

# Sistema de suporte a decisões aplicado ao gerenciamento de recursos hídricos: estudo de caso Bacias PCJ

Mayara Sakamoto Lopes<sup>1</sup> João Rafael Bergamaschi Tercini<sup>2</sup> Aline Doria de Santi<sup>3</sup>  
 Diogo Bernardo Pedrozo<sup>4</sup> Joaquin Ignacio Bonnacarrère Garcia<sup>5</sup> Victor Alberto  
Romero Gonzalez<sup>6</sup> Eduardo Cuoco Léo<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Master's degree in Civil and Environmental Engineering, Hydraulics Technological Center Foundation - FCTH. Piracicaba São Paulo Brazil. [mayara.lobes@fcth.br](mailto:mayara.lobes@fcth.br)

<sup>2</sup> Master's degree in Water Resources Engineering, Hydraulics Technological Center Foundation - FCTH. São Paulo São Paulo Brazil. [joao.tercini@fcth.br](mailto:joao.tercini@fcth.br)

<sup>3</sup> Master of Science in Environmental Engineering, Hydraulics Technological Center Foundation - FCTH. Piracicaba São Paulo Brazil. [aline.santi@fcth.br](mailto:aline.santi@fcth.br)

<sup>4</sup> MBA's degree in Project Management, Hydraulics Technological Center Foundation - FCTH. Piracicaba São Paulo Brazil. [diogo.pedrozo@fcth.br](mailto:diogo.pedrozo@fcth.br)

<sup>5</sup> PhD's degree in Hydraulic Engineering, University of São Paulo – USP. São Paulo São Paulo Brazil. [joaquinbonne@usp.br](mailto:joaquinbonne@usp.br)

<sup>6</sup> Degree in Systems Engineering and Electronic Engineering, Hydraulics Technological Center Foundation - FCTH. São Paulo São Paulo Brazil. [victor.romero@fcth.br](mailto:victor.romero@fcth.br)

<sup>7</sup> Master's degree in Applied Ecology, Agency for the Piracicaba, Capivari and Jundiá Rivers – PCJ Basin Agency. Piracicaba São Paulo Brazil. [eduardo.leo@agencia.baciaspcj.org.br](mailto:eduardo.leo@agencia.baciaspcj.org.br)

Cite como

American Psychological Association (APA)

Lopes, M. S., Tercini, J. R. B., Santi, A. D., Pedrozo, D. B., Bonnacarrère, J. I. G., Gonzalez, V. A. R., & Léo, E. C. (2021). Sistema de suporte a decisões aplicado ao gerenciamento de recursos hídricos: estudo de caso Bacias PCJ. *Rev. Gest. Ambient. e Sust. - GeAS*, 10(1), 1-28, e19876. <https://doi.org/10.5585/geas.v10i1.19876>.

## Resumo

**Objetivo:** Apresentar as particularidades do Sistema de Suporte a Decisões das Bacias PCJ (SSD PCJ), destacando suas contribuições à gestão e ao planejamento de recursos hídricos.

**Metodologia:** Estudo de caso baseado na aplicação do SSD PCJ nas ações de gerenciamento das Bacias PCJ.

**Relevância:** O avanço tecnológico implicou no aumento da disponibilidade de dados sobre os recursos hídricos, demandando maior tempo e esforço para serem manipulados e analisados. Dessa forma, são necessários investimentos em bases de dados e sistemas que os transformem em informações úteis, para que possam ser facilmente acessadas pelos usuários em seus processos de gestão e planejamento dos recursos hídricos. Assim, foram discutidas as experiências da aplicação do SSD PCJ no gerenciamento das Bacias PCJ, que podem ser replicadas nas demais regiões hidrográficas.

**Resultados:** As análises indicam que o SSD PCJ possui características que potencializam a sua aplicação na gestão e planejamento de recursos hídricos, com a divulgação pública de dados históricos e em tempo real, possibilitando que os usuários façam comparações entre diferentes períodos e pontos de monitoramento, e análises quali-quantitativas integradas.

**Contribuições:** A aplicação do SSD PCJ tem-se mostrado efetiva para acompanhar em tempo real a ocorrência de chuva e a situação dos corpos d'água, possibilitando a identificação de situações de risco e a emissão de alertas para minimizar impactos adversos. Ademais, serve para avaliar o cumprimento de normas regulamentadoras, alimentar modelos de simulação e subsidiar análises de disponibilidade hídrica e enquadramento dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Sistema de suporte a decisões. Sistema de informações. Planejamento de recursos hídricos. Gestão de recursos hídricos. Bacias PCJ.

## Decision support system applied to water resources management: PCJ basins case study

### Abstract

**Objective:** Presenting the particularities of the PCJ Basin Decision Support System (SSD PCJ), highlighting its contributions to the management and planning of water resources.





**Methodology:** Case study based on the application of the SSD PCJ to the management actions of the PCJ Basins.

**Relevance:** Technological advancement implied an increase in data on water resources, requiring more time and effort to be manipulated and analyzed. Thus, investments in databases and systems that transform data into useful information are necessary, so that they can be easily accessed by users in their water resources management and planning processes. Thus, the experiences of the application of the SSD PCJ to the management of the PCJ Basins were discussed and can be replicated in other hydrographic regions.

**Results:** The discussions indicate that the SSD PCJ has characteristics that enhance its application to the management and planning of water resources, with public disclosure of both historical and real time data, allowing users to compare different periods and monitoring points, as well as integrated quality and quantity analyses.

**Contributions:** The application of the SSD PCJ has been shown to be effective in monitoring the occurrence of rain and the water bodies situation, enabling in real time the identification of risk situations and the issuance of alerts to minimize adverse impacts, besides assessing compliance with regulatory standards, feeding simulation models, and supporting analyses of water availability and quality.

**Keywords:** Decision support system. Information system. Water resources planning. Water resources management. PCJ Basins.

## Sistema de soporte a decisiones aplicado a la gestión de recursos hídricos: caso de estudio de las Cuencas PCJ

### Resumen

**Objetivo:** Mostrar las particularidades del Sistema de Soporte a Decisiones de las Cuencas PCJ (SSD PCJ), destacando sus contribuciones a la gestión y al planeamiento de recursos hídricos.

**Metodología:** Caso de estudio basado en la aplicación del SSD PCJ en las acciones de gestión de las Cuencas PCJ.

**Relevancia:** Los avances tecnológicos generaron un aumento en la cantidad de datos de recursos hídricos disponibles, incrementando el tiempo y esfuerzo necesarios para analizarlos y manipularlos. Así, se hace necesario invertir en sistemas que transformen los datos en informaciones útiles, para que puedan ser consumidos por los usuarios en sus procesos de gestión y planeación. Con este fin, se analizó la aplicación del SSD PCJ en la gestión de las Cuencas PCJ, ya que estos procesos pueden ser replicados en otras regiones hidrográficas.

**Resultados:** El estudio mostró que el SSD PCJ tiene características que potencian su aplicación en la gestión y la planeación de los recursos hídricos, con divulgación pública de datos históricos y en tiempo real, dando la posibilidad a los usuarios para hacer comparaciones entre diferentes periodos y estaciones de monitoreo, así como para realizar análisis cuali-cuantitativos.

**Contribuciones:** El estudio mostró que el uso del SSD PCJ fue efectivo a la hora de acompañar, en tiempo real, los eventos de lluvia y el estado de los cuerpos hídricos, permitiendo así identificar situaciones de riesgo y lanzar alertas tempranas para disminuir los impactos nocivos de dichas situaciones. También contribuyó en la auditoría de las normas y regulaciones, alimentando los modelos de simulación con parámetros de entrada y dando soporte para el análisis de disponibilidad y estado medioambiental de los recursos hídricos.

**Palabras clave:** Sistemas de soporte a decisiones. Sistemas de información. Planeación en recursos hídricos. Gestión de recursos hídricos. Cuencas PCJ.

### Introdução

A água é um importante recurso natural que pode sustentar a vida e uma sociedade e um ecossistema justo, estável e produtivo (Gain, Giupponi & Wada, 2016). Entretanto, o desenvolvimento e utilização excessiva dos recursos hídricos, a poluição da água e sua deterioração interrompem o ciclo da água e agravam os seus riscos (Quesada-Montano, Westerberg, Fuentes-Andino, Hidalgo & Halldin, 2018). Aliado a esses problemas, têm-se as



incertezas relacionadas ao aquecimento global, que, no século passado, levou ao declínio geral na disponibilidade hídrica em todos os continentes (Sordo-Ward, Granados, Martín-Carrasco & Garrote, 2016).

No contexto global, o Brasil apresenta grande oferta hídrica, mas em análises regionais, constata-se que as relações de oferta e demanda não são uniformes, principalmente em regiões metropolitanas como São Paulo (RMSP) e Campinas (RMC), com cerca de 21,5 e 3,2 milhões de habitantes, respectivamente. Ambas estão localizadas em bacias hidrográficas com áreas de contribuição inferiores ao necessário para atender sua população, podendo ocasionar instabilidade no abastecimento (Braga & Kelman, 2016). Assim, a existência de regiões que apresentam grande pressão sobre os sistemas – considerando aspectos quantitativos e/ou qualitativos – indica a necessidade urgente de avaliar e prever a tendência e evolução dos recursos hídricos, além de formular políticas de gestão adequadas para lidar com a crise hídrica cada vez mais grave.

Nessa perspectiva, a gestão de recursos hídricos requer diferentes tipos de ações, que incluem governança política e legislativa, gerenciamento, inovação tecnológica e mudança comportamental (Gössling, 2015). Assim, o processo de gestão inclui conteúdos técnico, político, legislativo e organizacional (Costanza et al., 2017), sendo que a parte técnica inclui gestão do abastecimento e da demanda de água (Ghasemi, Saghafian & Golian, 2017; Ghashghaie, Marofi & Marofi, 2014), alocação de água (Karamouz, Kerachian & Zahraie, 2004), objetivos da política de segurança da água (Bolognesi & Kluser, 2018; Dadson et al., 2017) e apoio à decisão (Pallotino, Sechi & Zuddas, 2005).

Nesse contexto, o monitoramento de recursos hídricos é fundamental para fornecer dados sobre a situação das bacias hidrográficas, considerando aspectos de quantidade e de qualidade da água. O acompanhamento das informações monitoradas possibilita detectar possíveis alterações espaço-temporais nos parâmetros do corpo hídrico, e fornece subsídios essenciais para diagnosticar e avaliar os ecossistemas aquáticos e para tomar decisões associadas ao gerenciamento dos recursos hídricos.

Embora o monitoramento tenha múltiplas finalidades, os seus principais objetivos são: i) acompanhar alterações da qualidade e quantidade dos recursos hídricos; ii) analisar tendências de variáveis e elaborar previsões comportamentais; iii) alertar para impactos adversos não previstos, ou mudanças nas tendências previamente observadas; iv) detectar a violação de padrões de qualidade e/ou regras operativas previstos em legislação; v) fornecer informações imediatas, quando um indicador se aproximar de valores críticos; vi) documentar impactos resultantes de determinada ação; vii) avaliar eficácia de ações realizadas na bacia hidrográfica; viii) oferecer informações que permitam avaliar medidas corretivas; ix) desenvolver instrumentos de gestão; e x) fornecer subsídios para tomadas de decisão (Longo Júnior, 2011; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico [ANA], n.d.).





Considerando que o monitoramento contínuo gera grande quantidade de dados sobre a bacia hidrográfica, é evidente que o gerenciamento de recursos hídricos requer bases de dados sistematicamente organizadas e ferramentas computacionais que possibilitem acesso rápido às informações atualizadas (Santi, Lopes, Pedrozo, Léo & Barufaldi, 2020; Porto & Porto, 2008).

Assim, o primeiro passo para a implementação das políticas de recursos hídricos é facilitar o acesso aos dados e informações sobre a situação atual e histórica dos corpos d'água e de seus usos (IOWater, 2013). Com isso, os Sistemas de Informação sobre Recursos Hídricos (SIRH) destacam-se como importantes ferramentas de gestão, seguindo três princípios básicos: descentralização da obtenção e produção de dados e informações, coordenação unificada do sistema; e garantia do acesso aos dados e informações à sociedade (Lei nº 9433, 1997).

Em geral, esses sistemas têm como objetivo: reunir, dar consistência e divulgar os dados e informações sobre a situação quali-quantitativa dos recursos hídricos; atualizar permanentemente as informações sobre disponibilidade e demanda; e fornecer subsídios para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433,1997). Em complemento, têm como finalidades coletar, selecionar e tratar os dados para servirem de suporte à decisão; agilizar e qualificar a tomada de decisão; proporcionar regularmente informação a todos os níveis da gestão; e democratizar o acesso às informações (ANA, 2016, p. 28).

Isso evidencia que os SIRH são o cerne do gerenciamento de recursos hídricos, pois o principal objetivo do processo é tomar decisões eficazes para assegurar o uso múltiplo das águas e sua disponibilidade em padrões de qualidade adequados ao uso pretendido. Nesse sentido, Porto e Porto (2008) ressaltam que as tomadas de decisão não podem ocorrer sem bases de dados estruturadas e atualizadas, sendo imprescindível investir em Sistemas de Suporte a Decisões (SSD), responsáveis por elevar a qualificação do processo decisório.

Diante das relevantes contribuições dos SSDs nos processos de gerenciamento dos recursos hídricos, desenvolveu-se nas Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Bacias PCJ) – estudo de caso desse artigo –, o Sistema de Suporte a Decisões das Bacias PCJ<sup>1</sup> (SSD PCJ), visando a apoiar o complexo processo decisório na região. Neste panorama, prezando pelo compartilhamento de experiências, apresentam-se neste artigo as particularidades do SSD PCJ, destacando suas contribuições no apoio à gestão e ao planejamento dos recursos hídricos das Bacias PCJ.

<sup>1</sup> SSD PCJ foi desenvolvido pela Agência das Bacias PCJ e pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos (LabSid).



## O papel dos SSDs no gerenciamento de recursos hídricos

Os SSD são um recurso de conhecimento que podem facilitar a tomada de decisão ou atingir objetivos específicos, integrando informações sobre água e fatores intervenientes à gestão (Moran, Saracino, Sugg, Thompson & Martinez, 2020). Com abordagens mais integradas, auxiliam na definição de políticas sustentáveis (considerando fatores ambientais, sociais e econômicos) e fornecem maiores subsídios para apoiar tanto o planejamento de recursos hídricos (p.e. investimentos), quanto operações de sistemas em tempo real (p.e. gestão de inundações) (Lima, 2007; INBO & UNESCO, 2018).

O conteúdo desses sistemas é complexo, cobrindo inúmeros aspectos, que dependem sobretudo de seu objetivo principal; no caso dos sistemas de água, envolve os recursos hídricos totais e o consumo de água (Bagstad, Semmens, Waage & Winthrop, 2013; Moran et al., 2020; Walker, Beck, Hall, Dawson & Heidrich, 2014). Embora Denzer (2005) corrobore a complexidade dos SSD, o autor cita características inerentes a esses sistemas: i) dados complexos no tempo e no espaço, sendo muitas vezes incompletos e fora de escala para o uso pretendido; ii) algoritmos complexos resultando em ferramentas ligadas a banco de dados, sistemas de monitoramento em tempo real, Sistemas de Informação Geográfica (SIG), etc.; iii) problemas com o controle de dados, ocasionados pela diversidade de formatos e dificuldades de integração entre metodologias; e iv) necessidade de unificar diferentes ferramentas e metodologias em solução única para o usuário final. Em complemento, Lima (2007) destaca que os sistemas devem ser disponibilizados em interface on-line, com seus dados de entrada e resultados, para dar transparência ao usuário.

Em relação à estrutura dos SSD, em geral, são constituídos por três módulos inter-relacionados: banco de dados, modelos matemáticos e interface de diálogo. O banco de dados é responsável pelo armazenamento dos dados e informações; a base de modelos é composta pelos modelos matemáticos a serem utilizados nas simulações e nas transformações de dados em informações; e o módulo de diálogo possibilita a interação usuário-sistema.

Acerca da base de dados, Russel, Vaughan, Clark, Rodriguez e Darling (2001) evidenciam que a tecnologia envolvida possibilita que os SSD sejam capazes de fornecer ferramentas simples e poderosas para importar, organizar, manipular e exportar grande quantidade de dados, e que os SIG desempenham um papel importante, por armazenarem os dados espacialmente. A base de dados deve alimentar os modelos, permitindo aos usuários a construção e análise de cenários alternativos, de forma a propiciar-lhes a escolha de melhores ações a serem implementadas na bacia hidrográfica (Ono, 2008).

Entretanto, cabe ressaltar que o desafio ao desenvolver um SSD é atender as necessidades dos envolvidos nos diferentes níveis decisórios. Embora haja inúmeras



particularidades, esses sistemas devem ser capazes de: i) auxiliar os usuários a desenvolver seus próprios modelos e a identificar os assuntos mais importantes para gerenciar a bacia hidrográfica de interesse; ii) fornecer uma visão inicial das inter-relações entre os diferentes componentes do sistema; e iii) facilitar a comunicação e o entendimento de todos os envolvidos, de modo que compartilhem a mesma visão (Loucks, 2006).

Sob essas perspectivas, o módulo de diálogo é essencial na comunicação com o usuário, facilitando a participação de não-especialistas nos processos decisórios. Isso é de fundamental importância inclusive no espaço dos comitês de bacia hidrográfica, pois a interação ocorre nesse módulo, possibilitando obter informações, incorporar os julgamentos dos interessados e analisar resultados para subsidiar os processos de tomada de decisão (Braga, Barbosa & Nakayama, 1998; Porto & Porto, 2008; INBO & UNESCO, 2018).

### Área de estudo

As Bacias PCJ estão inseridas na Bacia Hidrográfica do Rio Tietê, abrangendo a área de 76 municípios (total e parcialmente inseridos), sendo 93% no território do Estado de São Paulo e 7% em Minas Gerais. Com aproximadamente 15,3 mil km<sup>2</sup> de área de drenagem, o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos da região podem ocorrer em cinco níveis de detalhamento: 39.430 áreas de contribuição otocodificadas (ottobacias); 225 áreas de contribuição (ACs); 37 zonas; 7 sub-bacias e 3 bacias principais (Consórcio Profill-Rhama, 2020).

Com 5,85 milhões de habitantes (Fundação Agência das Bacias PCJ, 2020), essa região é marcada pelo histórico de baixa disponibilidade hídrica *per capita* e elevadas demandas, especialmente para abastecimento da RMC, que representa 54% da demanda total de abastecimento das Bacias PCJ. Essa complexidade é intensificada em cenários de crise hídrica, nos quais a tomada de decisão deve se basear em dados e informações confiáveis para gerir os conflitos existentes e garantir o atendimento da demanda dos usuários. Na crise hídrica vivenciada em 2014, por exemplo, o uso dos dados gerados pela rede telemétrica das Bacias PCJ foi essencial para acompanhar o armazenamento do Sistema Cantareira e a situação dos corpos d'água da região (Lopes, et al. 2019).

No contexto das Bacias PCJ, o Sistema Cantareira ganha destaque, pois quatro dos seis reservatórios que o compõem estão na área de drenagem da região, sendo a água reservada neste sistema utilizada para abastecer aproximadamente 10 milhões de habitantes da RMSP e das Bacias PCJ (Fundação Agência das Bacias PCJ, 2020). Considerando que parte da água de alguns rios da bacia do Rio Piracicaba é transposta para a bacia do Alto Tietê em função do referido sistema, em 2017 estabeleceram-se regras operativas (Resolução ANA/DAEE n. 925, 2017) visando ao atendimento das demandas das duas regiões.



Nesta perspectiva, reforça-se a importância do acompanhamento da situação dos corpos d'água, citando-se como exemplo o monitoramento de pontos estratégicos nos Rios Atibaia (em Atibaia/SP e Valinhos/SP) e Jaguari (em Morungaba/SP). Nesses casos, os dados são utilizados para alimentar simulações e modelos de previsão de chuva e vazão (Consórcio Profill-Rhama, 2020; Almeida et al., 2019); para verificar o atendimento das condições de operação e embasar decisões acerca da liberação de vazões do Sistema Cantareira (Resolução ANA/DAEE n. 925, 2017); para alertar usuários, Sala de Situação PCJ (SSPCJ) e Defesa Civil sobre possíveis riscos; para auxiliar na gestão operacional dos usuários que captam no respectivo corpo d'água; e também para subsidiar o planejamento das Bacias PCJ, sobretudo ao se avaliar a criticidade no balanço hídrico, indicando a necessidade de investimentos em medidas estruturais e não-estruturais.

Para trazer robustez ao processo decisório, é fundamental integrar os dados de monitoramento com os SSD, que são aprimorados com inúmeras funcionalidades, conforme as necessidades dos usuários. A seguir, apresenta-se a experiência do SSD PCJ, ferramenta que tem contribuído para assegurar a eficiência no gerenciamento dos recursos hídricos das Bacias PCJ.

### **O Sistema de Suporte a Decisões das Bacias PCJ - SSD PCJ**

O uso de SSD para a gestão dos recursos hídricos das Bacias PCJ foi viabilizado em 2003 por meio de um protocolo de intenções firmado entre a Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento do Estado de São Paulo, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (CBH-AT), os Comitês das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Comitês PCJ), o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) e o Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Consórcio PCJ). O objetivo inicial desse sistema era otimizar a utilização dos mananciais de abastecimento público.

Na segunda etapa de desenvolvimento, em 2007, focou-se na integração dos modelos de alocação e qualidade da água em base georreferenciada amigável com entrada e saída de dados, os quais podiam ser exportados para outros softwares, como editores de texto e planilhas eletrônicas. Essa ferramenta serviu como base para a geração dos cenários de simulação do Plano das Bacias PCJ 2010-2020 (Cobrape, 2010), possibilitando a avaliação da quantidade e qualidade das águas superficiais.

A terceira etapa iniciou-se em 2011, com a criação da Fundação Agência das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Agência das Bacias PCJ). Nesse



período, o SSD PCJ passou a abranger metodologia e procedimentos para previsão de níveis e vazões em corpos d'água com horizonte de seis horas a dez dias.

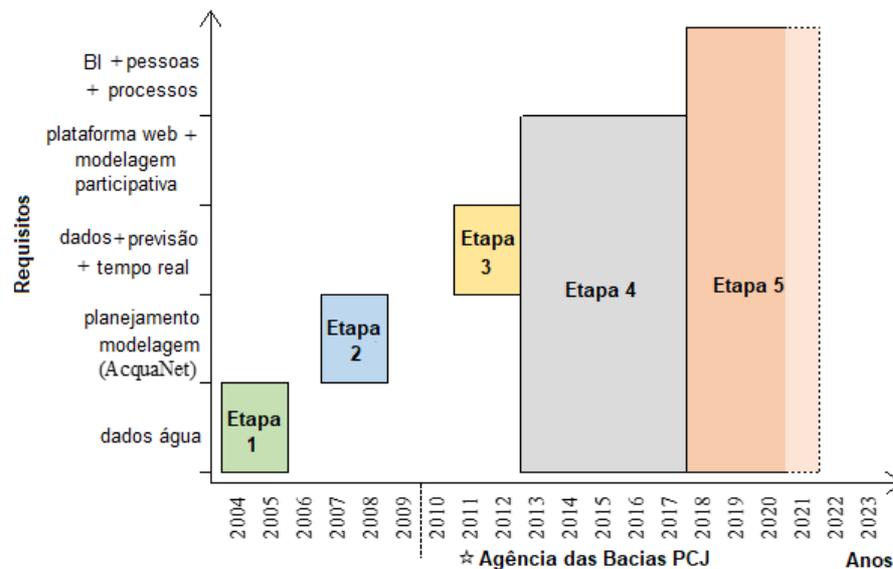
A quarta etapa objetivou a reestruturação e o aprimoramento das ferramentas de suporte a decisões na web já existentes, o que implicou em uma refatoração profunda dos códigos e o maior desenvolvimento até então. Ademais, integraram-se e centralizaram-se as bases de dados de interesse das Bacias PCJ no sistema, e desenvolveram-se seus mecanismos de atualização. Devido às alterações substanciais, houve também investimentos em treinamentos para uso do sistema, com a realização de mais de vinte capacitações.

Na quinta fase – ainda vigente –, objetiva-se ampliar a capacidade de coleta, análise e disponibilização de informações para suporte a decisões e planejamento dos recursos hídricos da região. Nesse caso, destaca-se como inovação uma equipe de suporte local na Agência das Bacias PCJ, além da manutenção de rotinas e o aprimoramento contínuo do sistema – com todas suas funcionalidades, ferramentas, modelos matemáticos e linguagens de programação –, sempre considerando as tecnologias mais adequadas à realidade da Fundação.

Na Figura 1, apresentam-se as etapas de desenvolvimento do SSD PCJ em diferentes funcionalidades, sendo que, em geral, a direção do eixo das funcionalidades corresponde ao aumento da complexidade da solução e do entendimento do problema.

**Figura 1**

*Linha do tempo do desenvolvimento do SSD PCJ*



**Fonte:** Elaboração própria (2021).

Na Figura 1, nota-se que o desenvolvimento iniciou com um SSD orientado aos dados sobre recursos hídricos, para resolver os problemas de acesso a informações pelos



stakeholders do sistema de recursos hídricos. Deu-se, então, sequência a um SSD orientado a modelos que pudessem gerar alternativas de planejamento e assim apoiar as decisões referentes ao Plano das Bacias PCJ 2010-2020. Posteriormente, eventos de cheias atingiram as Bacias PCJ em 2009-2010, o que resultou na priorização de um SSD orientado a dados e modelos de previsão em tempo real, apoiando a tomada de decisão diante de ocorrências de inundação.

A criação e a estruturação da Agência das Bacias PCJ, ocorrida em 2009, desempenhou importante papel no processo de desenvolvimento do SSD PCJ, pois as ações relacionadas ao apoio a decisões começaram a ser alinhadas. Nesse contexto, sucedeu-se à fusão da aprendizagem e das funcionalidades dos projetos anteriores, e pela inclusão da modelagem participativa, cujo objetivo é tomar decisões baseadas em resultados metodologicamente padronizados e aceitos por todos os stakeholders (Basco-Carrera, Warren, Beek, Jonoski, & Giardino, 2017). A partir disso, o processo de planejamento das Bacias PCJ foi dinamizado, com a disponibilização de informações sobre os resultados das possíveis ações a serem implementadas na bacia, e com a possibilidade de todos os envolvidos poderem visualizar, criar e compartilhar entre si diferentes cenários resultantes, e, assim, testar suas premissas antes de iniciar discussões junto aos Comitês PCJ e órgãos gestores.

Com o potencial da ferramenta e a necessidade da ampliação das capacidades da Fundação, na fase atual, o projeto deixou de ser somente de desenvolvimento, ganhando também caráter operacional, visando a gerenciar os recursos hídricos para promover a segurança hídrica da região. Assim, passou a envolver pessoas e processos para geração de informações sobre recursos hídricos, podendo-se citar, por exemplo, as relacionadas ao monitoramento em tempo real das condições hídricas, previsões hidrológicas e de gestão e suporte aos processos decisórios no plano de bacias.

Conforme exposto, as sucessivas etapas de desenvolvimento do SSD PCJ levaram em consideração os princípios e objetivos dos SIRH e dos SSD (ANA, 2016; IOWater, 2013; Lei nº 9.433,1997), sobretudo em relação à coordenação unificada de dados e informações obtidos de forma descentralizada. Como resultado, esse sistema é constituído por um módulo de diálogo amigável que permite fácil interação usuário-sistema, por banco de dados robusto (composto por dados de diferentes fontes) e modelo matemático quali-quantitativo que possibilita a simulação de cenários e a avaliação de usos e interferências.

O SSD PCJ está de acordo também com o preconizado por Denzer (2005), haja vista que contempla algoritmos complexos e é capaz de unificar diferentes dados, ferramentas e metodologias em interface única, contribuindo para atingir os objetivos tanto de gestão operacional quanto de planejamento de investimentos, elencados por Lima (2007) e INBO e UNESCO (2018). Além disso, salienta-se que o fato de ser on-line e público é de suma





importância para a democratização do acesso aos dados e informações, sendo relevante também para assegurar a sua integração com demais instrumentos de gestão.

Nesse sentido, destaca-se a aplicação desse sistema nos Planos das Bacias PCJ 2010-2020 e 2020-2035 (Cobrape, 2010; Consórcio Profill-Rhama, 2020), por ter possibilitado a avaliação atual e futura das condições quali-quantitativas dos corpos d'água, fornecendo, assim, subsídios para melhor planejar as ações que deverão ser executadas pelos diferentes atores que atuam na região.

Outro ponto a ser ressaltado refere-se às atividades de capacitação e a manutenção de equipe local na Agência das Bacias PCJ, que têm como principal objetivo a modelagem participativa descrita em Basco-Carrera (2017), e a aproximação das equipes responsáveis pelo sistema com os respectivos usuários. Com isso, os problemas a serem solucionados são mais bem compreendidos, e, conseqüentemente, as necessidades dos envolvidos em diferentes níveis decisórios podem ser atendidas de forma mais efetiva.

A seguir, detalha-se cada uma das seções do sistema – Monitoramento, Mapas e Modelagem –, discutindo-se suas particularidades e contribuições no apoio à gestão e ao planejamento dos recursos hídricos das Bacias PCJ.

### **SSD PCJ: módulo de monitoramento**

O monitoramento da situação das Bacias PCJ iniciou na década de 30, com medições pluviométricas e fluviométricas em pontos estratégicos. Com o avanço da tecnologia, as redes de monitoramento existentes foram reestruturadas, para estar em consonância com os objetivos existentes no momento. Dessa forma, os registros atuais da Agência das Bacias PCJ indicam 202 pontos de monitoramento (ativados e desativados) na região, dos quais 162 são dos órgãos gestores e 40 de parceiros, que compartilham seus dados de forma colaborativa. Dentre esses, 87 são de monitoramento quantitativo, e 115 são qualitativos.

Nas estações de quantidade, são monitorados chuva, nível e vazão. No caso da precipitação, o monitoramento é feito de três maneiras – pluviômetros, Radar Meteorológico de São Paulo<sup>2</sup> e Sistema Integrado de Estimativa e Previsão de Chuvas (Siprec<sup>3</sup>), descrito em Almeida et al. (2019) –, resultando, assim, em três parâmetros: chuva no ponto (pluviômetro), chuva radar (Radar Meteorológico de São Paulo) e chuva integrada (Siprec). No monitoramento dos corpos d'água, mede-se a cota fluviométrica, que é utilizada em equações de curva-chave para determinar as vazões na seção do rio. Nos pontos de monitoramento qualitativo, há diversos parâmetros analisados (condutividade, Demanda Bioquímica de

<sup>2</sup> Radar de propriedade do DAEE, instalado na barragem de Ponte Nova, na divisa dos municípios de Salesópolis e Biritiba-Mirim (SP).

<sup>3</sup> O Siprec corresponde à estimativa a partir de dados de estações meteorológicas, satélites e radares meteorológicos.



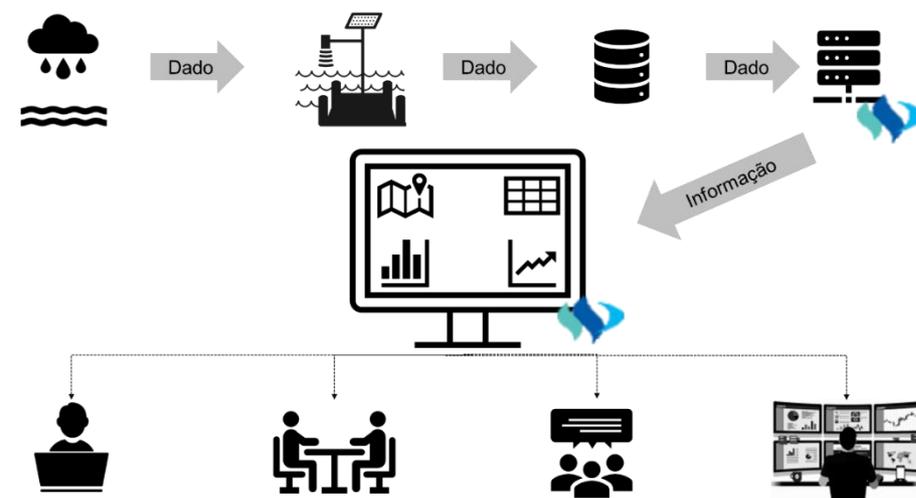
Oxigênio, pH, oxigênio dissolvido, temperatura etc.), devido aos diferentes objetivos de cada avaliação.

Esse monitoramento é fundamental para o gerenciamento das Bacias PCJ, pois possui diversas finalidades, condizentes com as apontadas por Longo Júnior (2011) e ANA (n.d.), como: acompanhamento de alterações da qualidade e quantidade dos corpos d'água; embasamento de estudos sobre eventos hidrológicos críticos; alerta para possíveis impactos adversos; alimentação de modelos de simulação; avaliação do cumprimento de normas regulamentadoras; integração com instrumentos de gestão; subsídios aos processos decisórios; gestão em tempo real e planejamento, etc.

Devido à importância, todos os dados de monitoramento das Bacias PCJ (inclusive os das estações desativadas) são armazenados no banco de dados do SSD PCJ, e posteriormente processados, para então serem disponibilizados publicamente em sua interface on-line, nas seções de mapas e de monitoramento (Figura 2).

**Figura 2**

*Fluxo de dados e informações das estações de monitoramento*



**Fonte:** Elaboração própria (2021).

Na Figura 2, observa-se que o fluxo se inicia nos pontos de monitoramento, com a coleta dos dados por equipamentos de medição; esses dados são armazenados em banco de dados e posteriormente processados pelo SSD PCJ, sendo, então, transformados em informações, que são disponibilizadas na interface on-line. Essas podem ser consultadas nos formatos de mapa, tabela e gráficos de colunas e linhas por seus diferentes usuários (órgãos gestores, Salas de Situação, comitês de bacias hidrográficas, usuários de recursos hídricos etc.), subsidiando, assim, suas análises, estudos e decisões.



Tais funcionalidades possibilitam que os usuários visualizem conjuntamente diferentes parâmetros em uma mesma consulta, para um ou vários postos de monitoramento, localizados espacialmente. Com isso, podem fazer análises comparativas e integradas (inclusive quali-quantitativa) de uma grande quantidade de dados, independentemente do seu tipo, fonte ou periodicidade. Essa característica de integração do SSD PCJ é a principal diferença em relação aos demais SIRH do país.

A integração no SSD PCJ de todos os dados gerados, independentemente de suas particularidades (fonte, tipo, frequência de aquisição do dado etc.), é assegurada pela forma como o seu banco de dados foi estruturado. Segundo Tercini et al. (2019) e Goodall, Horsburgh, Whiteaker, Maidment e Zaslavsky (2008), os dados de monitoramento sobre recursos hídricos possuem características tridimensionais, ou seja, é possível correlacionar três atributos: local, parâmetro e tempo. Com essa estrutura cúbica, cada dado armazenado sempre é associado a uma **estação**, a um **parâmetro** e à **data** que ocorreu a medição, permitindo, assim, a integração de dados de diversas fontes.

Como resultado, os dados monitorados são disponibilizados nas seções de mapas e de monitoramento do SSD PCJ, as quais possuem objetivos distintos entre si. A área de mapas tem como objetivo fornecer, simplificada, informações espaciais aos usuários, principalmente em relação à situação atual dos rios. A seção de monitoramento, por outro lado, visa à disponibilização de todos os dados monitorados (série histórica e tempo real), possibilitando que os usuários realizem diferentes análises para fundamentar seus processos decisórios.

Essa seção subdivide-se em dois ambientes, que também possuem características e objetivos diferentes: “Dados agregados” gera resultados de resumo, permitindo que o usuário compare dados de várias estações de monitoramento, os quais são agregados em diferentes períodos de análise; e “Série temporal” permite a comparação de diferentes parâmetros e estações em uma mesma escala temporal.

Embora cada ambiente tenha a sua particularidade, a consulta dos dados ocorre, em geral, pela seleção de posto(s) de monitoramento (quantitativo e/ou qualitativo), do parâmetro monitorado (chuva no ponto, vazão, pH, turbidez etc.), do período da análise (intervalo de tempo a ser considerado, p.e. últimas 24 horas, últimos 30 dias etc.), da escala temporal (horário, diário, mensal ou anual) e do cálculo da agregação (instantâneo, soma, média, máximo, mínimo ou mediana).

Nos dois casos, o módulo de monitoramento propicia a interação usuário-sistema, permitindo que o usuário realize, de maneira prática e rápida, consultas personalizadas, manipulação, análise e exportação de grande quantidade de dados, tal como descrito por Russel et al. (2001). Como resultado das consultas, as informações são disponibilizadas em tabela e gráfico, possibilitando que usuários não-especialistas tenham ferramentas analíticas





manipulem os dados conforme seus próprios objetivos, contribui para agilizar o processo de levantamento de informações e elaboração de relatórios e boletins, estando de acordo com as finalidades dos SIRH (ANA, 2016).

## Figura 4

### Boletim diário da SSPCJ

Postos	2021									Chuva acumulada das 7h de 24/10/2020 às 7h de 25/10/2021 (mm)	Chuva acumulada em Outubro (até 25/10/2021 7h00min) (mm)
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro		
Rio Cachoeira Captação Piracicaba	185,25	213,25	162,50	11,00	46,00	21,00	11,25	16,50	44,50	3,00	181,25
Rio Atibaia Mascote   Nazaré Paulista	199,25	147,75	205,50	2,75	39,00	16,25	30,00	13,00	23,75	1,25	128,00
Rio Atibaia Ardósio	154,20	119,80	182,20	5,20	46,00	20,60	29,60	15,80	27,20	3,20	69,00
Rio Atibaia Bairro da Fonte   Itanha	239,75	83,50	69,00	17,50	29,00	11,75	24,50	17,50	7,00	1,75	103,50
Rio Atibaia Captação Yalinhos	319,60	121,60	41,60	12,60	29,00	20,40	26,40	20,00	9,00	1,00	119,60
Rio Atibaia Desemb. Furtado   Campinas	133,00	155,00	31,00	12,75	13,25	30,00	25,25	10,75	0,50	0,25	74,25
Rio Atibaia Acima de Paulínia	196,00	177,50	38,00	10,00	19,75	25,00	25,25	13,00	6,50	0,50	87,00
Rio Jaguari Guaripocaba   Bragança Paul.	129,60	162,40	111,60	10,60	31,80	50,20	33,80	9,00	21,60	1,20	140,40
Rio Jaguari Buenópolis   Morungaba	155,25	126,25	32,00	8,50	33,75	26,50	37,00	19,50	10,75	1,00	117,75
Rio Jaguari Jaguariúna	165,60	123,40	59,80	7,20	19,20	31,00	22,40	10,00	8,80	0,80	124,00
Rio Camanducaia Dai Bo   Jaguariúna	127,20	214,60	57,60	7,60	25,20	28,60	27,60	9,20	9,40	1,20	96,40
Rio Jaguari Usina Eneer   Cosmópolis	255,00	207,00	146,00	10,00	23,50	34,00	24,00	10,75	4,75	0,75	103,25
Rio Jaguari Foz   Limeira	260,25	118,75	65,75	10,25	18,25	21,75	21,25	19,75	6,50	0,75	76,75
Rio Piracicaba Aimarázi   Americana	312,60	230,20	110,40	18,20	27,00	27,80	26,60	18,80	9,80	1,60	103,80
Rib. Quilombo ETE DAE   Americana	274,20	113,00	110,60	18,20	21,80	15,40	19,60	14,80	8,00	1,00	79,60
Rio Piracicaba Santa Bárbara D'Oeste	227,00	161,25	102,00	31,50	22,45	16,75	25,75	20,00	4,25	1,75	100,25
Rio Piracicaba Piracicaba	198,00	106,00	59,50	22,50	25,75	12,25	24,25	11,00	5,75	0,75	109,25

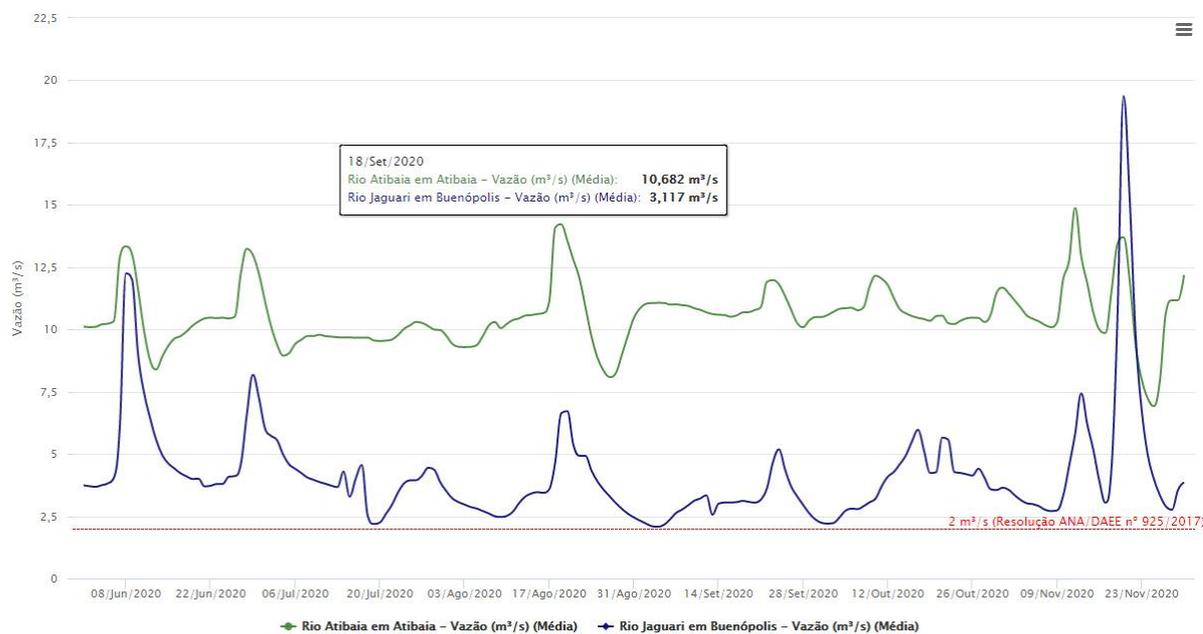
Fonte: SSPCJ (<http://sspcj.org.br/>, recuperado em 25, outubro, 2021).

No caso de “Série temporal”, a análise é voltada para avaliar a evolução de diferentes parâmetros e/ou postos de monitoramento em um mesmo período de análise e escala temporal. Na Figura 5, apresenta-se exemplo de gráfico dessa seção, no qual consta a análise das vazões médias diárias nos postos de controle de Atibaia/SP (“Rio Atibaia em Atibaia”, em verde) e de Morungaba/SP (“Rio Jaguari em Buenópolis”, em azul), no período seco (1º de junho a 30 de novembro) de 2020. O eixo das abscissas contém o período da análise e o eixo das ordenadas o parâmetro monitorado. De forma a auxiliar na análise do atendimento das regras operativas do Sistema Cantareira (Resolução ANA/DAEE n. 925, 2017), configurou-se o gráfico para exibir a linha de referência (em vermelho), indicando o limite de 2 m³/s.



Figura 5

Gráfico “Série temporal”



Fonte: SSD PCJ (<https://ssd.baciaspcj.org.br/>, recuperado em 19, outubro, 2021).

A seção “Série temporal” tem objetivos diferentes de “Dados agregados”, possibilitando avaliar o comportamento e variação dos parâmetros monitorados ao longo do tempo. De modo a complementar as análises temporais, o usuário também pode consultar a curva de permanência, que é importante em análises hidrológicas, por apresentar as frequências acumuladas relativas das vazões de um rio em um determinado local, possibilitando avaliar a ocorrência de oscilações extremas na vazão do rio e a porcentagem de tempo em que o corpo d’água apresenta vazões em determinada faixa (Collischonn, 2013).

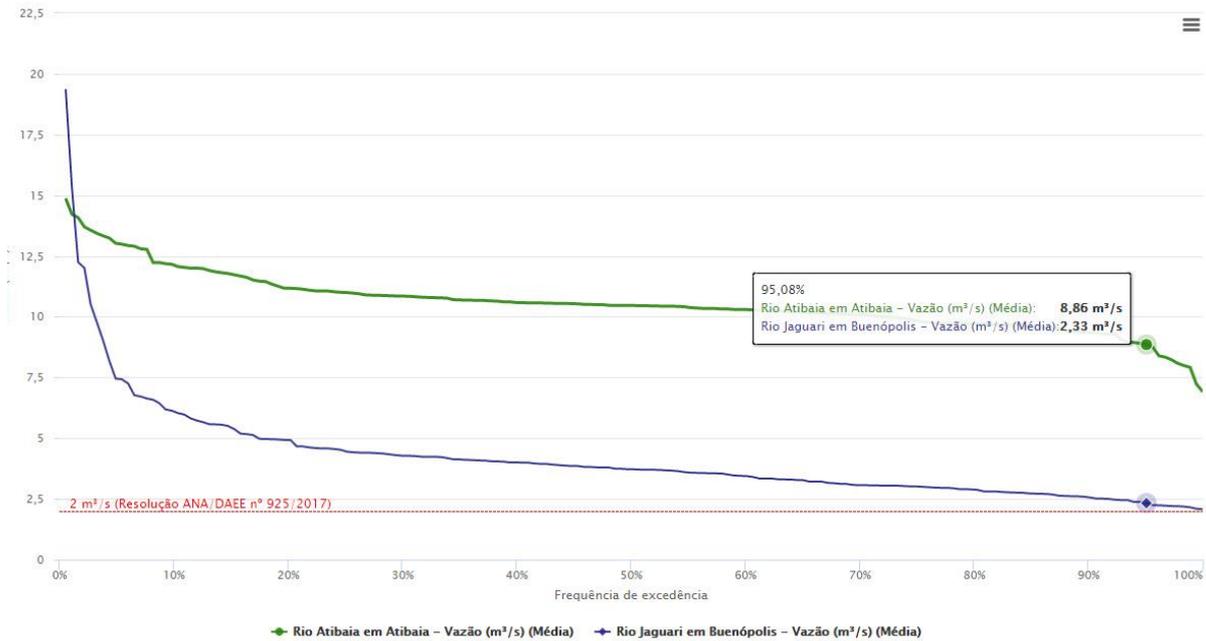
Na Figura 6, apresenta-se a curva de permanência da consulta anterior, indicando que a vazão mínima estabelecida na regra operativa (Resolução ANA/DAEE n. 925, 2017) foi atendida em todo o período analisado, e que, em 95% do tempo (referência comumente utilizada), a vazão média no “Rio Atibaia em Atibaia” (em verde) é superior a aproximadamente 8,9 m<sup>3</sup>/s, e no “Rio Jaguari em Buenópolis” (em azul), superior a 2,3 m<sup>3</sup>/s. Constata-se, também, que o efeito da regularização do Sistema Cantareira é maior no posto de controle localizado em Atibaia/SP.





**Figura 6**

*Curvas de permanência dos rios Atibaia (Atibaia/SP) e Jaguari (Morungaba/SP), obtidas em “Série temporal”*



Fonte: SSD PCJ (<https://ssd.baciaspcj.org.br/>, recuperado em 25, outubro, 2021).

Como demonstrado, as ferramentas do módulo de monitoramento do SSD PCJ permitem que órgãos gestores, comitês de bacias hidrográficas, Salas de Situação e usuários de recursos hídricos façam análises sobre a ocorrência e distribuição de precipitação nas Bacias PCJ, sobre as condições de qualidade e quantidade dos corpos d'água ao longo do tempo, e sobre o comportamento dos rios diante de variabilidades climáticas e operações de reservatórios, assegurando, assim, que o monitoramento seja utilizado em conformidade com os principais objetivos relacionados por Longo Júnior (2011) e ANA (n.d.). Essas informações e análises são essenciais no âmbito de diversas discussões, como debates sobre a ocorrência de eventos climáticos extremos, resiliência e sustentabilidade dos recursos hídricos e necessidade de atualização de normas vigentes.

### SSD PCJ: módulo de mapas

A seção de mapas contém recursos e funcionalidades de SIG em um mapa interativo, no qual estão disponibilizadas diversas camadas e mapas de fundo. A interatividade pode ser realizada por variadas ações (p.e. seleção de camadas), permitindo que os usuários tenham, imediatamente, visão resumida da rede de monitoramento hidrológico e da situação das Bacias PCJ. Nesse módulo, é evidente a integração entre banco de dados, SIG e sistemas de monitoramento em tempo real, descrita por Denzer (2005), o que resulta na divulgação



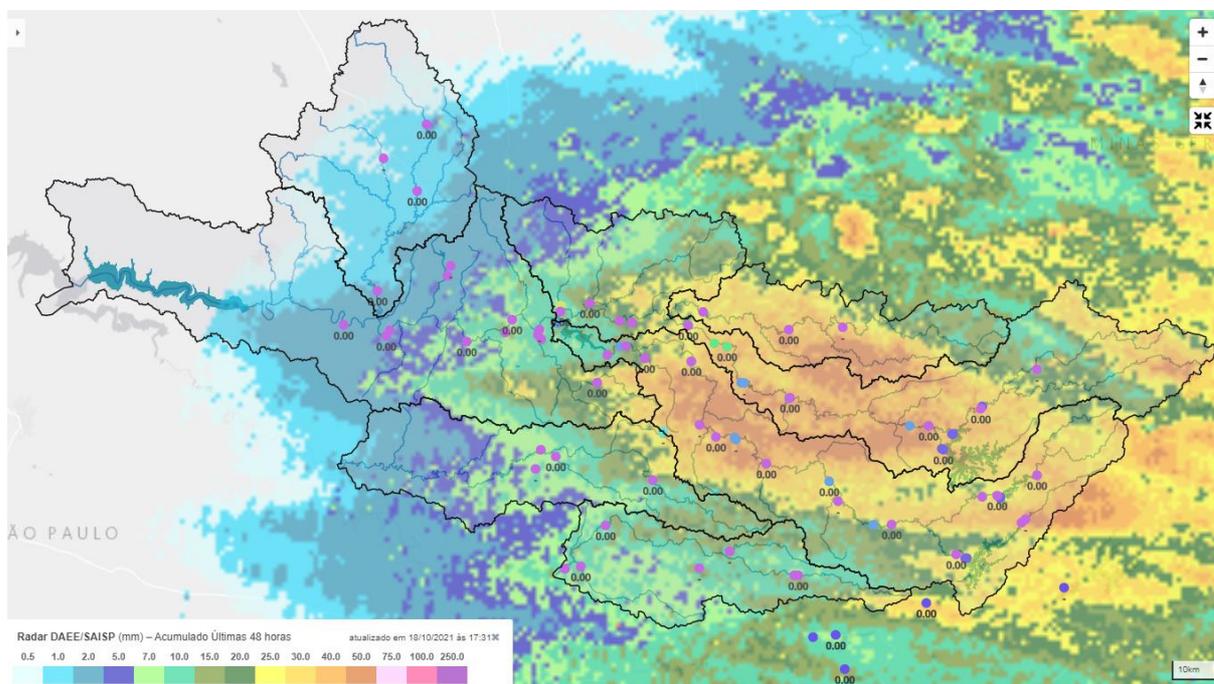
simplificada de grande quantidade de dados organizados espacialmente, assegurando as sugestões de Russel et al. (2001).

Uma das principais camadas é “Postos”, na qual todos os pontos de monitoramento estão elencados como marcadores, permitindo a seleção de visibilidade no mapa. É possível optar pela exibição do rótulo, ou seja, o valor do parâmetro monitorado (chuva acumulada no ponto, chuva acumulada radar, nível, vazão, pH, turbidez etc.) e o intervalo de tempo que será utilizado no cálculo (último dado, última hora, últimas 24 horas, últimos 7 dias etc.), com opções adicionais de editar seu modo de exibição (negrito, tamanho e cor da fonte, opacidade e sobreposição).

Assim como “Postos”, a camada “Radar DAEE/Saisp” merece destaque, por possibilitar que os usuários consultem diferentes imagens do Radar Meteorológico de São Paulo, podendo-se citar última animação, acumulados (última hora, últimas 24 horas, em um evento específico etc.), previsão de deslocamento da precipitação etc. Da mesma forma, é possível personalizá-la, alterando a opacidade das imagens (Figura 7).

## Figura 7

*Módulo de mapas – Chuva acumulada em 48 horas (Radar Meteorológico de São Paulo)*



Fonte: SSD PCJ (<https://ssd.baciaspcj.org.br/>, recuperado em 18, outubro, 2021).

Existem também as camadas “Captações principais”, “Lançamentos principais”, “Hidrografia principal”, “Municípios”, “Reservatórios”, “Área de contribuição” e “Bacias PCJ”, que foram extraídas da base cartográfica do Plano das Bacias PCJ 2020-2035 (Consórcio Profill-Rhama, 2020). Nessas, também é possível realizar diversas ações de edição, como



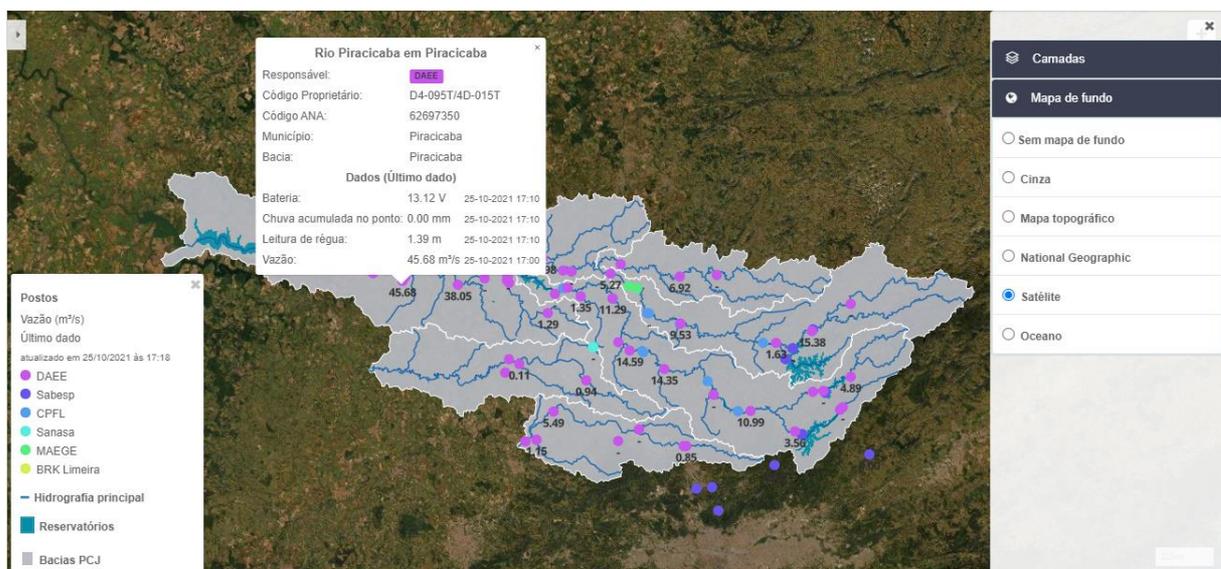
alterar a cor do ícone, sua opacidade, preenchimento, borda, tamanho etc. Em complemento, pode-se personalizar o mapa de fundo, com base em seis opções de mapas temáticos (“Sem mapa”, “Cinza”, “Mapa topográfico”, “National Geographic”, “Satélite” e “Oceano”), que podem ser selecionados e utilizados em conjunto com as demais camadas, visando a otimizar a experiência do usuário na visualização e apresentação das informações.

Outro ponto de destaque é a possibilidade de interação no próprio mapa, permitindo que o usuário obtenha, de maneira simples e direta, informações adicionais sobre a camada de interesse. Ao passar o mouse sobre um posto de monitoramento, por exemplo, seu nome é apresentado na tela; e, ao clicar no posto, apresenta-se uma ficha resumo contendo diversas informações, como a entidade responsável pelo posto, eventuais códigos cadastrados (do proprietário e da ANA), sua localização (município e sub-bacia) e os respectivos dados conforme seleção na edição da camada “Posto” (parâmetro e intervalo de tempo), sendo que por padrão se apresenta a média dos dados de vazão da última hora. Nas demais camadas, também é possível visualizar um conjunto de informações, como a classe do rio na “Hidrografia principal”, a área do município e sua inserção nas Bacias PCJ.

Na Figura 8, ilustra-se a interação no mapa com informações de posto de monitoramento, em mapa de fundo “Satélite”.

**Figura 8**

*Interatividade na camada “Postos”*



Fonte: SSD PCJ (<https://ssd.baciaspcj.org.br/>, recuperado em 25, outubro, 2021).

Esse módulo possui, ainda, uma ferramenta de desenho e medição, que permite ao usuário adicionar marcadores conforme seus interesses, e desenhar linhas e polígonos, com indicação da respectiva distância e área.



Por meio dos diversos recursos e interações existentes, tem-se acesso, de maneira direta e bastante simplificada, a informações atualizadas e alocadas espacialmente, que foram sintetizadas a partir de grande quantidade de dados. As experiências dos usuários com esse módulo indicam que tais funcionalidades são importantes para que se tenha uma visão imediata das Bacias PCJ, otimizando, assim, a avaliação de eventuais situações atípicas.

### SSD PCJ: módulo de modelagem

O módulo de modelagem<sup>4</sup> é composto por um modelo matemático quali-quantitativo estruturado em rede de fluxo AcquaNet, desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos (LabSid). Este modelo – baseado em algoritmo *Out-of-Kilter*, que tem como função objetivo (1) minimizar os custos de transferência de água entre os nós da rede do modelo, obedecendo restrições impostas (2) e (3) (Labsid, 2015) – possibilita a análise de sistemas hídricos complexos, por redes de fluxo associadas a base de dados específica, propiciando a simulação de cenários e a geração de resultados sobre os diversos usos e interferências existentes ou que podem vir a ser implementadas em uma bacia hidrográfica (Carvalho, Mélo Júnior, Schardong, & Porto, 2009; Labsid, 2015; Pedrozo et al., 2019).

Função objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \times q_{ij} \quad (1)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{i \in I_j} q_{ij} - \sum_{k \in O_j} q_{jk} = 0 \quad (2)$$

$$I_{ij} \leq q_{ij} \leq U_{ij} \quad (3)$$

Em que:

- $q_{ij}$  = vazão média entre os nós  $i$  e  $j$  durante o intervalo de tempo considerado;

<sup>4</sup> Ferramenta de acesso restrito a usuários específicos.



- $c_{ij}$  = custo unitário, que pode ser monetário ou um fator de ponderação que represente direitos de água ou prioridades operacionais (custo negativo é tratado como um benefício ou prioridade);
- $I_j$  = conjunto de todos os nós com arcos que terminam no nó  $j$ ;
- $O_j$  = conjunto de todos os nós com arcos que se originam no nó  $j$ ;
- $I_{ij}$  = vazão mínima no arco  $(i, j)$ ;
- $U_{ij}$  = vazão máxima no arco  $(i, j)$ .

Como o AcquaNet é um modelo integrado, além da alocação de água, pode-se acoplar também o módulo de qualidade. Assim, o sistema possui, complementarmente, um modelo de Advecção, Dispersão e Decaimento para calcular os parâmetros de qualidade da água (Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, coliformes, série do nitrogênio e fósforo orgânico e inorgânico), que foram considerados na sua concepção, permitindo simular alteração de qualidade nos trechos de rio, diante da disponibilidade de água. Essa funcionalidade em particular reitera que o SSD PCJ contribui no aprimoramento do processo de decisão, haja vista que os cenários possibilitam avaliar a melhor alternativa para assegurar o uso múltiplo das águas em padrões de qualidade adequados, condizendo com ANA (2016), Ono (2008) e Porto e Porto (2008).

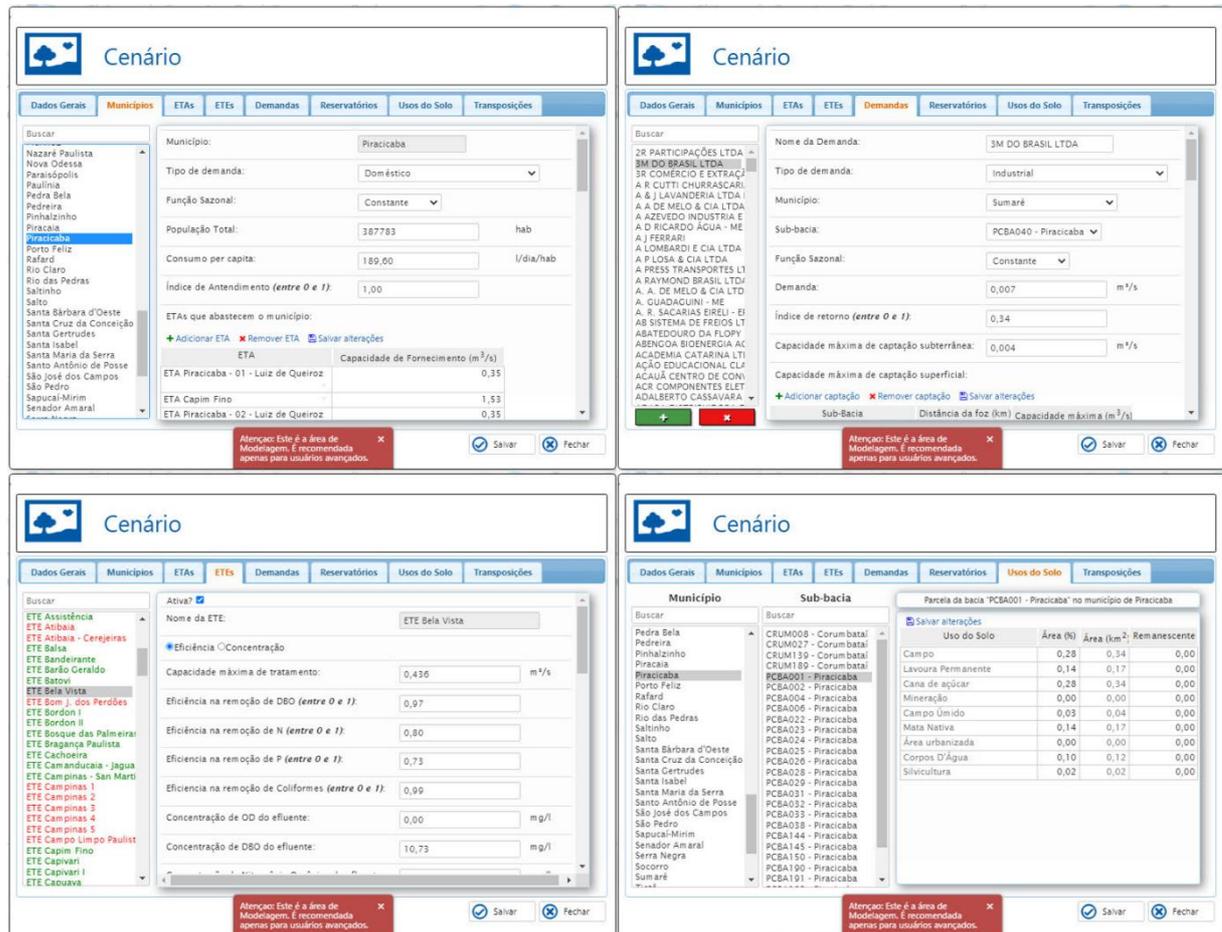
No SSD PCJ, as Bacias PCJ estão representadas por 225 ACs, definidas a partir de base hidrográfica otocodificada. Todos os cálculos dos modelos quali-quantitativos, o balanço hídrico e simulação de qualidade da água são realizados para cada uma das ACs; ou seja, todas as demandas, lançamentos e demais informações são agrupados por AC (Consórcio Profill-Rhama, 2020).

Para criar um cenário, é necessário carregar manualmente os dados na interface (Pedrozo et al., 2019). Como exemplo de dados de entrada, citam-se: população urbana dos municípios, índices de abastecimento e de tratamento de esgoto, índices de perdas na distribuição, eficiência dos processos de tratamento, demandas pontuais dos diversos usos existentes e uso do solo etc. (Figura 9).



Figura 9

Exemplo de dados de entrada de cenários



Fonte: SSD PCJ (<https://ssd.baciaspcj.org.br/>, recuperado em 16, outubro, 2021).

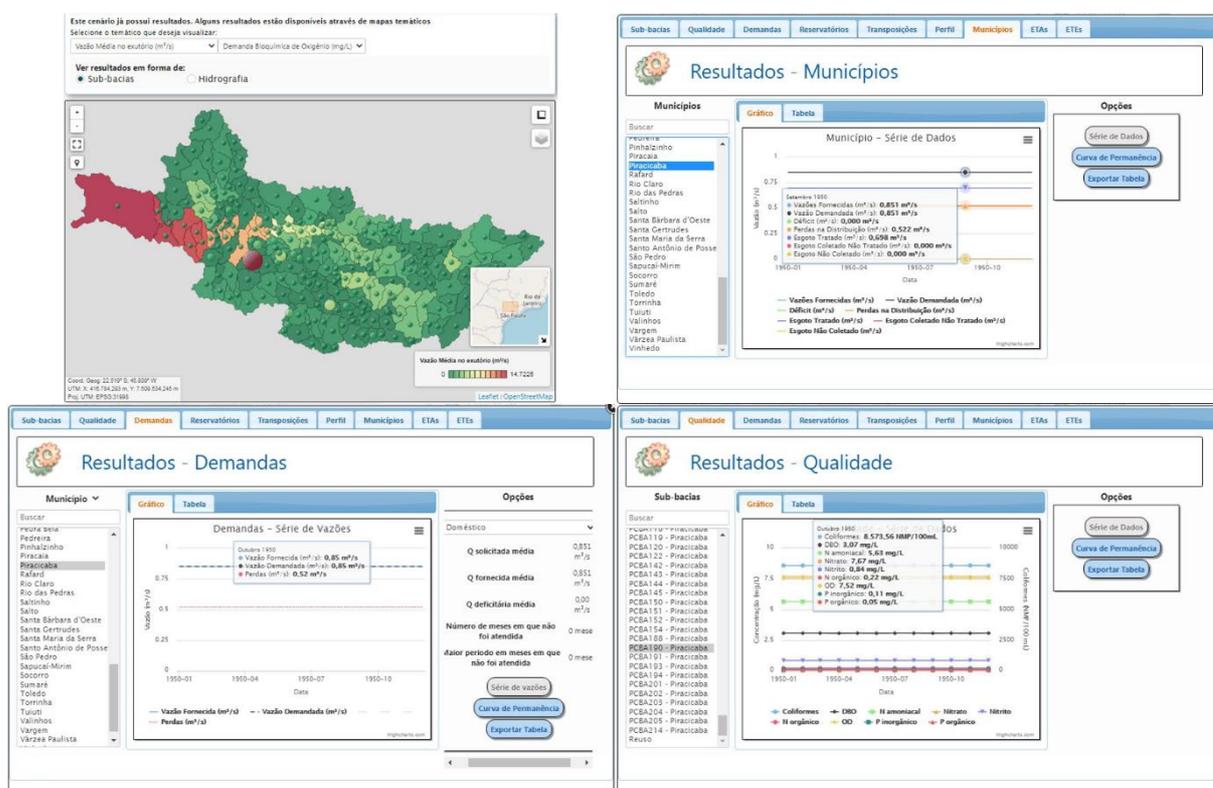
O modelo possui, ainda, um conjunto de “dados gerais”, considerados em todos os cenários como um background, i.e., a base geral de dados que impacta as simulações. Nela, estão os dados de vazões naturais, os grupos de demandas (irrigação, industrial, doméstico, dessedentação animal, urbano privado), o detalhamento de reservatórios e transposições etc. Esses dados não caracterizam os cenários, mas sim uma base que fornece insumos para as simulações e a calibração do modelo.

Após o carregamento dos dados e efetuadas as simulações, os resultados gerados podem ser analisados em diferentes escalas – municipal, estações de tratamento de água e esgoto, demandas pontuais assumidas para aquele cenário e em trechos intermediários de uma sub-bacia, i.e., ACs (Consórcio Profill-Rhama, 2020). Na Figura 10 apresenta-se exemplo de resultados.



Figura 10

Exemplos de resultados de cenário



Fonte: SSD PCJ (<https://ssd.baciaspcj.org.br/>, recuperado em 16, outubro, 2021).

Esse módulo foi intensamente utilizado no Plano das Bacias PCJ 2020-2035 (Consórcio Profill-Rhama, 2020) nas simulações de cenários futuros (2025, 2030 e 2035), para avaliar os impactos das intervenções e demandas previstas na quantidade e qualidade da água, fornecendo subsídios para o planejamento das ações a serem implementadas na região, como destacado por Lima (2007) e INBO & UNESCO (2018). Para gerar tais cenários, alimentou-se o modelo com dados monitorados pelos municípios e órgão gestores, além da previsão de investimentos no setor de saneamento, desde a ampliação dos sistemas de esgotamento sanitário, até a implantação de novos reservatórios e redução dos índices de perdas de água na distribuição, integrando informações tanto sobre água quanto aos fatores intervenientes à gestão, corroborando a visão de Moran et al. (2020).

Embora na literatura, muitas vezes, se enalteça a base de modelos – composta pelos modelos matemáticos utilizados na simulação de cenários –, é importante ressaltar que esse tipo de sistema deve ser considerado pela inter-relação de todos os seus módulos, para garantir que todas as informações elencadas por Moran et al. (2020) sejam de fato integradas. No caso do SSD PCJ, por exemplo, as diferentes seções – Monitoramento, Mapas e Modelagem – se correlacionam, direta ou indiretamente.





É nesse contexto que a utilização do SSD PCJ no Plano de Bacias não se limita à modelagem para a simulação dos cenários futuros quali-quantitativos, pois seu principal desafio diz respeito ao monitoramento da implementação das ações e os impactos decorrentes. Assim, visualiza-se estreita relação da seção “Monitoramento” com a implementação do Plano, uma vez que o contínuo monitoramento da situação dos corpos d’água subsidia o acompanhamento do atendimento das classes de enquadramento dos corpos d’água, indicando se as ações planejadas estão sendo efetivas, ou se há necessidade de ajustes para que as metas definidas sejam alcançadas.

## Conclusões

As análises ora apresentadas evidenciam a complexidade existente no processo de gerenciamento dos recursos hídricos, destacando-se a importância da aquisição consistente de dados hidrológicos e da estruturação de base de dados robusta e confiável, que apoiem a gestão e o planejamento de bacias hidrográficas. Nesse contexto, o SSD PCJ é ferramenta importante para subsidiar os processos decisórios na área de abrangência das Bacias PCJ, pois permite a integração de grande quantidade de dados, independentemente do tipo, fonte ou periodicidade.

Isso possibilita que os dados da área de interesse sejam visualizados e analisados em interface única, reduzindo, assim, o tempo dispendido na aquisição de dados e otimizando as análises e ações de diversos usuários. Além disso, nesse sistema são disponibilizados publicamente dados históricos e em tempo real, permitindo comparações entre diferentes períodos e pontos de monitoramento, subsidiando ações de gestão operacional e de planejamento dos recursos hídricos.

O SSD PCJ possui características que potencializam a sua aplicação na gestão de recursos hídricos, estando em consonância com os princípios e objetivos de SIRH e de SSD, sobretudo referentes ao apoio para desenvolvimento de instrumentos de gestão, à descentralização da obtenção de dados e informações e à transparência no uso do sistema, com a disponibilização pública de dados e informações atualizadas em interface on-line.

Como este trabalho demonstrou que os três módulos inter-relacionados do sistema contribuem significativamente para as ações de gerenciamento das Bacias PCJ, as experiências aqui descritas podem ser replicadas em outras bacias hidrográficas, contribuindo, assim, para a efetividade da gestão e do planejamento dos recursos hídricos. O órgão executor, além de adquirir ou desenvolver um software com os requisitos discutidos no artigo, terá que dispor de serviço de extração dos dados de fornecedores e ingestão no sistema proposto, e também de pessoal capacitado para interpretá-los. Cabe mencionar que existem diversos desafios técnicos a serem explorados na questão da padronização de



nomenclatura de variáveis hidrológicas e de arquivos para troca de informações hidrológicas entre sistemas.

Ressalta-se que sistemas como o apresentado neste trabalho, uma vez implementados e utilizados como ferramenta de gestão de bacia hidrográfica, ganham diversas atribuições, como: avaliação de indicadores e/ou valores de referência de situações críticas de escassez hídrica ou de qualidade da água; identificação de situações de riscos e emissão de alertas para minimizar impactos adversos; fornecimento de informações úteis para processos de fiscalização, proposição de normas regulamentadoras e planejamento de investimentos; etc. Sendo assim, a utilização de sistemas semelhantes ao SSD PCJ em outras bacias hidrográficas pode contribuir com a ampliação da capacidade de gestão, principalmente pela estrutura do banco de dados tridimensional e de consultas e visualização integrada de dados de naturezas distintas.

Salienta-se, enfim, a necessidade de ampliar linhas de pesquisa multidisciplinares que permeiem a temática de sistemas de informação e gerenciamento de recursos hídricos, ampliando o conhecimento sobre o tema e contribuindo para a disseminação das inúmeras funcionalidades desse tipo de sistema. Nesse sentido, recomenda-se que estudos futuros avaliem como a publicidade de informações sobre recursos hídricos influencia o comportamento dos cidadãos da bacia hidrográfica, e proponham metodologias para padronizar nomenclaturas e arquivos, de forma a otimizar a troca de informações entre sistemas.

## Agradecimentos

Agradecemos ao Luiz Roberto Moretti (*in memoriam*), pelas enormes contribuições à gestão de recursos hídricos nas Bacias PCJ, ao LabSid/POLI/USP, à FCTH, aos Comitês PCJ e à Diretoria da Agência das Bacias PCJ.

## Referências

Almeida, A. S., Sorribas, M. V., Lopes, M. S.; Gonçalves, J. E., Da Paz, S. R., Toshioinouye, R., Jusevicius, M. A., Areco, E. R.; D'Ávila, V. C., Leite, E. A., Beneti, C. A. A., Vilella, A. L., Mercanti, J. A., & Léo, E. C. (2019, novembro). Sistema de Previsão Hidrometeorológico para subsidiar a operação do Sistema Cantareira na gestão das Bacias PCJ. *Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 23. Recuperado em 15 outubro, 2021, de <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5490>

Agência Nacional de Águas. (n.d.) *Monitoramento da qualidade da água de rios e reservatórios. Caderno Redes de Monitoramento* [Apostila do Curso Monitoramento da qualidade da água de rios e reservatórios]. Brasília: ANA. Recuperado em 15 outubro, 2021, de <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/2227>



- Agência Nacional de Águas. (2016). *Sistemas de Informação na gestão de águas: conhecer para decidir* [Apostila do Curso Sistemas de Informação na gestão de águas: conhecer para decidir]. Brasília: ANA.
- Bagstad, K., Semmens, D., Waage, S., & Winthrop, R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 5, 27–39. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004>
- Basco-Carrera, L., Warren, A., Beek, E., Jonoski, A., & Giardino, A. (2017). Collaborative modelling or participatory modelling? A framework for water resources management. *Environmental Modelling & Software*, 91, 95-110. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.014>
- Bolognesi, Thomas, & Kluser, Stéphane. (2018). Water security as a normative goal or as a structural principle for water governance. A Critical Approach to International Water Management Trends: Policy and Practice; Palgrave Studies in Water Governance: Policy and Practice; Palgrave MacMillan. Londres, UK. Retrieved October 15, 2021, from [https://doi.org/10.1057/978-1-137-60086-8\\_9](https://doi.org/10.1057/978-1-137-60086-8_9)
- Braga, B., Barbosa, P. S. F., & Nakayama, P. T. (1998). Sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3(3), 73-95. Recuperado em 15 outubro, 2021, de <https://doi.org/10.21168/rbrh.v3n3.p73-95>
- Braga, B., & Kelman J. (2016). Facing the challenge of extreme climate: the case of Metropolitan São Paulo. *Water Policy*, 18(S2), 52-69. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.2166/wp.2016.113>
- Carvalho, M. A., Mélo Júnior, A. V., Schardong, A., & Porto, R. L. L. (2009). Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação. *Engenharia de Irrigação e Drenagem*, 13(1), 10-17. Recuperado em 15 outubro, 2021, de <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000100002>
- Collischonn, W. (2013). Hidrologia para engenharia e ciências ambientais (2a ed.). Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos – Cobrape. (2010). *Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2010 – 2020, com Propostas de Atualização do Enquadramento dos Corpos d'Água e de Programa para Efetivação do Enquadramento dos Corpos d'Água até o Ano de 2035* (Relatório Final), s.l. Recuperado em 15 outubro, 2021, de [https://www.comitespcj.org.br/images/Download/PB/PCJ\\_PB-2010-2020\\_RelatorioFinal.pdf](https://www.comitespcj.org.br/images/Download/PB/PCJ_PB-2010-2020_RelatorioFinal.pdf)
- Consórcio Profill-Rhama. (2020): *Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035* (Relatório Síntese), Piracicaba, SP. Recuperado em 15 outubro, 2021, de <https://drive.google.com/file/d/1RUE-Xg7rjXDKIGJS3bs8sS7wKEB6Oqxq/view>
- Costanza, R., Rudolf, D., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S., & Grasso, M. (2017). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28, 1-16. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>



- Dadson, S., Hall, J., Garrick, D., Sadoff, C., Grey, D., & Whittington, D. (2017). Water security, risk, and economic growth: Insights from a dynamical systems model. *Water Resources Research*, 53, 6425–6438. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1002/2017WR020640>
- Denzer, R. (2005). Generic integration of environmental decision support systems – state-of-the-art. *Environmental Modelling & Software*, 20(10), 1217-1223. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.09.004>
- Fundação Agência das Bacias PCJ. (2020). Gestão das Bacias PCJ 2020 – Ano base 2019, Piracicaba, SP. Recuperado em 15 outubro, 2021, de [https://agencia.baciaspcj.org.br/wp-content/uploads/Revista\\_Bacias\\_PCJ\\_nova-versao\\_menu\\_navegavel.pdf](https://agencia.baciaspcj.org.br/wp-content/uploads/Revista_Bacias_PCJ_nova-versao_menu_navegavel.pdf)
- Gain, A.K., Giupponi, C., & Wada, Y. (2016). Measuring global water security towards sustainable development goals. *Environmental Research Letters*, 11(12), 124015. Retrieved October 15, 2021, from <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124015>
- Ghasemi, A., Saghafian, B., & Golian, S. (2017). System dynamics approach for simulating water resources of an urban water system with emphasis on sustainability of groundwater. *Environmental Earth Sciences*, 76, 637. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6887-z>
- Ghashghaie, M., Marofi, S., & Marofi, H. (2014). Using System Dynamics Method to Determine the Effect of Water Demand Priorities on Downstream Flow. *Water Resources Management*, 28, 5055–5072. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0791-z>
- Goodall J. L., Horsburgh J. S., Whiteaker T. L., & Maidment D. R., & Zaslavsky I. (2008). A first approach to web services for the National Water Information System. *Environmental Modelling & Software*, 23(4), 404-11. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.01.005>
- Gössling, S. (2015). New performance indicators for water management in tourism. *Tourism Management*, 46, 233-244. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2014.06.018>
- International Network Of Basin Organizations & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – INBO E UNESCO. (2018). The handbook on water information systems: administration, processing and exploitation of water-related data. WMO. Retrieved October 15, 2021, from [https://www.riob.org/sites/default/files/\\_HB-2018-SIE-BAT\\_web.pdf](https://www.riob.org/sites/default/files/_HB-2018-SIE-BAT_web.pdf)
- INTERNATIONAL OFFICE FOR WATER – IOWater. (2013). Regional project on Creating Shared National Water Information Systems towards a Mediterranean Water Knowledge Platform. IOWater.
- Karamouz, M., Kerachian, R., & Zahraie, B. (2004). Monthly water resources and irrigation planning: Case study of conjunctive use of surface and groundwater resources. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(5), 391–401. Retrieved October 15, 2021, from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:5\(391\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:5(391))
- Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos. (2013). *AcquaNet* [Manual]. São Paulo, SP.



- Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (1997). Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União. Brasília, DF.
- Lima, G. (2007). *Riverhelp!: sistema de suporte a decisões para planejamento e gerenciamento integrado de recursos hídricos*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. Disponível: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-23042009-142552/pt-br.php>
- Longo Júnior, M. S. (2011). *Monitoramento da qualidade da água na Microbacia Furninha – Município de Ourinhos/SP*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ourinhos, SP, Brasil. Disponível: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/155024>
- Lopes, M. S., Léo, E. C., Garcia, J. I. B., Santi, A. D., Pedrozo, D. B., Tercini, J. R. B., & Gonzalez, V. A. R. (2019, novembro). Monitoramento telemétrico como ferramenta de gestão de recursos hídricos. *Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 23. Recuperado em 15 outubro, 2021, de <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4926>
- Loucks, D. P. (2006, julho). Generic simulation models for facilitating stakeholder involvement in water resources planning and management: a comparison, evaluation and identification of future needs. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. 451. Burlington, Vermont, Estados Unidos, 3. Retrieved October 15, 2021, from <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2006/all/224>.
- Moran, T., Saracino, A., Sugg, Z., Thompson, B., & Martinez, J. (2020). *Evaluating the Use of Data Platforms for Water Management Decisions*. Water in the West. California: Stanford Digital Repository.
- Ono, S. (2008). *Sistema de Suporte à Decisão para gestão de água urbana - URBSSD*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. Disponível: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-15082008-094908/publico/Dissertacao\\_Sidnei\\_Ono.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-15082008-094908/publico/Dissertacao_Sidnei_Ono.pdf)
- Pallotino, S., Sechi, G., & Zuddas, P. (2005). A DSS for water resources management under uncertainty by scenario analysis. *Environmental Modelling and Software*, 20(8), 1031–1042. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.09.012>
- Pedrozo, D.B., Santi, A.D., Lopes, M.S., Léo, E.C., Tercini, J.R.B., Gonzalez, V.A.R., & Garcia, J.I.B. (2019, novembro). Os Sistemas de Informações sobre Recursos Hídricos – Análise da abordagem no contexto das Bacias PCJ. *Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 23. Recuperado em 15 outubro, 2021, de <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5054>
- Porto, M. F. A., & Porto, R. L. L. (2008). Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos avançados*, 22(63), 43-60. Recuperado em 15 outubro, 2021, de <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200004>
- Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 925, de 29 de maio de 2017 (2017). Dispõe sobre as condições de operação para o Sistema Cantareira. Diário Oficial da União. Brasília, DF.



- Russel, C. S., Vaughan, W. J., Clark, C. D., Rodriguez, D. J., & Darling, A. H. (2001). *Investing in water quality: measuring benefits, costs and risks*. Washington: Inter-American Development Bank.
- Santi, A. D., Lopes, M. S., Pedrozo, D. B., Léo, E. C., Barufaldi, P. G. A. (2020, novembro). Análise da integração dos Planos de Bacias e Sistemas de Informações na gestão e planejamento dos recursos hídricos: a experiência das Bacias PCJ. *Anais da Jornada de Gestão e Análise Ambiental*, São Carlos, SP, Brasil, 6.
- Sordo-Ward, Á., Granados, I., Martín-Carrasco, F., & Garrote, L. (2016). Impact of Hydrological Uncertainty on Water Management Decisions. *Water Resources Management*, 30(14), 5535–5551. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1505-5>
- Tercini, J.R.B., Gonzalez, V.A.R., Silva, C.V.F., Garcia, J.I.B., Mello Júnior, A.V., Oliveira, C.P.M., Luongo F.A.P., Lopes, M. S., Pedrozo, D.B., & Santi, A.D., & Léo, E.C. (2019, novembro). Modelo multidimensional de banco de dados hidrológicos em PostgreSQL: estudo de caso SSDPCJ. *Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 23. Recuperado em 15 outubro, 2021, de <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4934>
- Quesada-Montano, B., Westerberg, I.K., Fuentes-Andino, D., Hidalgo, H.G., & Halldin, S. (2018). Can climate variability information constrain a hydrological model for an ungauged Costa Rican catchment? *Hydrological Processes*, 32, 830–846. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1002/hyp.11460>
- Walker, R., Beck, M., Hall, J., Dawson, R., & Heidrich, O. (2014). The Energy-Water-Food Nexus: Strategic Analysis of Technologies for Transforming the Urban Metabolism. *Journal of Environmental Management*, 141(1), 104–115. Retrieved October 15, 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.054>