos pelo monitoramento hidrológico. Tais cargas são imprescindíveis para o desenvolvimento e calibração dos modelos SPARROW.

Com a nova versão do RSPARROW disponibilizada pelo USGS, os técnicos das três instituições envolvidas decidiram iniciar um estudo-piloto na bacia do rio Grande, situada na divisa entre Minas Gerais e São Paulo.

O principal intuito deste estudo-piloto era otimizar o aprendizado obtido com a cooperação, colocar em prática a implementação das técnicas estudadas e avaliar o potencial da ferramenta para a gestão da qualidade da água no Brasil.

A bacia do rio Grande foi selecionada principalmente em virtude da recente elaboração do seu plano de recursos hídricos, coordenada pela ANA, e da disponibilidade dos dados utilizados nos estudos de diagnóstico do plano.

Concomitantemente ao desenvolvimento do estudo-piloto, oficinas sobre o SPARROW e modelos de qualidade de água, estimativas de cargas poluidoras, análises estatísticas de dados hidrológicos e Linguagem R foram oferecidos a um público mais amplo no âmbito da cooperação técnica.

Estes treinamentos visavam aperfeiçoar as análises empregadas pelos técnicos, principalmente da CPRM e da ANA, em seu trabalho cotidiano, além de disseminar algumas ferramentas desenvolvidas e utilizadas em estudos hidrológicos pelo USGS.

Entre estas ferramentas, destacam-se o próprio RSPARROW, o Loadflex e o EGRET - *Exploration and Graphics for RivEr Trends*

(Hirsch and De Cicco, 2015, <https://github.com/USGS-R/EGRET>), desenvolvido para o cálculo de cargas de constituintes da água e análise de tendências em séries de dados hidrológicos.

O grande diferencial das capacitações oferecidas pelo USGS em relação a cursos regulares sobre programação em R foi a presença de instrutores que participaram do desenvolvimento das ferramentas apresentadas, com grande experiência em sua utilização e na aplicação de técnicas estatísticas em análises de dados hidrológicos, além das práticas com dados disponíveis nas bases de dados da ANA e no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.





2. O modelo SPARROW

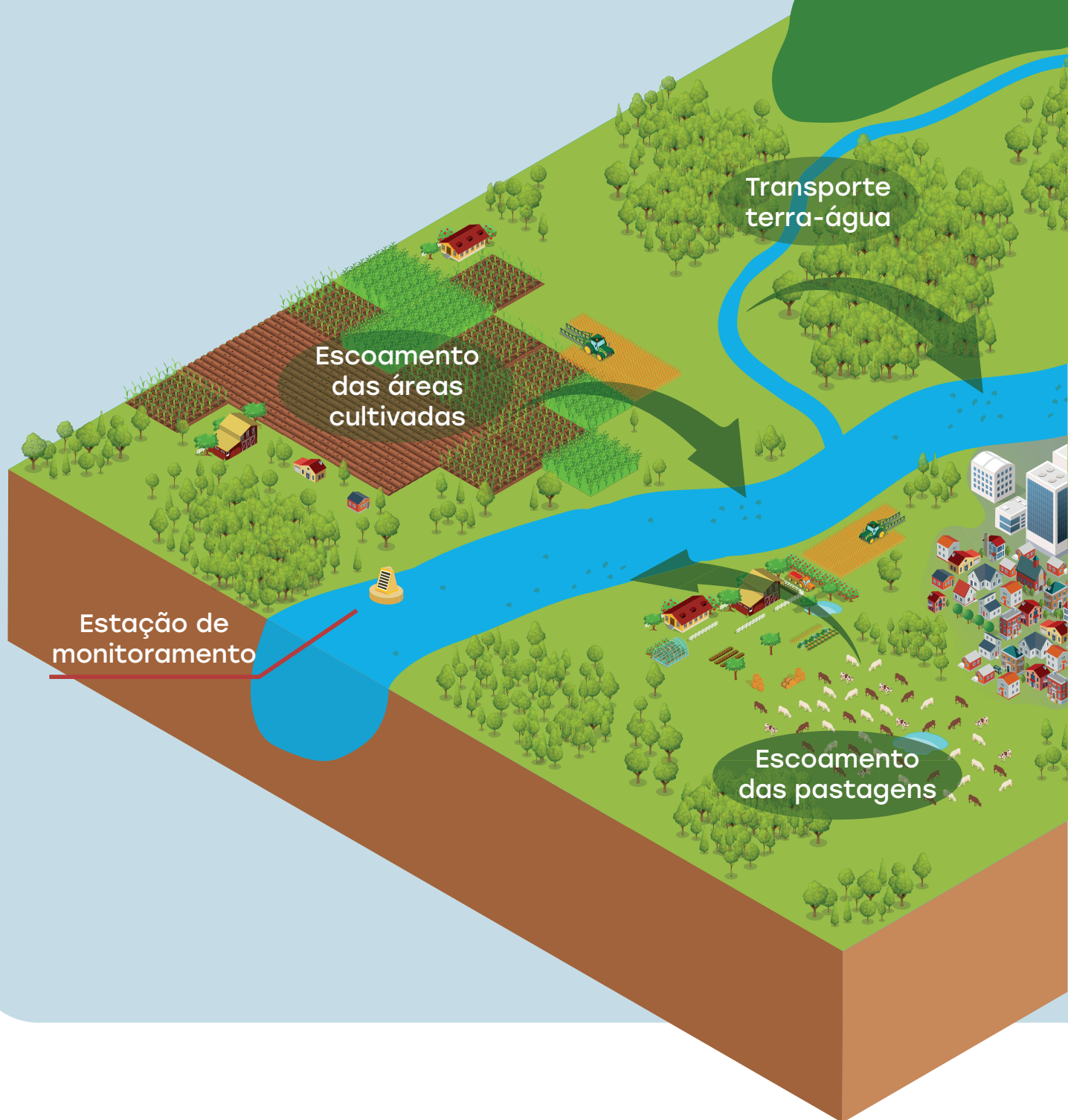
SPARROW é o acrônimo de *SP*atially *R*eferenced *R*egressions *O*n *W*atershed *A*tttributes. Trata-se de um modelo estatístico híbrido, baseado em métodos estatísticos de regressões aplicadas sobre diversos atributos de bacias hidrográficas espacialmente referenciados. No SPARROW, a modelagem envolve um processo que estabelece uma relação matemática entre as medições da qualidade da água feitas em uma rede de estações de monitoramento e os atributos das bacias hidrográficas que contêm as estações de monitoramento.

Essa relação é então usada para estimar as cargas constituintes da qualidade da água, suas concentrações e as contribuições de cada fonte poluidora em uma área de estudo. O modelo SPARROW estima a relação entre os dados de monitoramento dos constituintes com suas respectivas fontes e as características da bacia hidrográfica, correlacionando as observações de qualidade da água dos rios com dados espacialmente distribuídos em seu território.

Mais especificamente, o modelo SPARROW emprega regressões não lineares usando o método dos mínimos quadrados com restrições relacionadas ao balanço de massa para caracterizar, sob condições de médio e longo prazo, a relação espacial entre os dados de qualidade de água observados (dados do monitoramento de qualidade de água) e características de bacias hidrográficas, incluindo:

- ◆ Fontes potencialmente poluidoras da água dos rios, tais como fontes geológicas naturais, agricultura, estações de tratamento de esgotos etc.;
- ◆ Variáveis que interferem no transporte das cargas poluidoras até os corpos hídricos, como propriedades do solo e declividade do terreno, por exemplo;
- ◆ Processos que alteram o fluxo das cargas nos rios, como retiradas de água e a atenuação natural, sob condições de longo prazo.

No modelo conceitual do SPARROW os dados espacialmente referenciados sobre fontes emissoras de constituintes, taxas de transporte e o decaimento na rede hidrográfica são atribuídos a cada trecho ou divisão hidrográfica da bacia. A carga de cada trecho é a soma de todas as cargas dos trechos a montante mais as contribuições geradas na área de drenagem do próprio trecho.







Ribeirão Preto (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA

O modelo usa uma rede hidrográfica completamente conectada e consistida para integrar as condições da área de drenagem com as cargas de montante de modo a produzir estimativas de cargas dos constituintes espacializadas para todos os trechos desta rede (Schwarz *et al.*, 2006). Os coeficientes dos parâmetros da regressão que descrevem essas relações podem então ser usados para prever cargas e concentrações dos constituintes da água para toda a área estudada, inclusive sob condições variáveis.

Entre as vantagens da aplicação do modelo SPARROW destacam-se:

- ◆ Capacidade de determinar a importância de diferentes fontes e locais prioritários para o controle das cargas poluidoras;
- ◆ Extrapolar informações pontuais do monitoramento para trechos de rios não monitorados em uma extensa região;
- ◆ Estimar cargas poluidoras para os corpos d'água a jusante onde não há observações disponíveis.

O conhecimento acerca da origem das fontes poluidoras é essencial para o planejamento de ações de gestão da qualidade da água e para a aplicação dos instrumentos previstos na PNRH, especialmente o enquadramento dos corpos hídricos em classes de qualidade. O impacto das estratégias de alocação das cargas poluidoras e das ações implementadas em favor da qualidade da água dos rios e reservatórios em uma bacia hidrográfica também pode ser avaliado usando o SPARROW.

A natureza híbrida do SPARROW, que une as características dos modelos estatísticos e de modelos baseados em processos, representa um aperfeiçoamento em relação à precisão das estimativas e interpretações dos processos envolvidos na simulação da qualidade de água (Smith *et al.*, 1997; Alexander *et al.*, 2000; Alexander *et al.*, 2007; Alexander *et al.*, 2008; García *et al.*, 2016; Schmadel *et al.*, 2018; Alexander *et al.*, 2019a; Schmadel *et al.*, 2019).

Além disso, as estimativas de qualidade da água obtidas por meio do SPARROW são acompanhadas de medidas de incerteza, o que permite a avaliação da performance do modelo, melhorando a comunicação entre os técnicos responsáveis pelos resultados e os tomadores de decisão.

2.1 Especificações do modelo

O desenvolvimento de um modelo SPARROW requer a estimativa da carga média de longo prazo do constituinte em questão (a **variável de resposta**), assim como a aquisição e preparação de dados espacialmente distribuídos sobre os atributos representativos e relevantes para a qualidade da água na bacia hidrográfica. Além destas informações, o modelo também demanda o levantamento das fontes do constituinte da água (**variáveis explicativas**) e a rede hidrográfica digital topologicamente consistida. A rede fluvial define a infraestrutura espacial de um modelo SPARROW, que consiste em uma série de trechos conectados dentro da bacia hidrográfica. As cargas dos constituintes, características da bacia hidrográfica e os dados de entrada estão todos vinculados a esta rede hidrográfica.

A estimativa de carga requer observações provenientes do monitoramento da qualidade da água e da vazão que sejam representativas dos trechos estudados. Idealmente, os locais de monitoramento

devem representar um amplo espectro de escalas espaciais e de condições em que ocorre a produção das cargas na bacia. A seleção de variáveis consideradas como fontes dos constituintes e características das bacias hidrográficas depende do conhecimento sobre a própria bacia, podendo ser definidas com base na literatura disponível sobre a área de estudo.

Basicamente, o modelo SPARROW explica a variabilidade espacial no fluxo médio anual ou médio sazonal (massa por unidade de tempo) dos constituintes da água dos rios (variável de resposta) como uma função das características de origem antrópica e naturais da bacia que influenciam a produção e transporte destes constituintes. Conceitualmente, a carga que flui de montante para jusante de um determinado trecho da rede hidrográfica é igual à carga gerada em sua própria área de drenagem acrescida da carga oriunda da bacia a montante. Isso é representado pela seguinte equação (Schwarz *et al.*, 2006), que descreve a carga estimada do constituinte (L_i^*) deixando o trecho i :

$$L_i^* = \left(\sum_{j \in J(i)} L_j' \right) \delta_i A(\mathbf{Z}_i^S, \mathbf{Z}_i^R; \theta_S, \theta_R) + \left(\sum_{n=1}^{N_S} S_{n,i} \alpha_n D_n(\mathbf{Z}_i^D; \theta_D) \right) A'(\mathbf{Z}_i^S, \mathbf{Z}_i^R, \theta_S, \theta_R)$$

Onde a carga de todos os trechos de contribuição a montante $J(i)$ que é aportada para i é representada pelo primeiro termo do somatório, onde L_j' é igual à carga medida, caso o trecho j a montante tenha dados observados, ou a carga estimada pelo modelo (L_j^*) se não houver valor monitorado. O termo δ_i é a fração da carga de montante entregue para o trecho jusante i . A atenuação do constituinte à medida que flui pela rede hidrográfica é representada pela função do transporte aquático (A), que define a fração da carga que chega na extremidade de montante do trecho i e que é entregue à extremidade de jusante do mesmo trecho.

O A é uma função das características do fluxo (S) e do reservatório (R) definidas pelos vetores \mathbf{Z}_i^S e \mathbf{Z}_i^R . Os termos θ_S e θ_R são vetores de coeficientes associados a \mathbf{Z}_i^S e \mathbf{Z}_i^R , respectivamente. O segundo termo da soma representa a carga incremental do constituinte que chega ao trecho i .

Fontes específicas do constituinte no trecho i são representadas por $S_{n,i}$ e inde-

xadas por $n = 1, \dots, N_S$. O termo α_n é o coeficiente específico da fonte associado a cada fonte ($S_{n,i}$). O termo α_n combinado com D_n , que é a função de transporte do meio terrestre para o aquático, determina a carga que chega no rio no trecho i . O termo D_n é uma função específica da fonte de um vetor de variáveis de entrega terra-água definidas pelo vetor \mathbf{Z}_i^D . O termo θ_D é um coeficiente vetorial associado a \mathbf{Z}_i^D . O termo A' é a função de transporte aquático aplicada ao transporte de constituintes do ponto médio do trecho i até a saída do trecho.

A equação do modelo SPARROW é uma função não linear dos parâmetros e, portanto, deve ser estimada pelo método dos mínimos quadrados ponderados não lineares (MQPNL). Tal método pode ser considerado uma aplicação iterativa de mínimos quadrados ordinários onde os pesos, ou a preferência por certas observações em detrimento de outras, são aplicados durante a estimativa do modelo.



Rio Mogi-Guaçu, entre Descalvado (SP) e Santa Rita do Passa Quatro (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA



3. Aplicação do RSPARROW no Brasil

3.1 Estudo-piloto na bacia do rio Grande

No âmbito da cooperação com a ANA e a CPRM, o USGS desenvolveu em linguagem R uma nova versão do SPARROW. **O RSPARROW (<https://github.com/USGS-R/RSPARROW>) é uma ferramenta interativa de modelagem de qualidade de água e suporte à decisão desenvolvida em código aberto.** Recentemente, a ferramenta foi aplicada no Brasil para quantificar a origem, fluxo e destino do nitrogênio total em duas sub-bacias da bacia do rio Grande (Miller *et al.*, 2020).

O código SPARROW foi implementado originalmente na linguagem de programação SAS. Já o RSPARROW estende os recursos da versão proprietária atual do SAS SPARROW e otimiza o acesso do usuário e do desenvolvedor em linguagem R à tecnologia de modelagem SPARROW. O RSPARROW inclui uma ferramenta de mapeamento interativo do Sistema de Suporte à Decisão (SSD) que permite aos gestores avaliar os efeitos potenciais resultantes de mudanças hipotéticas nas fontes de contaminantes da qualidade da água dos rios.

A aplicação da versão em R no Brasil se iniciou com um estudo-piloto na bacia hidrográfica do rio Grande. A bacia do rio Grande ocupa 143.437 km² entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo. A área estudada tem 42.551 km² e é composta pelas sub-bacias dos rios Pardo e Sapucaí. Estas sub-bacias foram selecionadas para o estudo em função principalmente da disponibilidade de dados consolidados para a elaboração do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (PIRH Grande).

A ANA e o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Grande desenvolveram o PIRH Grande para gerir de forma sustentável os recursos hídricos da região. O plano inclui o diagnóstico e prognóstico da qualidade da água e a identificação de ações potenciais para melhorar a qualidade da água na bacia (ANA, 2016). Entre outras, o documento aponta o controle e a redução das cargas de nutrientes como ações importantes para a manutenção da qualidade das águas superficiais, sobretudo

dos reservatórios da região, em função de sua importância estratégica e dos riscos de eutrofização. As informações sobre as fontes de nitrogênio e suas respectivas contribuições para a poluição dos rios e reservatórios são fundamentais para o controle eficaz da poluição e o combate à eutrofização.

Na bacia do rio Grande, cerca de 90% da população urbana é atendida por sistemas de coleta de esgoto. Porém, menos da metade do esgoto coletado é tratado (ANA, 2016). Além disso, a baixa eficiência de remoção de nitrogênio e fósforo, limitação comum na maioria das estações de tratamento de esgotos (ETEs) no Brasil, resulta no lançamento de efluentes tratados com altas concentrações de nutrientes para os rios. Estas cargas elevadas de nutrientes aumentam os riscos de eutrofização nos reservatórios, visto que fósforo e nitrogênio são geralmente constituintes limitantes para o crescimento excessivo da flora aquática em ambientes lênticos. O PIRH Grande identificou a expansão dos serviços de tratamento de esgoto e o aumento da capacidade de remoção de nutrientes como estratégias para melhorar a qualidade da água e preservar os recursos hídricos dos reservatórios.

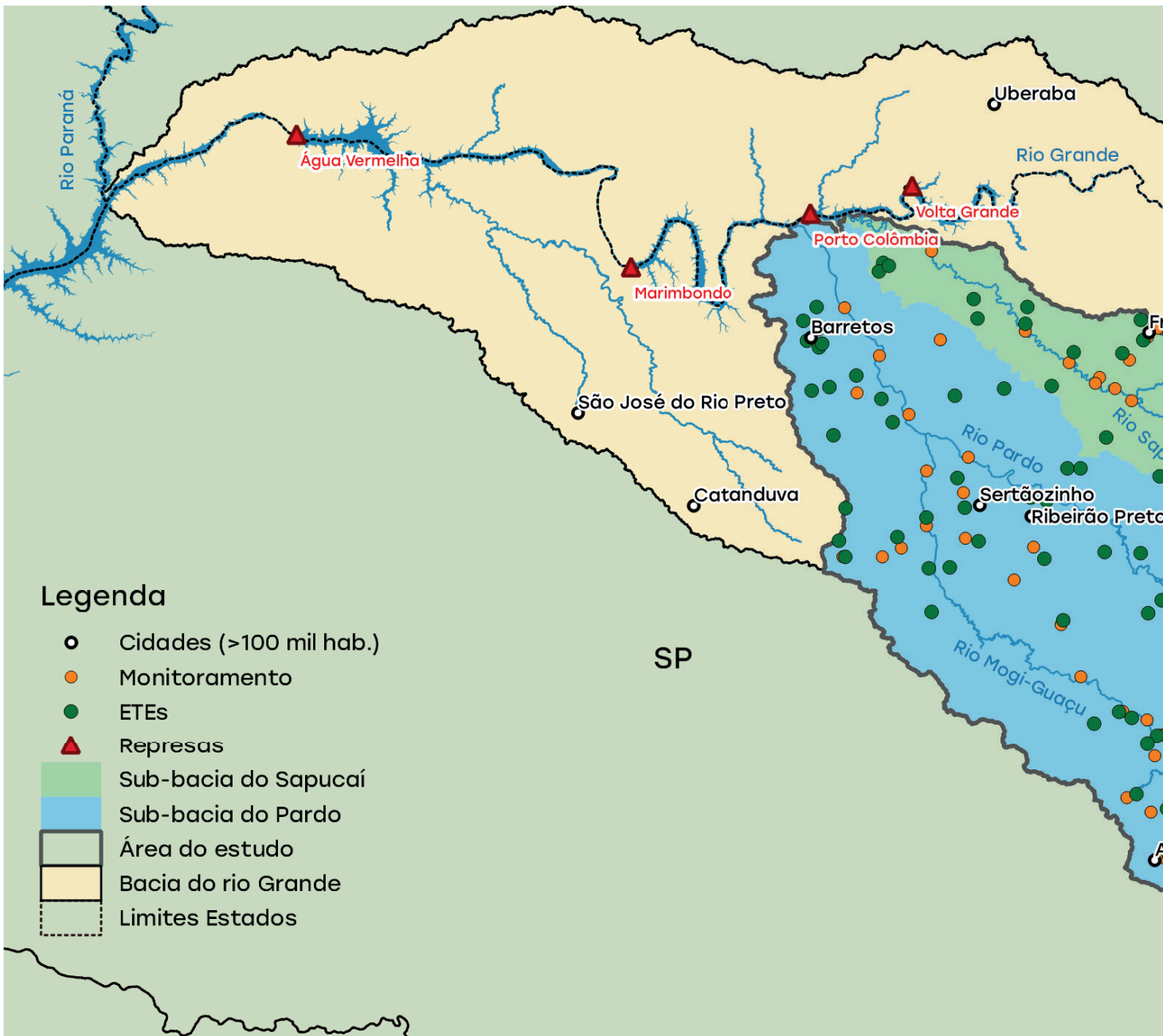
Além dos esgotos domésticos tratados, que são fontes pontuais de nutrientes, as fontes difusas espacialmente distribuídas por todo território da bacia também podem contribuir de forma bastante significativa para o aporte de fósforo e nitrogênio nos rios e reservatórios. No entanto, os estudos destas fontes difusas na bacia são limitados e pouco se sabe sobre a contribuição das fontes poluidoras em termos de nutrientes em comparação com as fontes pontuais.

Compreender as contribuições das diferentes fontes de nutrientes para os rios e reservatórios permitirá que os gestores de recursos hídricos otimizem os esforços destinados a combater a eutrofização por meio da melhoria dos serviços de saneamento e boas práticas agrícolas, por exemplo, de modo a garantir água com qualidade compatível com os múltiplos usos da água.



Rodovia Assis Chateaubriand (SP-425) sobre o rio Pardo
Raylton Alves/Banco de imagens ANA





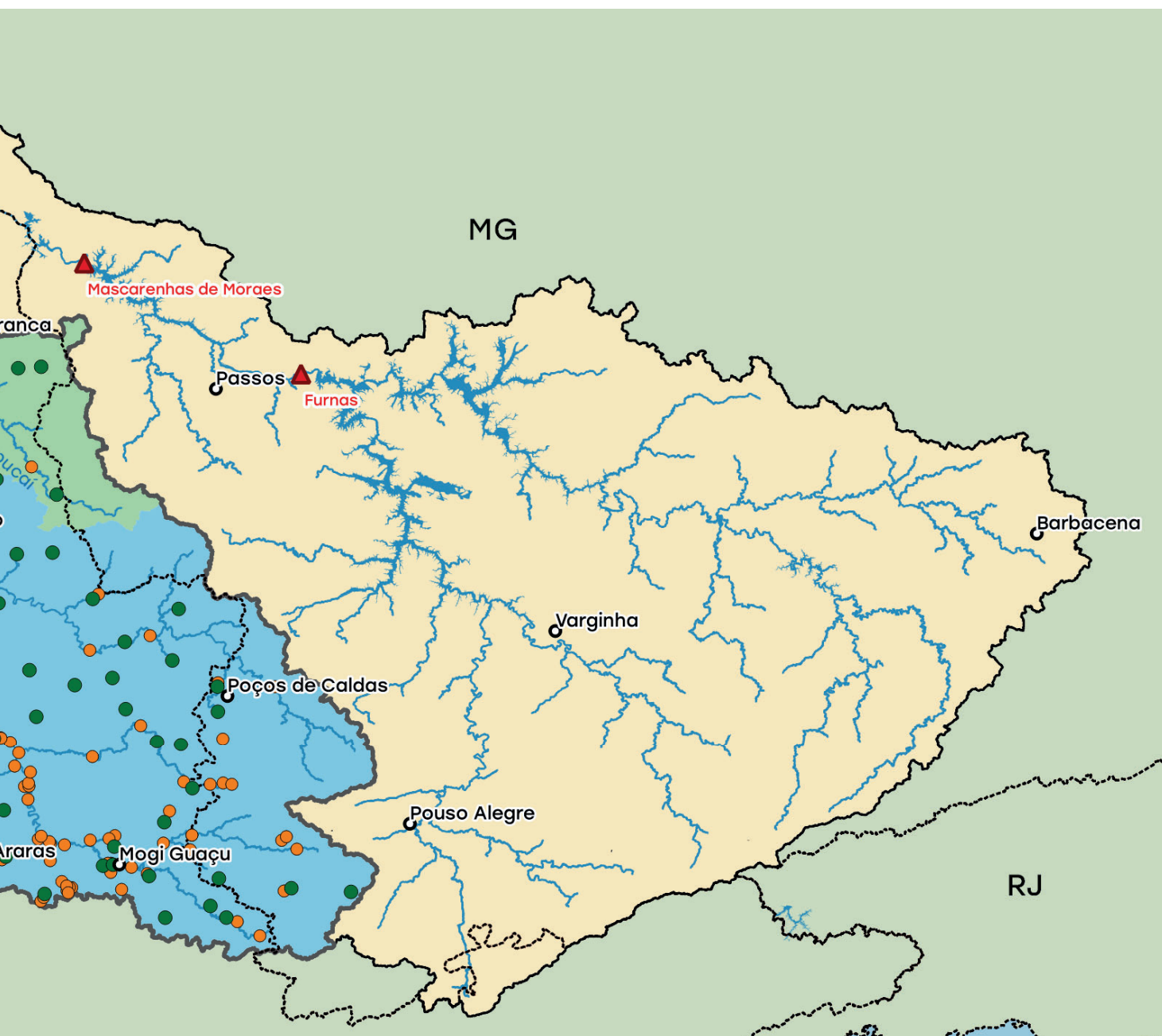
O modelo de nitrogênio total RSPARROW na bacia do rio Grande foi desenvolvido com 3 objetivos principais:

- ◆ Quantificar a variabilidade espacial nas cargas médias anuais de nitrogênio total na hidrografia das sub-bacias dos rios Pardo e Sapucaí na bacia do rio Grande;
- ◆ Identificar e quantificar as principais fontes naturais e antrópicas de nitrogênio total nas sub-bacias;
- ◆ Demonstrar o uso do modelo para avaliar as mudanças potenciais na qualidade da água dos rios em resposta a cenários de redução das emissões de nitrogênio de fontes poluidoras relevantes.

Por trás destes objetivos está a produ-

ção de informações fundamentais para a definição de estratégias de gestão da qualidade da água dos corpos hídricos da bacia. A construção de cenários com foco nas principais fontes emissoras de nitrogênio, por exemplo, permite quantificar mudanças nos rios em resposta a ações hipotéticas de controle da poluição hídrica e elencar quais medidas mais podem ser efetivas e benéficas para a bacia.

O modelo foi calibrado para cargas de nitrogênio total para o ano base de 2010, sob condições hidrológicas médias de longo prazo. Portanto, as cargas estimadas pelo modelo representam as cargas de nitrogênio total típicas sob condições de vazões médias e refletem a média das



Área de estudo com estações de tratamento de esgotos, principais represas e pontos de monitoramento de qualidade de água nas sub-bacias estudadas da bacia do rio Grande.

cargas anuais que variam temporalmente.

As estimativas de cargas foram produzidas com a utilização do pacote R Loadflex, desenvolvido pelo USGS, utilizando dados produzidos pela rede de monitoramento de qualidade de água da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e dados de vazão da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE).

Um conjunto de variáveis que representam as fontes de nitrogênio total e interferem

em seu transporte na bacia foram testadas para inclusão no modelo, incluindo o uso e cobertura da terra, população, temperatura, precipitação e as ETEs como fontes pontuais. O decaimento de nitrogênio nos rios foi considerado como um processo de primeira ordem, onde a perda foi estimada em função do tempo de percurso.

A seleção das variáveis explicativas para a variação do NT nas sub-bacias baseou-se em sua significância estatística e na adequação do modelo às observações de campo.

3.2 Resultados

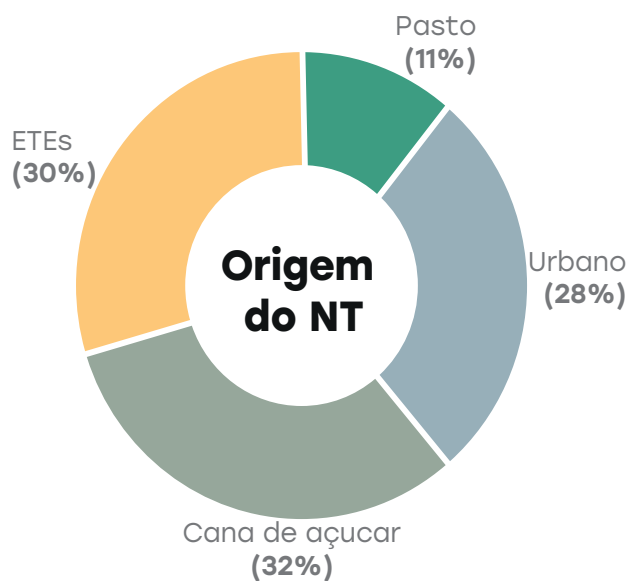
O modelo final incluiu quatro fontes de nitrogênio total e uma taxa de decaimento para prever as cargas de nitrogênio total nas sub-bacias estudadas. **As quatro variáveis explicativas ou fontes de nitrogênio foram as áreas de pastagens, áreas urbanas, áreas de cultivo de cana-de-açúcar e as ETEs como fontes pontuais.** O modelo, calibrado pelas cargas estimadas com base nos dados de monitoramento, explica 68% da variabilidade da produção média anual de nitrogênio total.

Estima-se que um aporte de aproximadamente **20 mil toneladas anuais de nitrogênio total** atingiram os exutórios das sub-bacias dos rios Pardo e Sapucaí. Desta carga total, cerca de 11% teve origem nas pastagens, 28% foi oriundo dos solos urbanos, 32% das áreas de cultivo de cana-de-açúcar e 30% provenientes das ETEs.

As áreas de pastagens contribuíram com 11% da carga total de nitrogênio, apesar de representarem apenas 2,1% da área estudada. Os 28% da carga total proveniente das áreas urbanas, que ocupam 23% da área do estudo, não incluem as ETEs como fontes de emissões. Isto indica que o controle da poluição difusa das cidades pode ser uma abordagem eficaz para diminuir a carga total de nitrogênio nos rios da bacia.

O mapa a seguir apresenta as emissões de nitrogênio por trecho da hidrografia e indica as áreas com maior produção anual por unidade de área (kg/ha/ano). A mediana da produção incremental de NT

Origem das emissões de nitrogênio total



nos 68.856 trechos da hidrografia foi 4,66 kg/ha/ano (intervalo interquartil: 1,97 - 6,10 kg/ha/ano).

A partir do mapa é possível identificar áreas mais críticas em termos de emissões de nitrogênio nas bacias estudadas. Considerando o risco da eutrofização dos reservatórios do rio Grande, as áreas com maior produção de NT localizadas mais próximas aos exutórios das sub-bacias dos rios Pardo e Sapucaí são mais críticas se comparadas aos trechos situados mais a montante, visto que essa proximidade significa um menor decaimento do constituinte ao longo da rede de drenagem.

Para testar os efeitos de um hipotético aumento na eficiência de remoção de NT nas ETes foram testados cenários com

Nitrogênio total que atinge os exutórios das bacias dos rios Pardo e Sapucaí.

Fonte	Área da bacia (km ²)	NT entregue nos exutórios (toneladas)	Proporção da carga total (%)
Pasto	901 (2%)	2237	11
Áreas urbanas	9735 (23%)	5549	28
Cultivo de cana	15432 (36%)	6368	32
ETEs	-	5966	30



Produção incremental de nitrogênio total nos trechos da hidrografia da área de estudo.

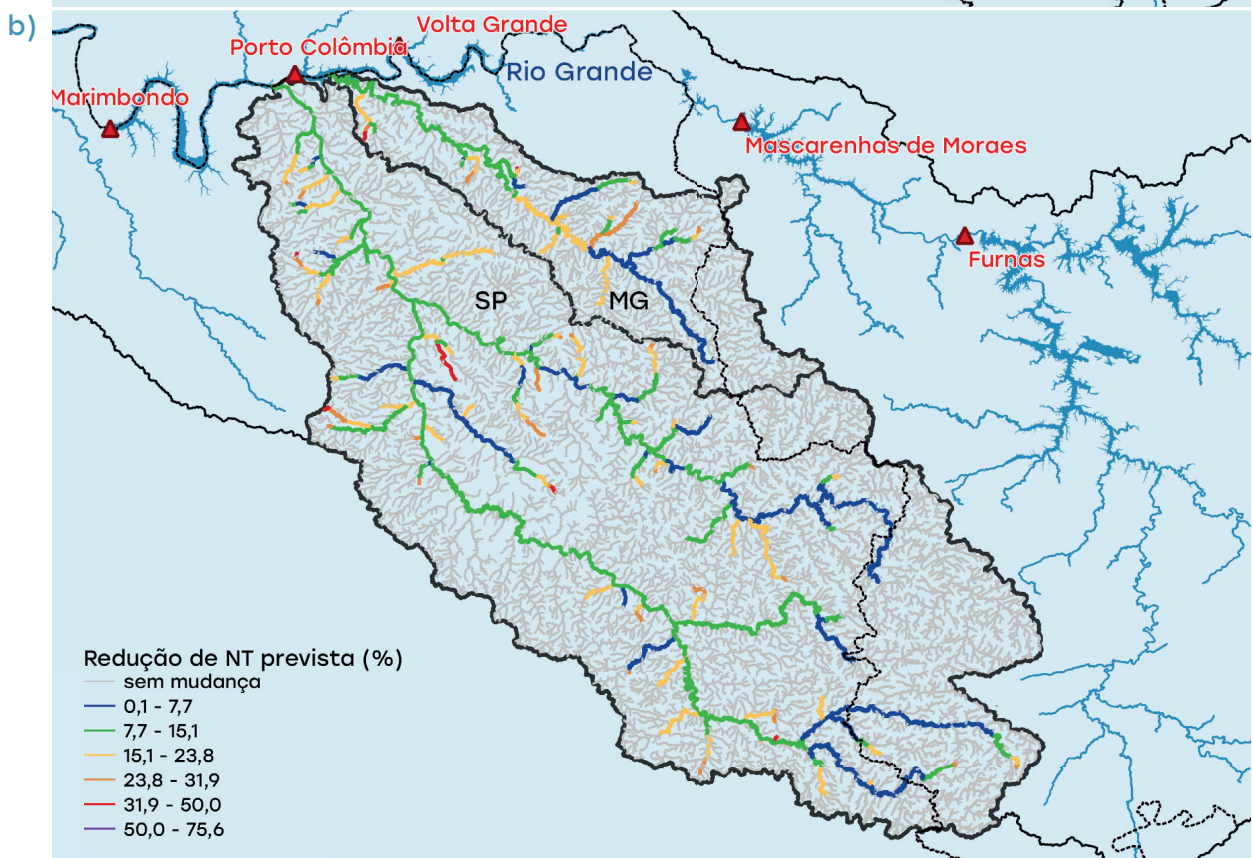
reduções de 20%, 40%, 60% e 80% nas emissões do constituinte por esta fonte nos rios.

Considerando que estes níveis de aumento na eficiência nas ETEs são em relação às condições médias de longo prazo, o modelo prevê reduções potenciais de 6%, 12%, 18% e 24%, respectivamente, das cargas de nitrogênio nos exutórios das sub-bacias dos rios Pardo e Sapucaí.

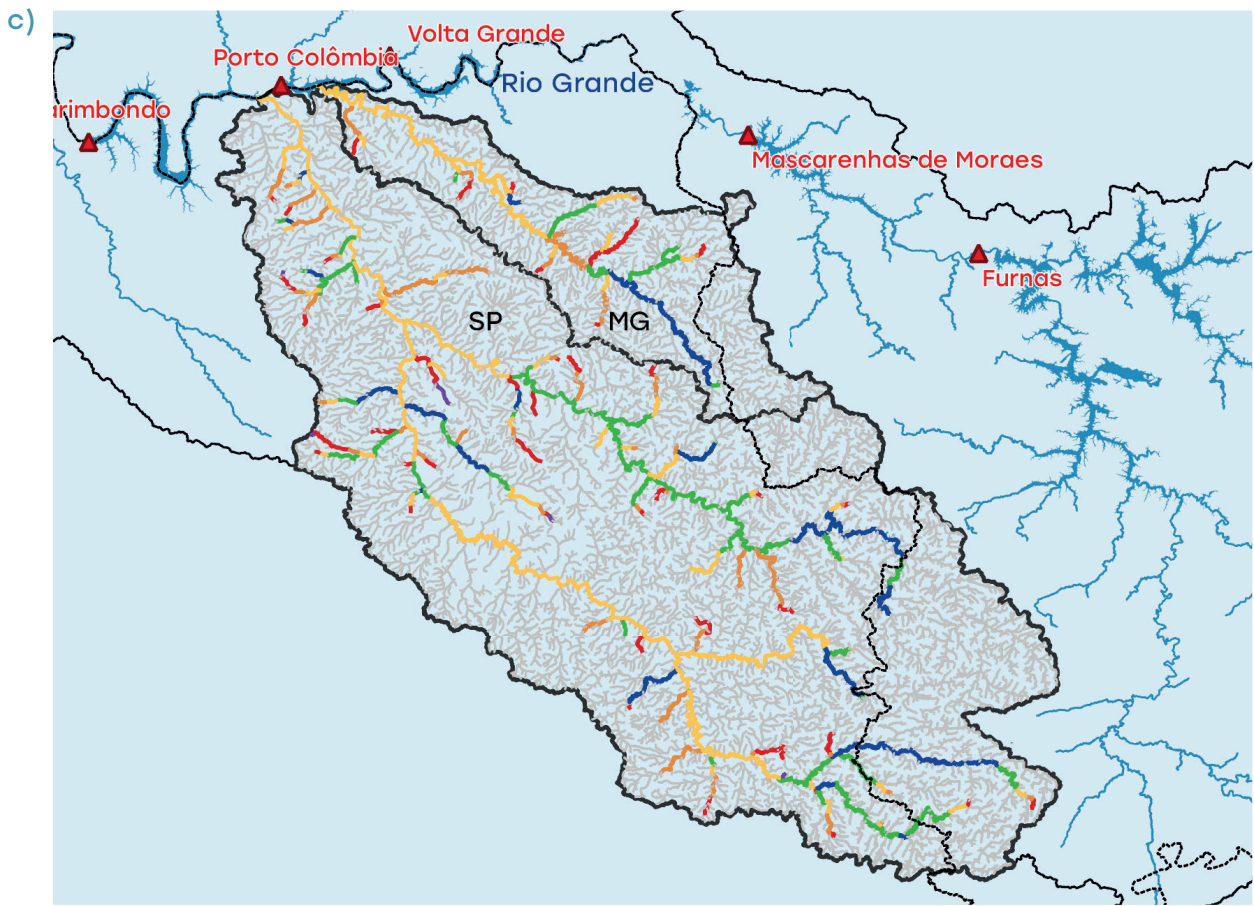
Vários cenários também foram usados para testar os efeitos da melhoria da captura e tratamento do escoamento

urbano. Quando a carga total de nitrogênio do solo urbano foi reduzida em 20%, 40%, 60% e 80%, a carga total nos exutórios das sub-bacias do Pardo-Sapucaí diminuiu em 6%, 11%, 17% e 22%, respectivamente.

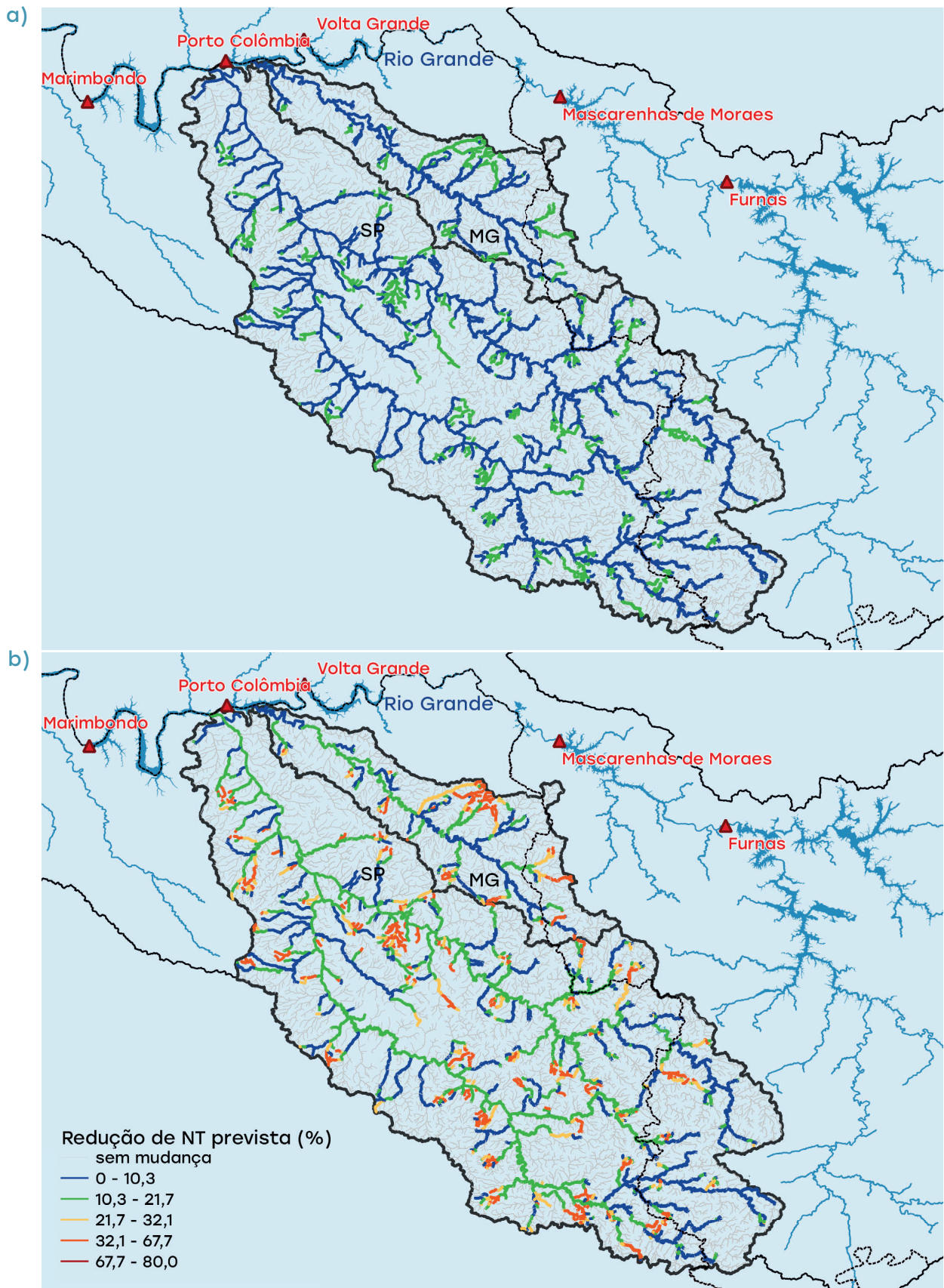
O Sistema de Suporte à Decisão do SPARROW forneceu mapas que mostram os efeitos das reduções hipotéticas nas emissões de NT destas duas relevantes fontes nos trechos da hidrografia da área de estudo.



As cores no mapa representam reduções percentuais previstas pelo modelo nos trechos da hidrografia em resposta a reduções hipotéticas de (a) 20%, (b) 40%, (c) 60% e (d) 80% das cargas de nitrogênio lançadas pelas ETEs nos rios.



As cores no mapa representam reduções percentuais previstas pelo modelo nos trechos da hidrografia em resposta a reduções hipotéticas de (a) 20%, (b) 40%, (c) 60% e (d) 80% das cargas de nitrogênio provenientes das áreas urbanas.





c)



d)



3.3 Lições aprendidas

O desenvolvimento do modelo SPARROW desenvolvido para bacias afluentes do rio Grande (MG/SP) enfrentou desafios relacionados à disponibilidade de dados, principalmente no que se refere às estimativas de cargas nos rios e informações utilizadas para caracterizar as fontes emissoras de nitrogênio total e atributos das sub-bacias estudadas. Idealmente, dados de qualidade de água e vazão devem ser coletados de forma simultânea em um mesmo ponto de monitoramento, preferencialmente nas mais diversas condições de vazão, de modo a obter boas estimativas de cargas de nitrogênio nos trechos dos rios.

De modo geral, a estimativa das cargas dos constituintes pode ser particularmente desafiadora quando a coleta de amostras da qualidade da água é realizada com baixa frequência, estatisticamente enviesada, sem seguir métodos de amostragem padronizados ou quando não há medição simultânea das vazões no ponto da coleta. As cargas de nitrogênio do estudo da bacia do rio Grande foram estimadas a partir de vazões obtidas por técnicas de regionalização, uma vez que os dados de concentração e de vazão não foram coletados simultaneamente e no mesmo trecho do rio na maioria dos casos. Isto adiciona incertezas às estimativas das cargas que se propagam no modelo.

A disponibilidade de informações sobre as fontes dos constituintes da água e as características da bacia na área de estudo em escalas temporal e espacialmente relevantes podem também limitar o desenvolvimento de modelos SPARROW. No modelo RSPARROW da bacia do rio Grande (Miller et al. 2020), algumas fontes de nitrogênio total, tais como dejetos animais e aplicação de fertilizantes, foram representadas pela informação de uso da terra extraída do PIRH Grande. Embora esta abordagem descreva suficientemente as cargas de nitrogênio na bacia, um planejamento mais minucioso e que integre a gestão dos recursos hídricos e da ocupação do território da bacia pode exigir um maior detalhamento sobre as diversas fontes deste constituinte da água.

Em vários modelos de nitrogênio total

desenvolvidos pelo USGS para as principais regiões dos EUA, os dados sobre a aplicação de fertilizantes demonstraram representar a carga total de nitrogênio da agricultura mais precisamente do que a utilização das áreas ocupadas pela agricultura em geral, tendo se mostrado mais úteis na identificação de estratégias para reduzir a carga total deste nutriente (Ator, 2019; Hoos e Roland II, 2019; Robertson e Saad, 2019; Wise *et al.*, 2019; Wise, 2019). Portanto, o desenvolvimento de dados específicos sobre as características espaciais de bacias hidrográficas e sobre o transporte dos constituintes da água pode representar um aperfeiçoamento significativo para os modelos SPARROW.

Em função das limitações expostas anteriormente, conclui-se que uma avaliação prévia sobre a disponibilidade de dados de entrada é uma etapa importante e necessária para o desenvolvimento de um modelo SPARROW. Além disso, a escolha da ferramenta de modelagem mais adequada para cada caso depende ainda de uma avaliação do que se pretende simular em termos dos objetivos do estudo, das características dos corpos de água e comportamento dos constituintes. Por exemplo, no caso do SPARROW, a aplicação não é recomendada para a simulação de constituintes da água que apresentem transporte não conservativo, isto é, quando não há boa correlação entre sua concentração na água e a vazão. Também não se recomenda a utilização deste modelo para constituintes de difícil detecção nas análises ou quando há disponibilidade limitada de dados, o que pode ser ocasionado pela carência de pontos de monitoramento, baixa frequência de amostragem etc.

Normalmente, as redes estaduais de monitoramento de qualidade de água não são desenhadas para o desenvolvimento de modelos de simulação de qualidade de água nas bacias, sendo normalmente projetadas para identificar impactos ambientais, tendências ao longo do tempo ou para fins de fiscalização do uso da água. Apesar do estudo-piloto apresentado ter contado com séries consistentes de dados, disponibilizadas pelas melhores redes de monitoramento hidrológico do país, em muitos casos, modelos de simulação

da qualidade da água como o SPARROW podem demandar uma produção própria de dados, com um desenho experimental especificamente desenvolvido para a modelagem. Embora a aquisição de dados envolva custos significativos para o estudo, esta etapa pode ser essencial para o desenvolvimento dos modelos e para o aumento de sua performance preditiva. Por outro lado, a experiência com este tipo de estudo pode representar oportunidades para o aperfeiçoamento e expansão das redes de monitoramento de dados hidrológicos qualiquantitativos.

A construção de modelos de simulação de qualidade de água pode ser conjugada ao planejamento e a revisão das redes de monitoramento existentes para o preenchimento de lacunas de informação em áreas de interesse, a inclusão de novos constituintes nas análises e a definição e aplicação de métodos mais consistentes de amostragem e gerenciamento de dados. Isto demanda maior articulação entre os órgãos gestores e pesquisadores, tornando o processo de desenvolvimento do modelo mais interessante, visto que o conhecimento gerado pode ser

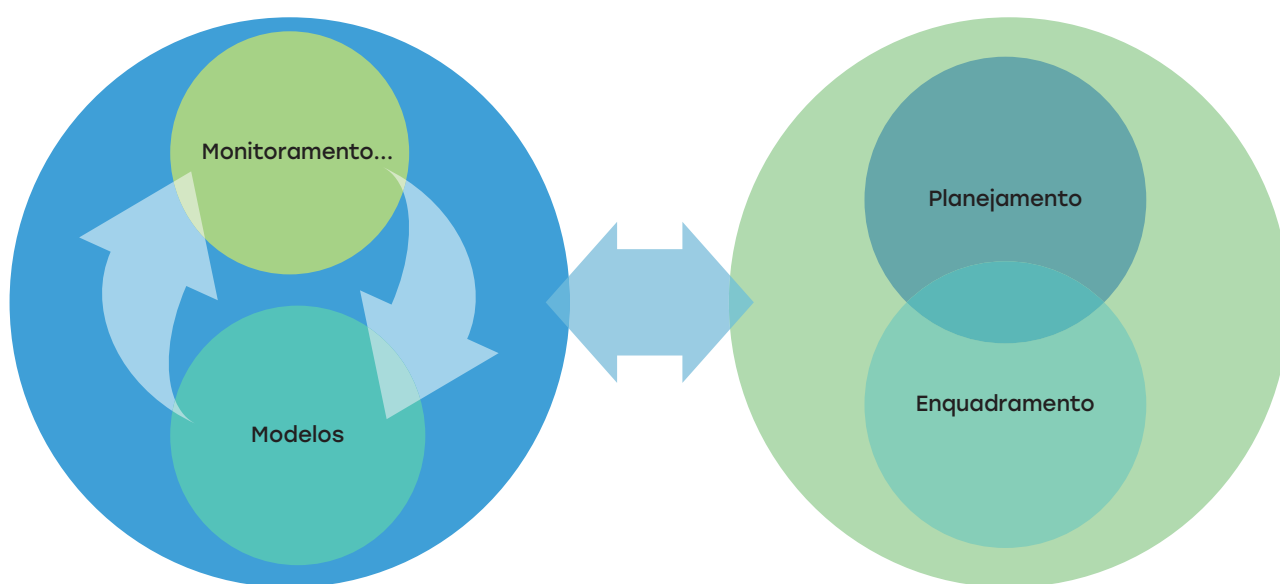
aplicado à gestão da água desde as etapas iniciais do estudo.

Por exemplo, no caso do modelo da bacia do rio Grande, a inclusão de mais pontos na rede de monitoramento poderia ser orientada pelas áreas onde o modelo apresentou maior imprecisão. Além da expansão da rede, a coleta combinada de dados de concentração dos constituintes e medidas de descarga em diversas condições hidrológicas suportaria estimativas de carga de nitrogênio total mais precisas, o que significaria um aprimoramento para a calibração do modelo.

Além disso, a partir da demanda por dados para os modelos hidrodinâmicos, também seria possível selecionar os locais mais adequados para a instalação de equipamentos automáticos de aquisição de dados hidrológicos capazes de coletar informações com alta frequência e de contribuir para uma compreensão mais aprofundada da dinâmica das cargas provenientes de fontes difusas e da hidrologia da bacia.

O aperfeiçoamento do modelo de nitrogênio total aqui apresentado poderia trazer mais elementos para os gestores e setores usuários de recursos hídricos decidirem so-

Modelos de Qualidade de Água e a Gestão dos Recursos Hídricos

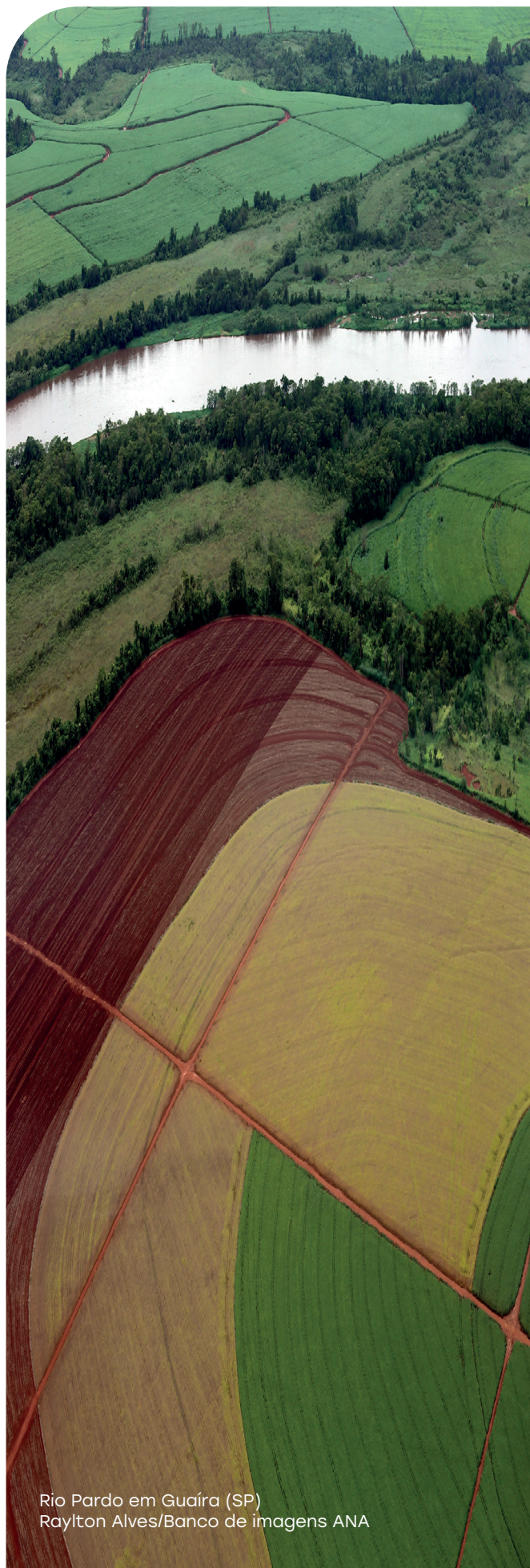


O aperfeiçoamento da coleta de dados pode ajudar o desenvolvimento de modelos hidrológicos que, por sua vez, podem trazer subsídios para o aprimoramento do monitoramento. Juntas, as duas atividades fornecem importantes informações para o planejamento e gestão de recursos hídricos.

bre as ações mais efetivas para a redução das cargas, bem como para a negociação de metas para o enquadramento e, conseqüentemente, a preservação dos rios e reservatórios das bacias estudadas.

O desenvolvimento de modelos para outros constituintes da água, tais como fósforo e sedimentos, poderia ajudar a enfrentar outros desafios de qualidade da água. A utilização de modelos hidrodinâmicos e de qualidade de água pode ser um elemento agregador de diversas atividades de gestão dos recursos hídricos da bacia, sobretudo do monitoramento e o planejamento.

O desenvolvimento de modelos de simulação como o da bacia do rio Grande pode se tornar um processo de contínua busca pela compreensão dos processos e dinâmicas que determinam a qualidade da água dos rios e lagos da bacia. A incorporação de dados adicionais sobre as fontes poluidoras da água e sobre características da bacia hidrográfica em um modelo existente pode melhorar a representação dos processos de produção, transporte e transformação dos constituintes na água e aumentar a precisão das previsões. Além disso, expandir o domínio espacial do modelo também pode ajudar a aprimorá-lo a partir da inclusão de condições mais variadas da qualidade da água e do acréscimo de pontos de monitoramento como locais de calibração, o que melhora o poder preditivo da ferramenta.



Rio Pardo em Guaira (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA



4. Conclusões

4.1 Potenciais aplicações no Brasil

O tema de qualidade de água tem ocupado espaço crescente nas discussões sobre a gestão dos recursos hídricos no Brasil. A ANA, responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, terá desafios cada vez maiores em sua missão de assegurar a qualidade da água para os múltiplos usos.

Um destes desafios consiste em determinar com maior precisão as contribuições das diversas fontes emissoras de poluição hídrica, pontuais ou difusas, nas cidades ou no campo, bem como seus reflexos na qualidade das águas superficiais dos rios e lagos do país. Neste sentido, os modelos SPARROW podem contribuir **para a gestão dos recursos hídricos identificando as principais fontes poluidoras da água** na bacia e seus respectivos impactos; e fornecendo **previsões de mudanças na qualidade em função da adoção de ações potenciais visando a melhoria da qualidade das águas superficiais**.

Cargas de constituintes da água originadas de fontes pontuais e contínuas são relativamente mais fáceis de se identificar e quantificar. Por outro lado, a identifica-

ção das fontes difusas e a quantificação de suas respectivas cargas poluidoras da água, apesar de importantes para a gestão dos recursos hídricos, podem ser tarefas bastante complexas. Neste sentido, o desenvolvimento de modelos de simulação da qualidade da água pode ser bastante útil para a gestão da qualidade da água.

Ao desconsiderar estas fontes difusas de poluição, os gestores podem estar ignorando a maior parte das cargas que impactam a água dos rios e lagos, deixando de lado as medidas potencialmente mais efetivas e sobrecarregando determinados setores responsáveis por lançamentos pontuais e outorgados, como as concessionárias responsáveis pelo saneamento básico ou a indústria, por exemplo.

O estudo na bacia do rio Grande traz um bom exemplo da aplicação do SPARROW em relação à identificação das fontes de nitrogênio total e à simulação de cenários envolvendo medidas hipotéticas de redução de cargas visando a prevenção da eutrofização em reservatórios estratégicos para a segurança hídrica. Ao mostrar que o nitrogênio total de fontes difusas, distribuídas nas cidades ou no campo, re-

apresenta a maior parte deste constituinte nos rios, o modelo contribui para o planejamento da gestão da qualidade da água na bacia indicando prioridades.

A simulação dos aumentos percentuais da remoção do nitrogênio nas ETEs nas bacias dos rios Pardo e Sapucaí mostrou os reflexos deste tipo de ação setorial aos níveis local e das bacias, nos exutórios dos afluentes estudados, onde ocorre a entrega das cargas de nitrogênio dos rios para os reservatórios do rio Grande. Esta abordagem permite que tomadores de decisão tenham maior conhecimento sobre os benefícios relacionados com os investimentos no tratamento terciário nas ETEs para a redução do aporte de nitrogênio e do risco de eutrofização dos grandes reservatórios do rio Grande.

De modo similar, esta aplicação do modelo também pode auxiliar no manejo e recuperação de áreas estuarinas e costeiras, como foi feito na baía de Chesapeake, nos Estados Unidos (Miller *et al.*, 2019). Neste exemplo, o SPARROW auxiliou orientando o planejamento de ações para o controle das cargas de nitrogênio visando a recuperação da qualidade da água da baía por meio da identificação de áreas prioritárias para a gestão. Além da priorização das áreas no entorno da baía de Chesapeake, o modelo apontou que, após todos os investimentos em remoção de nutrientes nas plantas de tratamento de efluentes, a poluição de origem difusa e as ações voltadas para sua redução também seriam muito efetivas na recuperação da qualidade da água do estuário.

Os problemas relacionados com o assoreamento dos rios e lagos tem relação direta com as cargas de origem principalmente difusa no território da bacia e o uso da terra. Nos Estados Unidos, Miller *et al.* (2017) desenvolveram um modelo SPARROW para simular o comportamento dos sólidos dissolvidos na água e explicar as causas da salinização dos rios na bacia do Alto Colorado com o objetivo de orientar estratégias para limitar as cargas causadoras do problema. Neste estudo, a própria geologia local é apontada como a principal fonte natural de sólidos. Porém, a irrigação foi identificada como a principal fonte de origem antrópica. O

modelo SPARROW desenvolvido por Miller *et al.* (2017) foi capaz de apontar, entre diferentes métodos de irrigação, quais práticas específicas contribuíam para o aumento da salinização. Um modelo assim poderia ser aplicado para **orientar medidas de controle do assoreamento e salinização** nas bacias em que estes processos representam problemas para a qualidade e os usos da água no Brasil.

Uma outra possibilidade de aplicação dos modelos SPARROW no Brasil se refere aos reflexos das mudanças climáticas na hidrologia. Modelos SPARROW que incluem variáveis climáticas como precipitação, temperatura ou evapotranspiração podem também ser usados para avaliar respostas da qualidade de água ou do regime hidrológico aos cenários de mudanças no clima. Miller *et al.* (2021) aplicaram projeções de valores de temperatura e precipitação diante de diferentes cenários de concentração de gases de efeito estufa em um modelo SPARROW hidrodinâmico para avaliar como as vazões no sudoeste estadunidense responderiam às mudanças climáticas previstas. Os resultados mostraram como as diferenças espaciais nas vazões mudariam para três períodos de 30 anos com centro nos anos de 2030, 2050 e 2080.

4.2 Contribuições para a gestão da qualidade da água

Entre as diversas abordagens metodológicas para a simulação da qualidade da água, o SPARROW apresenta características que se adequam ao modelo de gestão previsto na nossa política de recursos hídricos. A principal delas talvez seja a adoção da bacia hidrográfica como unidade territorial. Em adição, as capacidades do modelo em identificar e quantificar as fontes e cargas poluidoras, respectivamente, bem como os caminhos e destinos das cargas de constituintes da água fazem do SPARROW uma ferramenta capaz de produzir subsídios importantes para diversos instrumentos de gestão previstos na PNRH, sobretudo aqueles com maior conexão com o tema da qualidade de água.

Os resultados produzidos pelos modelos SPARROW têm potencial para enriquecer o diagnóstico e o prognóstico

dos planos de recursos hídricos sobre a qualidade da água nas bacias hidrográficas, apontando trechos críticos e os associando às fontes poluidoras. O planejamento demanda a identificação das áreas da bacia que requerem maior atenção em termos de poluição hídrica e setores usuários que devem ser priorizados na pactuação de compromissos, metas, estratégias e ações capazes de garantir água com qualidade compatível com os usos.

No caso do instrumento do enquadramento, resultados similares aos do estudo-piloto conduzido para sub-bacias do rio Grande podem contribuir para o estabelecimento de metas realistas de qualidade da água dos trechos em função da construção de cenários mais precisos, com a avaliação dos efeitos obtidos com hipotéticas reduções de cargas poluidoras. **A partir dos cenários simulados, seria possível avaliar as reduções de cargas necessárias para se atingir as metas de qualidade da água previstas nas propostas de enquadramento**, assim retroalimentando o processo de planejamento dos recursos hídricos na bacia ao orientar sobre ações mais efetivas.

A construção de uma proposta de enquadramento dos corpos de água em classes de qualidade deve estar em conformi-

dade com o plano de recursos hídricos da bacia, devendo ocorrer preferencialmente junto com o planejamento. Desta forma, o desenvolvimento de um modelo SPARROW durante a elaboração do plano de bacia servirá aos dois instrumentos, trazendo maior integração entre eles.

Além das simulações de qualidade de água, as capacidades do SPARROW de explorar repostas no regime hidrológico às mudanças climáticas são interessantes para os estudos envolvendo previsões quanto à disponibilidade hídrica em horizontes futuros. Esta possibilidade, porém, não foi explorada pela ANA até o momento.

Além de servir aos instrumentos de planejamento citados anteriormente, os dados - tanto de entrada, quanto produzidos pelos modelos - podem e devem alimentar sistemas de informação, como o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). O SNIRH é outro importante instrumento de gestão previsto na PNRH que armazena, organiza e disponibiliza estes dados para os gestores de recursos hídricos e usuários em geral. Além de armazenar os dados brutos, o SNIRH também pode apresentá-los de forma mais didática e acessível, transformando-os em informação para a sociedade.



Rio Pardo em Brodowski (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA

Os resultados produzidos pelo modelo, sobretudo no que se refere à produção de cenários de abatimento e alocação de cargas de constituintes da água, podem ser utilizados pela ANA como subsídios para a concessão de outorgas. A outorga de direito de uso da água é um importante instrumento da PNRH, tendo forte relação com o planejamento de recursos hídricos e o enquadramento. Além de outros objetivos, as outorgas devem garantir que os lançamentos de efluentes não excedam a capacidade de diluição e depuração dos corpos de água receptores, com vistas a garantir a manutenção da qualidade da água em conformidade com os usos pretendidos dentro da perspectiva dos instrumentos de planejamento.

Os cenários produzidos pelo modelo podem orientar investimentos no saneamento básico na bacia, aperfeiçoando a gestão dos recursos hídricos e a aplicação dos recursos em ações com maior efetividade para a melhoria da qualidade da água. O Atlas Esgotos – Despoluição de Bacias Hidrográficas (ANA, 2017) identificou 810 sedes urbanas no país que necessitam de atenção especial quanto à remoção do nitrogênio, a grande maioria na região nordeste, onde os açudes são os principais mananciais para abastecimento de água.

O estudo-piloto aqui apresentado explorou as possibilidades da ferramenta na construção de cenários que apontam como o aumento da eficiência na remoção de nitrogênio das ETEs impacta de forma positiva a qualidade da água dos rios estudados na bacia do rio Grande. Este tipo de resultado permite uma avaliação mais precisa da relação entre benefícios e custos das ações que visam os objetivos do planejamento e do enquadramento, além de orientar a outorga em termos dos lançamentos e cargas máximas de efluentes tratados nos corpos de água receptores.

4.3 Considerações finais

A parceria com o USGS tem trazido avanços nas análises de qualidade de água através do desenvolvimento da RSPARROW, uma ferramenta de modelagem de código aberto, e de suporte interativo à decisão.

A ferramenta, já amplamente utilizada pelo USGS nos EUA, foi aplicada no Brasil para quantificar a origem, fluxo e destino do nitrogênio total na bacia do rio Grande (Miller *et al.*, 2020). Sua utilização aqui demonstra a capacidade do modelo no sentido de orientar os esforços para o controle da poluição hídrica de origem pontual e difusa e simular diferentes cenários, gerando subsídios importantes para o planejamento dos recursos hídricos e a gestão da qualidade da água.

O modelo RSPARROW de nitrogênio total da bacia do rio Grande se mostrou capaz de:

- ◆ Quantificar a variabilidade espacial das cargas médias anuais de nitrogênio total nos rios das sub-bacias dos rios Pardo e Sapucaí na Bacia do Rio Grande;
- ◆ Quantificar as principais fontes difusas e pontuais de nitrogênio total na área de estudo;
- ◆ Produzir cenários de qualidade da água em função de hipotéticas reduções nas emissões de nitrogênio de uma fonte pontual e outra difusa.

A ferramenta inclui ainda uma funcionalidade de mapeamento interativo como parte do Sistema de Suporte à Decisão (SSD), que mostra a resposta dos trechos da hidrografia em termos de variação das cargas em resposta aos cenários simulados.

Durante o desenvolvimento do modelo RSPARROW de nitrogênio total da bacia do rio Grande foram identificadas algumas limitações relacionadas à disponibilidade de dados, principalmente em relação ao cálculo das estimativas de cargas utilizadas em sua calibração. No entanto, isto pode representar oportunidades para os gestores das redes de monitoramento e de pesquisadores em virtude da indicação de lacunas de informação que induzam a elaboração de estratégias para o aperfeiçoamento da coleta de dados e implementação de estudos nas bacias hidrográficas.

A partir do presente trabalho, iniciado no contexto da cooperação com o USGS, é possível vislumbrar outras atividades que podem ser desenvolvidas em continuidade ao processo de desenvolvimento de ferramentas e técnicas de análise da qualidade da água pela ANA.

Entre estas, destacam-se a possibilidade de aperfeiçoamento e expansão do modelo atual para o resto da bacia do rio Grande ou mesmo para outras bacias onde o SPARROW tem potencial de contribuir com a gestão dos recursos hídricos. Estudos futuros podem também incluir outros parâmetros de qualidade da água, além do nitrogênio. Todas estas iniciativas poderiam ser implementadas em concomitância com a elaboração ou revisão de propostas de enquadramento nas bacias.

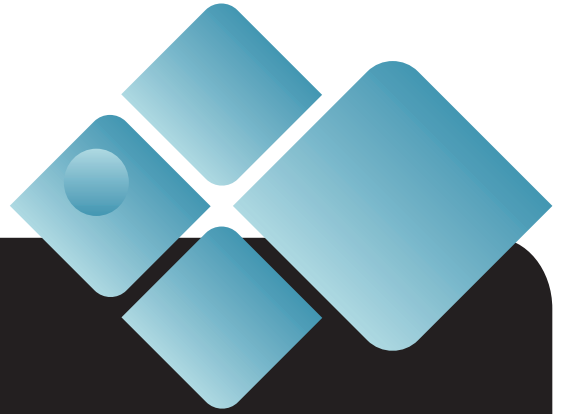
Além de estudos para subsidiar o instrumento do enquadramento, é possível também explorar o potencial do SPARROW para estudar as respostas do regime hidrológico em função de projeções de alterações climáticas no Brasil em cenários futuros, a exemplo do estudo conduzido nos Estados Unidos por Miller e colaboradores (Miller *et al.*, 2021), visto que este é um assunto emergente.



Rio Mogi-Guaçu em Guatapará (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA



Rio Pardo em Caconde (SP)
Raylton Alves/Banco de imagens ANA



5. Referências bibliográficas

Agência Nacional das Águas. (2016). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande-PIRH-Grande**: Resumo Executivo. Brasília, Brazil.

Alexander, R. B., Boyer, E. W., Smith, R. A., Schwarz, G. E., & Moore, R. B. (2007). The role of headwater streams in downstream water quality. **Journal of the American Water Resources Association**, 43(1), 41-59, <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00005.x>

Alexander, R. B., Elliott, A. H., Shankar, U., & McBride, G. B. (2002). Estimating the sources and transport of nutrients in the Waikato River Basin, New Zealand. **Water Resources Research**, 38(12), 4-1. <https://doi.org/10.1029/2001wr000878>

Alexander, R.B.; Gorman Sanisaca, L. RSPARROW: An R System for SPARROW Modeling (Software Release); **U.S. Geological Survey**: Reston, VA, USA, 2019; doi:10.5066/P9UAZ6FO.

Alexander, R. B., Schwarz, G. E., & Boyer, E. W. (2019a). Advances in quantifying streamflow variability across continental scales: 1. Identifying natural and anthropogenic controlling factors in the USA using a spatially explicit modeling method. **Water Resources Research**, 55, 10893-10917. <https://doi.org/10.1029/2019WR025001>

Alexander, R. B., Schwarz, G. E., & Boyer, E. W. (2019b). Advances in quantifying streamflow variability across continental scales: 2. Improved model regionalization and prediction uncertainties using hierarchical Bayesian methods. **Water Resources Research**, 55(12), 11061-11087. <https://doi.org/10.1029/2019WR025037>

Alexander, R. B., Smith, R. A., & Schwarz, G. E. (2000). Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico. **Nature**, 403(6771), 758-761, <https://doi.org/10.1038/35001562>

Alexander, R. B., Smith, R. A., Schwarz, G. E., Boyer, E. W., Nolan, J. V., & Brakebill, J. W. (2008). Differences in phosphorus and nitrogen delivery to the Gulf of Mexico from the Mississippi River Basin. **Environmental Science and Technology**, 42(3), 822-830, <https://doi.org/10.1021/es0716103>

Anning, D. W., & Flynn, M. E. (2014). Dissolved-solids sources, loads, yields, and concentrations in streams of the conterminous United States, **U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2014-5012** <https://doi.org/10.3133/sir20145012>

Appling, A.P.; Leason, M.G.; McDowell, W.H. Reducing bias and quantifying uncertainty in watershed flux estimates: The R package loadflex. **Ecosphere** 2015, 6, 1-25, doi:10.1890/ES14-005171.

Ator, S. W. (2019). Spatially referenced models of streamflow and nitrogen, phosphorus, and suspended-sediment transport in streams of the northeastern United States, **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2019-5118**. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/sir20195106>.

Benoy, G. A., Jenkinson, R. W., Robertson, D. M., & Saad, D. A. (2016). Nutrient delivery to Lake Winnipeg from the Red-Assiniboine River Basin - A binational application of the SPARROW model. **Canadian Water Resources Journal**, 41(3), 429-447. <https://doi.org/10.1080/07011784.2016.1178601>

Brakebill, J. W., Ator, S. W., & Schwarz, G. E. (2010). Sources of suspended-sediment flux in streams of the Chesapeake Bay Watershed: A regional application of the SPARROW Model. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 46(4), 757-776. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00450.x>

Duan, W. L., He, B., Takara, K., Luo, P. P., Nover, D., & Hu, M. C. (2015). Modeling suspended sediment sources

and transport in the Ishikari River basin, Japan, using SPARROW. **Hydrology and Earth System Sciences**, 19(3), 1293-1306. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1293-2015>

Elliot, A. H., Alexander, R. B., Schwarz, G. E., Shankar, U., Sukias, J. P. S., & McBride, G. B. (2005). Estimation of nutrient sources and transport for New Zealand using the hybrid mechanistic-statistical model SPARROW. **Journal of Hydrology New Zealand**, 44(1), 1-27.

García, A. M., Alexander, R. B., Arnold, J. G., Norfleet, L., White, M. J., Robertson, D. M., & Schwarz, G. (2016). Regional effects of agricultural conservation practices on nutrient transport in the Upper Mississippi River Basin. **Environmental Science and Technology**, 50(13), 6991-7000. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03543>

Hirsch, R. M., and L. De Cicco (2015), **User Guide to Exploration and Graphics for RivEr Trends (EGRET) and Data Retrieval: R Packages for Hydrologic Data** (Version 2.0, February 2015), Techniques and Methods Book 4, 93 pp., U.S. Geol. Surv., Reston, Va.

Hoos, A., & Roland II, V. (2019). Spatially Referenced Models of streamflow and nitrogen, phosphorus, and suspended-sediment loads in streams of the southeastern United States. **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report** 2019-5135. <https://doi.org/10.3133/sir20195135>

Miller, M. P., Buto, S. G., Lambert, P. M., & Rumsey, C. A. (2017). Enhanced and updated spatially referenced statistical assessment of dissolved-solids load sources and transport in streams of the Upper Colorado River Basin. **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report** 2017-5009. <https://doi.org/10.3133/sir20175009>

Miller, M. P., Buto, S. G., Susong, D. D., & Rumsey, C. A. (2016). The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin. **Water Resources Research**, 52(5), 3547-3562. <https://doi.org/10.1002/2015WR017963>

Miller, M. P., Capel, P. D., García, A. M., & Ator, S. W. (2020). Response of Nitrogen Loading to the Chesapeake Bay to Source Reduction and Land Use Change Scenarios: A SPARROW-Informed Analysis. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 56(1), 100-112.

Miller, M. P., de Souza, M. L., Alexander, R. B., Sanisaca, L. G., Teixeira, A. de A., & Appling, A. P. (2020). Application of the RSPARROW modeling tool to estimate total nitrogen sources to streams and evaluate source reduction management scenarios in the Grande River Basin, Brazil. **Water**, 12(10), 1-20. <https://doi.org/10.3390/w12102911>

Miller, O. L., Putman, A. L., Alder, J., Miller, M., Jones, D. K., & Wise, D. R. (2021). Changing climate drives future streamflow declines and challenges in meeting water demand across the southwestern United States. **Journal of Hydrology X**, 11, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2021.100074>

Preston, S. D., Alexander, R. B., & Wolock, D. M. (2011). Sparrow Modeling to Understand Water-Quality Conditions in Major Regions of the United States: A Featured Collection Introduction. **Journal of the American Water Resources Association**. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00585.x>

R Core Team (2022). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Robertson, D.M., & Saad, D. A. (2019). Spatially referenced models of streamflow and nitrogen, phosphorus, and suspended-sediment transport in streams of the midwestern United States. In **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report** 2019-5106. <https://doi.org/10.3133/sir20195114>

Robertson, Dale M., Saad, D. A., Benoy, G. A., Vouk, I., Schwarz, G. E., & Laitta, M. T. (2019). Phosphorus and Nitrogen Transport in the Binational Great Lakes Basin Estimated Using SPARROW Watershed Models. **Journal of the American Water Resources Association**, 55(6), 1401-1424. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12792>

Schmadel, N. M., Harvey, J. W., Alexander, R. B., Schwarz, G. E., Moore, R. B., Eng, K., ... Scott, D. (2018). Thresholds of lake and reservoir connectivity in river networks control nitrogen removal. **Nature Communications**, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05156-x>

Schmadel, N. M., Harvey, J. W., Schwarz, G. E., Alexander, R. B., Gomez-Velez, J. D., Scott, D., & Ator, S. W. (2019). Small ponds in headwater catchments are a dominant influence on regional nutrient and sediment budgets. **Geophysical Research Letters**, 46(16), 9669-9677. <https://doi.org/10.1029/2019GL083937>

Schwarz, G. E., Hoos, A. B., Alexander, R. B., & Smith, R. A. (2006). The SPARROW surface water-quality model—Theory, applications and user documentation. **U.S. Geological Survey, Techniques and Methods** 6-B3, 248 p. and CD-ROM.

Smith, R. A., Schwarz, G. E., & Alexander, R. B. (1997). Regional interpretation of water-quality monitoring data. **Water Resources Research**, 33(12), 2781-2798. <https://doi.org/10.1029/97WR02171>

Statistical Analysis Systems Institute, Cary, NC, SAS Institute, Inc., https://www.sas.com/en_us/home.html

Wise, D.R., Anning, D. W., & Miller, O. L. (2019). Spatially referenced models of streamflow and nitrogen, phosphorus, and suspended-sediment transport in streams of the southwestern United States. (ver. 1.1, June 2020): **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report** 2019-5106. <https://doi.org/10.3133/sir20195106>

Wise, Daniel R. (2019). Spatially referenced models of streamflow and nitrogen, phosphorus, and suspended-sediment loads in streams of the Pacific Region of the United States. (ver. 1.1, June 2020): **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report** 2019-5112. <https://doi.org/10.3133/sir20195112>



MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO REGIONAL

