

Brasília, 6 de agosto de 2021.

Ao Coordenador de Águas Subterrâneas

Assunto: Metodologia e condições de contorno para a definição de áreas relevantes (*hot spots*) para a implementação da gestão integrada rio/aquífero no Brasil

Referência:

1. Introdução

As águas subterrâneas são **responsáveis** pela manutenção da **perenidade dos rios**, na grande parte dos cursos de água superficiais do país, excetuando-se a regularização originada dos reservatórios artificiais. Nos **períodos de estiagem**, quando as chuvas diminuem consideravelmente ou cessam, as vazões nos rios são mantidas pelo fluxo advindo dos aquíferos conectados, a partir do **escoamento de base** (Figura 1a). O escoamento de base é a componente do ciclo hidrológico que representa a interdependência entre os aquíferos aflorantes e os corpos d'água superficiais, ou seja, nas situações de perenidade natural os aquíferos funcionam como um reservatório regularizador das vazões dos rios. Importante destacar que, em alguns casos, esta contribuição também pode ocorrer no sentido inverso nos períodos de chuva, ou em casos específicos, quando o rio alimenta os aquíferos subjacentes (Figura 1b).

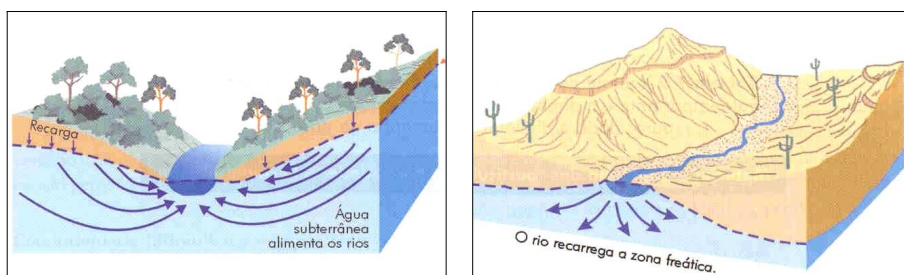


Figura 1. Blocos diagramas (a) mostrando a contribuição do escoamento de base para os rios e (b) rio temporário contribuindo com o aquífero (Teixeira et al., 2003).

Essa conexão mostra que os usos e as intervenções sofridas pelos aquíferos refletem nas vazões liberadas aos rios, especialmente nas vazões mínimas de referência utilizadas para balizar a disponibilidade hídrica superficial nos pleitos de outorga. Assim, problemas de superexploração, contaminação, depleção dos níveis e das recargas dos aquíferos são potenciais ameaças às águas superficiais a eles conectadas. Esse fato indica a **importância** de que haja uma **gestão integrada dos recursos hídricos** pelos órgãos gestores responsáveis.

A gestão integrada representa um conjunto de procedimentos que visam garantir a sustentabilidade hídrica quanto ao aproveitamento integrado das águas superficiais e

subterrâneas, de forma **articulada** entre os órgãos gestores de recursos hídricos (Estados e União), com vistas a **compatibilizar os usos de mananciais interdependentes**. Atualmente, são diversas as ações integradas no âmbito da gestão de recursos hídricos para gerir de forma conjunta rios e reservatórios, de interesse comum, mas muito raras as relacionadas ao manejo integrado de aquíferos e rios. As alocações negociadas de água e os marcos regulatórios são exemplos de ferramentas utilizadas para este fim.

Recentemente a **gestão integrada rio/aquífero** vem sendo cada vez mais discutida no Brasil, sobretudo em regiões mais atingidas pela escassez hídrica, onde as águas subterrâneas têm sido mais procuradas para os diversos usos em substituição às águas superficiais, mais diretamente atingidas pelas variações climáticas. Têm sido cada vez mais comuns relatos de perfuração de poços em áreas de aluviões dos rios, por exemplo, onde a conexão rio/aquífero é mais direta e rápida; além de relatos de potenciais conflitos, em que os usuários de águas superficiais veem como ameaça o aumento da perfuração de poços em aquíferos livres. Sophocleous (2000), em seu artigo sobre desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos, já apontava que poucas áreas das políticas públicas são tão contenciosas quanto à da gestão dos recursos hídricos.

Em algumas regiões, os mananciais subterrâneos se apresentam como reservas estratégicas em situações críticas, mais comumente os aquíferos rasos (aflorantes) que apresentam um acesso mais fácil à água. Esses mananciais estão diretamente conectados com os rios, sendo necessário **melhorar o conhecimento da interdependência** entre os fluxos superficiais e subterrâneos, com vistas a subsidiar as **ações para a implementação da gestão integrada**, bem como para indicar quais áreas são **prioritárias** para essa abordagem.

A melhoria desse conhecimento é primordial, tendo em vista que em algumas situações de **interdependência entre rios e aquíferos**, verifica-se uma **dupla dominialidade do recurso hídrico na mesma bacia hidrográfica**, fato que requer a **atuação integrada e articulada** de órgãos gestores de recursos hídricos **estaduais e da União**. A atuação integrada entre os órgãos é ainda mais importante nas bacias críticas, onde há conflitos, instalados ou potenciais, pelo uso da água.

Ainda nos casos em que a dominialidade é exclusivamente estadual, é necessário o conhecimento dessas **interações**, uma vez que normalmente as disponibilidades hídricas superficial e subterrânea são avaliadas de forma separada pelo órgão gestor, ainda que o rio dependa do aquífero para garantir sua perenidade, influenciando diretamente as vazões mínimas referenciais, utilizadas como critério para a concessão de outorga de água superficial.

Vale ressaltar que as **condições de contorno** para a implementação da gestão integrada se aplicam aos aquíferos livres e rios perenes, onde exista conectividade direta entre as águas superficiais e subterrâneas. Nesse caso deve-se atentar para as bacias ou trechos de rios regularizados por reservatórios artificiais, bem como àquelas onde existam recargas urbanas (infiltração de esgotos e perdas da rede de distribuição). Por fim, deve-se avaliar regiões onde há retorno da irrigação (áreas rurais), de maneira a eliminar ou reduzir contribuições antrópicas que possam simular aportes do escoamento de base aos rios.

O **objetivo** desta Nota Técnica é apresentar metodologias para serem aplicadas na identificação de áreas prioritárias para implementação da **gestão integrada rio/aquífero** no Brasil, com base em conceitos técnicos que demonstrem uma **conexão relevante** entre rios e aquíferos. Essa avaliação será realizada com base em temas como hidrogeologia, climatologia e hidrologia, com aplicação de métodos de separação de fluxos, tais como, relações entre vazões mínimas e médias, filtros digitais e análises de curvas de recessão e de permanência.

2. Justificativas

A **gestão integrada rio/aquífero** institui aos gestores uma configuração de implementação com particularidades singulares, decorrentes do contexto técnico e geopolítico brasileiro. A **dupla dominialidade dos recursos hídricos**, atribuída pela Constituição Federal de 1988, em seus artigos 20 e 26, traz à própria implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997) uma necessidade de **articulação entre os Estados e a União**, conforme preconizado em seu o artigo quarto:

“Art. 4º A União articular-se-á com os Estados tendo em vista o gerenciamento dos recursos hídricos de interesse comum”

Na **gestão integrada rio/aquífero**, o cenário de articulação deve ser ainda mais efetivo, tendo em vista que além do compartilhamento de rios interligados em uma mesma bacia hidrográfica, existem situações em que vários estados compartilham o mesmo aquífero, cujo fluxo de base contribui para rios estaduais, afluentes de rios de domínio da União ou mesmo contribui de forma direta para rios federais (Figura 2).

Importante salientar que na Figura 2 distinguem-se duas formas de relacionamento entre a União e os Estados na **gestão** de recursos hídricos: i) uma com interface **regulatória** e outra, ii) de **natureza administrativa** e de **apoio executivo** da União aos Estados.

Na interface **regulatória** entre União e Estados, as condições de entrega de rios estaduais para rios da União ainda estão sendo estabelecidas (Figura 2- 1B e 3B), seja em condições mais gerais, contidas em planos de bacia ou algumas específicas acordadas em marcos regulatórios próprios. Por outro lado, no cálculo das contribuições dos aquíferos, especialmente dos livres, por intermédio do fluxo de base, para os rios estaduais e federais (Figura 2 – 1A, 2, 3A e 4) os órgãos gestores têm pouca informação e aquelas existentes não estão sistematizadas, não havendo mecanismos e diretrizes para esta avaliação.

Neste sentido é comum a existência de dois ou mais estados e a União envolvidos na **gestão** dos recursos hídricos numa mesma bacia. Embora a Lei das Águas (Lei nº 9.433/1997) aponte em seu artigo 4º que a União deve se articular com os Estados tendo em vista o **gerenciamento dos recursos hídricos de interesse comum**, essa articulação não ocorre de forma adequada no âmbito da gestão das águas subterrâneas com a das águas superficiais.

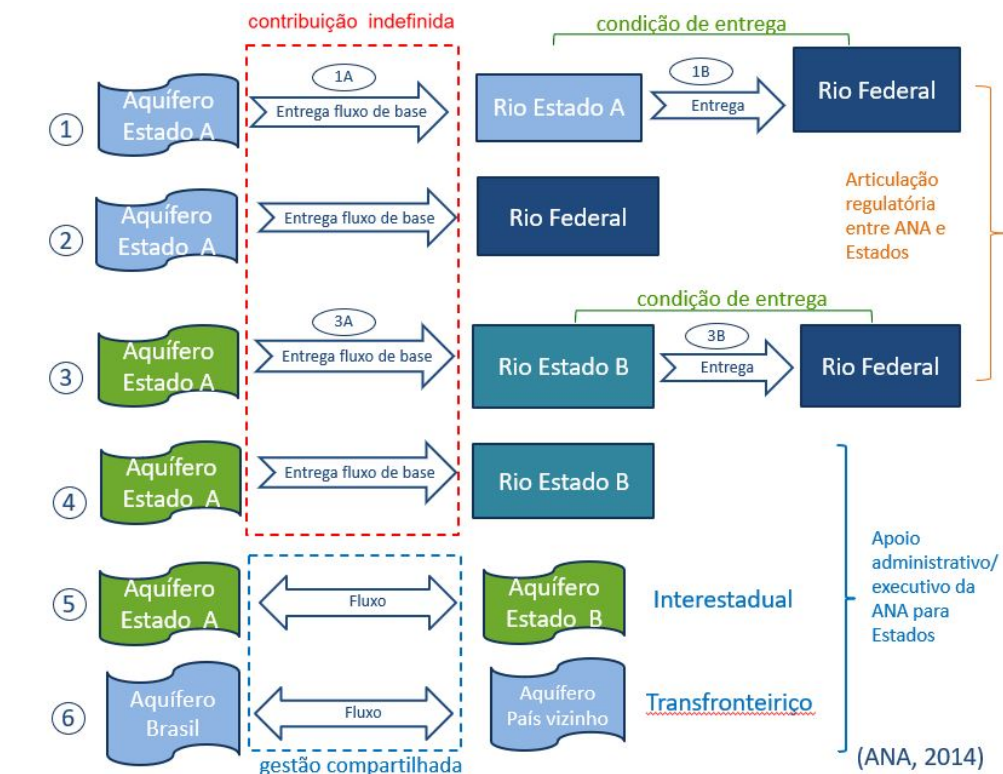


Figura 2. Diagrama com a visão sistêmica entre águas subterrâneas e superficiais e os diversos arranjos entre União e Estados.

Em muitas situações essa articulação é deficiente, a ponto de se ter, como critério de atendimento às demandas de uso de águas superficiais, a **adoção de diferentes vazões de referências numa mesma bacia**, casos em que estados e União compartilham uma unidade territorial básica para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

No âmbito de um mesmo estado, a **desarticulação** ainda ocorre quando o órgão gestor trata aquíferos e rios interligados, como se fossem sistemas desconectados. Embora, muitos normativos orientem essa integração, as análises dos pleitos de outorga para os usuários de águas superficiais e para os de águas subterrâneas não são integradas, tampouco as estimativas das disponibilidades hídricas dos mananciais. Assim, muitos estados trabalham considerando disponibilidades hídricas sobrepostas, o que decorre no desencadeamento de potenciais conflitos, os quais tendem a ser ampliados com o aumento da demanda, em especial do setor agropecuário, e com os efeitos das mudanças climáticas globais, criando uma situação na bacia na qual os usuários de águas superficiais e subterrâneas passam a competir em relação ao recurso hídrico, que na verdade é único.

No caso hipotético de um rio cujo hidrograma é apresentado na Figura 3a, num cenário inicial, de desenvolvimento incipiente da exploração de águas subterrâneas ou exploração sustentável, observa-se que a disponibilidade hídrica superficial está numa situação

“confortável”, pois tanto o escoamento de base quanto a **vazão** natural do rio apresentam valores superiores à **vazão** de referência adotada para a outorga de direito de uso da água superficial. Passando para um quadro de acentuada **redução** do escoamento de base por intensa **exploração** de águas subterrâneas, pode ocorrer o comprometimento da **vazão** outorgável de água superficial no período seco (Figura 3b).

Esse cenário é esperado, em médio e longo prazos, em **regiões** onde as **vazões** mínimas superficiais têm grande dependência do escoamento de base, a demanda de recursos hídricos é intensa e não se considera a interdependência entre as águas superficiais e subterrâneas na **gestão**. A **situação** se agrava onde os **órgãos** gestores não se articulam em bacias compartilhadas, ou, onde essa **articulação** inexistente mesmo dentro de um mesmo estado.



Redução do escoamento de base devido à exploração de águas subterrâneas



Redução da vazão natural do rio

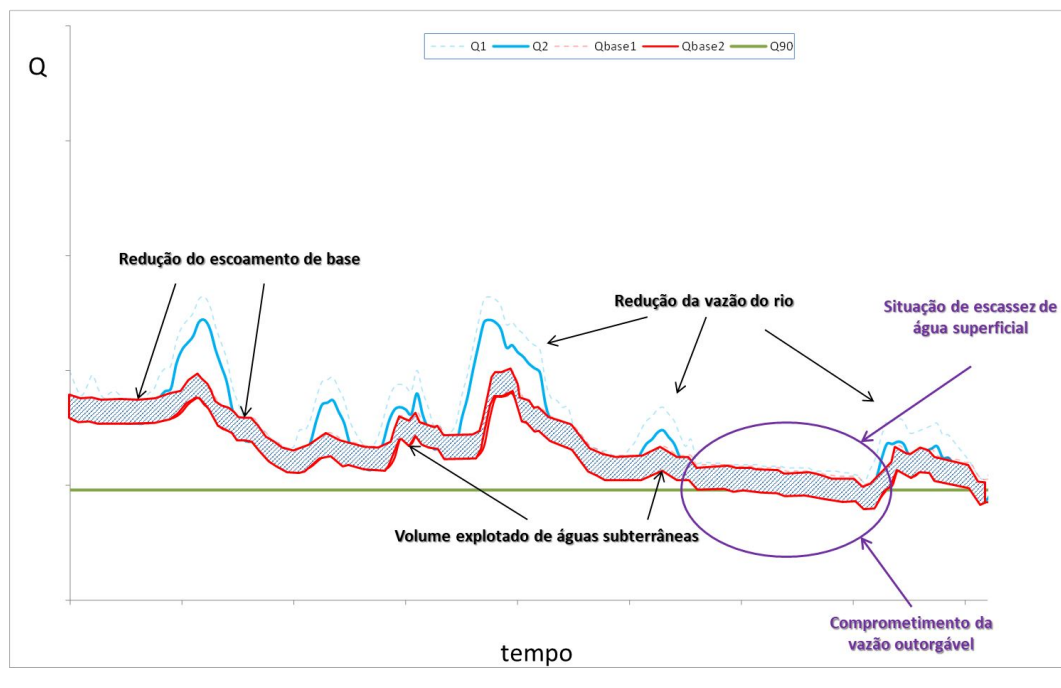


Figura 3. Comportamento da curva de disponibilidade hídrica por meio do traçado da curva de vazão natural do rio (linha azul), do escoamento de base (linha vermelha) e da vazão de referência para a outorga (linha verde) (a) cenário de desenvolvimento incipiente da exploração de águas subterrâneas (exploração sustentável); (b) condições de exploração intensiva de águas subterrâneas.

Essa **desarticulação**, entretanto, não ocorre por falta de normativos regulamentares. Resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) orientam de forma complementar e clara sobre a **gestão integrada rio/aquífero em relação** à maioria dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, como por exemplo, as **resoluções**: 13/2000; 15/2001; 16/2001; 22/2001; 202/2018. O que faltam são **ações concretas** para a sua implementação. Abaixo serão destacados os principais pontos relacionados à **gestão integrada** nessas resoluções:

- ***Resolução nº 13 do CNRH de 2000 - Estabelece diretrizes para a implementação do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos-SNIRH.***

“...Art. 1. A Agência Nacional de Águas - ANA coordenará os órgãos e entidades federais, cujas atribuições ou competências estejam relacionadas com a **gestão de recursos hídricos**, mediante acordos e convênios, **visando promover a gestão integrada das águas** e em especial a **produção**, **consolidação**, **organização** e **disponibilização** a sociedade das informações e ações referentes:”

...

“...b) aos sistemas de **avaliação** e **outorga** dos recursos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, em todo território nacional...”

Esta resolução, além de orientar em seu escopo, comando para a **gestão integrada** de recursos hídricos, remete diretamente à ANA a responsabilidade de implementação do SNIRH, contendo **informações** sobre recursos hídricos e não somente das águas superficiais. O Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNAUH), sistema integrante do SNIRH, já dispõe de informações referentes às águas subterrâneas. Tal processo tornou-se viável a partir do Programa Progestão (Pacto pela Gestão das Águas), em que os estados disponibilizam nesse sistema os dados sobre poços e aquíferos captados dos usuários regularizados de águas subterrâneas.

- ***Resolução nº 15 do CNRH de 2001 - Estabelece diretrizes para a gestão integrada das águas subterrâneas.***

“...Art. 2. Na formulação das diretrizes para a implementação da PNRH deverá ser considerada a **interdependência das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas**.

Art. 3. Na implementação dos instrumentos da PNRH deverão ser incorporadas medidas que assegurem a **promoção da gestão integrada das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas**, observadas as seguintes diretrizes...”

“...Inc. III. Nas outorgas de direito de uso das águas subterrâneas deverão ser considerados critérios que assegurem a **gestão integrada das águas**, visando evitar o comprometimento qualitativo e quantitativo dos aquíferos e dos corpos de água superficial a eles interligados...”



“...Art. 4. No caso de aquíferos subjacentes a duas ou mais bacias hidrográficas o SINGREH e os Sistemas de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estados ou do Distrito Federal deverão promover a **uniformização de diretrizes e critérios para a coleta de dados dos estudos hidrogeológicos necessários à identificação e caracterização da bacia hidrogeológica...**”

“...Art. 5. No caso de aquíferos subjacentes a duas ou mais bacias hidrográficas o SINGREH promoverá a **integração dos diversos órgãos dos governos federal, estaduais e do DF**, que têm competências no gerenciamento de águas subterrâneas...”

Esta Resolução orienta que, na implementação dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, deverão ser incorporadas medidas que assegurem a **promoção da gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas**, sendo que a Lei nº 9.984/2000 atribui à ANA a função de implementadora da PNRH, em articulação com órgãos e entidades públicas e privadas integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

- **Resolução nº 16 do CNRH de 2001 - Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos.**

“...Art. 1, § 4º: A análise dos pleitos de outorga **deverá considerar a interdependência das águas superficiais e subterrâneas** e as interações observadas no ciclo hidrológico visando a gestão integrada dos recursos hídricos...”

Essa normativa dispõe que as outorgas, tanto das águas de dominialidade federal - de responsabilidade da ANA - quanto estadual, deverão buscar procedimentos que visem a **gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas**. Visa evitar o risco de ocorrer, em médio e longo prazo, conflitos entre usuários e entre órgãos gestores, em **regiões de elevada demanda hídrica**, especialmente nos períodos de estiagem, cenários potenciais em regiões de relevante conexão rio/aquífero.

- **Resolução nº 22 do CNRH de 2001 - Orienta estudos e informações sobre águas subterrâneas para elaboração dos planos de recursos hídricos.**

“...Art. 2. Os planos de recursos hídricos devem promover a caracterização dos aquíferos e **definir as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos** e com o meio ambiente, visando a **gestão sistêmica, integrada e participativa das águas...**”

“...Art 3. As informações hidrogeológicas e os dados sobre águas subterrâneas **necessários à gestão integrada dos recursos hídricos** devem constar nos Planos de recursos hídricos e incluir, no mínimo, por aquífero...”

“...Inc. II. O cômputo das águas subterrâneas no balanço hídrico...”

Esta Resolução determina que os Planos de Recursos Hídricos deverão contemplar a **gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos**, avaliando as inter-relações de cada aquífero com os corpos hídricos superficiais e com o meio ambiente. Os planos de bacias mais recentes (Paranapanema, 2014; Grande, 2017; Paraguai, 2018 e Doce, 2019)

contemplaram, na fase de diagnóstico, avaliações integradas que consideram a interação rio/aquífero, o que deve refletir na implementação das ações dos respectivos planos.

- **Resolução nº 202 do CNRH de 2018 - Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplem a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão.**

“Art. 1º Estabelecer diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplem a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas a sua efetivação...”

...

“Art. 3º A gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos contemplará **avaliações hidrológicas integradas...**”

“Art. 5º Para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, **as autoridades outorgantes articular-se-ão entre si**, conforme o caso, para a elaboração de atos administrativos próprios com vistas à **definição de diretrizes e critérios comuns...**”

A resolução mais recente do Conselho sobre gestão integrada rio/aquífero remete a disposições já contempladas em outras normativas mais antigas do CNRH, citadas anteriormente. No entanto, limita o contexto de aplicação a aquíferos livres e rios perenes (conectividade direta), orienta o que se deve contemplar nas avaliações hidrológicas para a gestão integrada, tais como: delimitação de áreas de recarga, contribuição dos aquíferos (fluxo de base) para os rios, disponibilidade hídrica integrada, rede de monitoramento integrada. E ainda dispõe sobre a articulação necessária entre as autoridades outorgantes (Estado-Estado; Estado-União), bem como a elaboração de atos normativos conjuntos.

Conforme pontuado, a efetivação de ações para a gestão integrada rio/aquífero, de acordo com o preconizado pelas normas, necessita do conhecimento da relação rio/aquífero, monitoramento integrado, regulamentação específica por bacia/aquífero – como por exemplo marco regulatório integrado – além de mais efetividade na articulação interinstitucional na abordagem dessa questão.

Exemplos de ações de gestão integrada estão vigentes nos estados da Bahia e Mato Grosso do Sul. A Bahia estabeleceu a partir da Instrução Normativa INGA nº15/2010, elaborada especificamente para o Sistema Aquífero Urucuaia, distâncias mínimas entre poços e entre poços e rios, com vistas a evitar interferências entre usuários e entre os mananciais interligados. Mato Grosso do Sul, por sua vez, adota nas análises dos pleitos de outorga a disponibilidade hídrica subterrânea que considera a relação rio/aquífero. Utiliza como conceito de Reserva Explotável um volume correspondente a 20% da recarga para os aquíferos aflorantes, considerando um recorte por município, que permite um controle mais local da exploração (Mato Grosso do Sul, 2010 e 2015).

Do ponto de vista de articulação entre estados e União - no âmbito particular das águas superficiais - destaca-se importante articulação efetivada na bacia do rio Paranapanema, em

que a ANA e os estados do Paraná e São Paulo uniformizaram a vazão de referência adotada para bacia (Q_{95}). Granziera (2013) já apontava que a falta de uniformidade entre as vazões de referência numa mesma bacia hidrográfica fere um dos fundamentos das políticas de recursos hídricos, que confere à bacia hidrográfica a condição de unidade de gerenciamento e implantação das políticas de águas. Segundo a autora, situações em que na mesma bacia se encontram corpos hídricos de domínios diferentes, parâmetros diversos tornam inconsistente a gestão de recursos hídricos, pois as atividades recebem tratamentos distintos, o que fere o princípio da isonomia.

Todavia, ainda são grandes os desafios para a implementação da gestão integrada rio/aquífero no Brasil, destacando-se entre eles a assimetria na implementação dos instrumentos de gestão, entre estados e estados e estados e União, numa mesma bacia hidrográfica. Em algumas bacias podem ocorrer, por exemplo, da outorga de água subterrânea ser uma rotina e no outro estado, estar incipientemente implementada, com critérios de avaliação completamente diferentes, ou até mesmo não estar implementada. Ademais, é muito comum, como mencionado anteriormente, a adoção de diferentes vazões de referência para a outorga de águas superficiais em estados que compartilham uma mesma bacia, sendo que estas são vazões mínimas, que por sua vez são formadas, em grande parte, por escoamento de base proveniente dos aquíferos. Vale destacar que a vazão de referência para outorga de diversos estados ($Q_{7,10}$, Q_{95}) divergem da União (Q_{90}). Vale destacar que quanto mais restritiva for a vazão, mais importante é a participação do escoamento de base na formação dessa vazão, evidentemente excetuando-se as regularizações por barramentos e as contribuições por água de degelo.

Outro ponto é que a gestão, em geral, é focada na calha do rio e não na bacia como um todo, o que constitui um paradigma a ser superado, uma vez que a água do escoamento de base é “produzida” no território da bacia, e não na calha do rio. Desta forma, o processo de conversão de chuva x recarga x descarga reflete todo o uso e ocupação do solo na bacia, muitas vezes resultando em alterações quantitativas importantes, como a redução na taxa de infiltração, o que impacta negativamente as vazões no período de estiagem.

Foram citados os casos da Bahia, Mato Grosso do Sul e da bacia do Paranapanema, que são ações pontuais no Brasil, mas para que os órgãos gestores de todo o país tenham uma orientação técnica quanto à implementação da gestão integrada rio/aquífero é fundamental que se saiba quais são as áreas onde essa interação é mais relevante. Assim, o **objetivo principal** deste estudo é apresentar um documento com bases técnicas que **aponte áreas sensíveis** no Brasil do ponto de vista da **relação rio/aquífero** com necessidade efetiva para implementação da gestão integrada, com vistas a orientar os órgãos gestores de recursos hídricos.

A gestão integrada se faz mais urgente nas áreas com escassez hídrica onde as premissas da interação rio/aquífero são verdadeiras, situações em que as águas subterrâneas têm sido cada vez mais exploradas e as situações de conflito cada vez mais comuns, ou seja, áreas relevantes que demandam, atual ou futuramente, uma gestão integrada dos recursos hídricos. Em síntese, o presente estudo irá definir as áreas onde os aquíferos contribuem de

forma muito relevante para a formação das vazões superficiais, em especial nos períodos de estiagem, de maneira a orientar os gestores para direcionar esforços de gerenciamento e na aplicação dos instrumentos de gestão de maneira otimizada.

3. Métodos para definição das áreas prioritárias para a gestão integrada no Brasil

A definição das áreas prioritárias para a gestão integrada requer inicialmente uma delimitação, em escala nacional, de áreas compatíveis com as premissas pertinentes da avaliação integrada rio/aquífero. Nesse contexto, para a definição da área considerar-se-á a influência de aquíferos livres e rios perenes, em regiões onde se observa um período sazonal de estiagem bem definido, o que configura um recorte hidrogeológico e climático.

No que tange à avaliação da contribuição dos aquíferos para os rios considerar-se-á múltiplos métodos de análise, com vistas a refinar as estimativas do escoamento de base, cujo valor é influenciado por muitas variáveis intrínsecas da bacia e das atividades de uso e ocupação do solo, bem pelas extrações diretas dos aquíferos e rios. Neste sentido, a contribuição dos aquíferos livres para rios perenes será calculada pelos diversos métodos disponíveis, com a proposição de faixas de valores da participação do escoamento de base na vazão média, com vistas a definir prioridades na implementação da gestão integrada rio/aquífero.

3.1. Delimitação da área de abrangência

A primeira atividade a ser desenvolvida é a identificação das áreas que serão alvo das análises integradas rio/aquífero. Conforme pontuado anteriormente, a principal premissa para essa avaliação é a ocorrência de aquíferos livres e rios perenes, em regiões onde o período de estiagem é bem definido. Neste sentido, foram **excluídas da análise as áreas** com base nos seguintes critérios: **a) ausência de fluxo de base nos períodos de estiagem (rios intermitentes); b) regiões litorâneas; c) áreas com precipitações médias anuais muito elevadas.** Em síntese, foram suprimidas da análise as áreas onde a contribuição do escoamento de base não tem influência relevante na formação das vazões superficiais, seja por questões climatológicas, pela ocorrência satisfatória de precipitações, seja pelo tipo de aquífero presente, que não oferece aportes significativos às vazões superficiais, ou ambas as condições.

Primeiramente, com base nesses pontos, foram excluídas da análise as **regiões com a presença de rios intermitentes e com precipitação menor que 800 mm/ano**, comuns na região do Semiárido Brasileiro, onde os aquíferos fissurais ocorrem e são tidos como maus armazenadores de águas subterrâneas e péssimos reguladores de águas superficiais, **com ausência de fluxo de base no período de estiagem.** Nessas regiões, devido à ausência de bons aquíferos e a não regularização artificial, os rios secam no período de estiagem. Tal fato é agravado ainda pela ausência de manto de regolito/solo ou mesmo pela pequena espessura dos solos. Em algumas situações, quando os aquíferos fissurais ocorrem associados a solos espessos, como visto em algumas regiões do Brasil, a regularização natural acontece.



Pela dificuldade de se trabalhar com a base de drenagens perenes e intermitentes no Brasil, e uma vez que muitos rios têm trechos perenizados, optou-se por excluir da análise os aquíferos fissurais do Semiárido, denominados de Sistema Aquífero Fraturado Semiárido, conforme o Mapa de Aquíferos Aflorantes do Brasil (ANA, 2013), área destacada em laranja na Figura 4. Com esse recorte, essa região não será objeto de análise.

A utilização dessa cartografia também tem o intuito de não excluir das análises integradas algumas bacias sedimentares interiores situadas nessas regiões, onde localmente bons aquíferos têm uma importância local aos corpos d'água superficiais na região do semiárido.

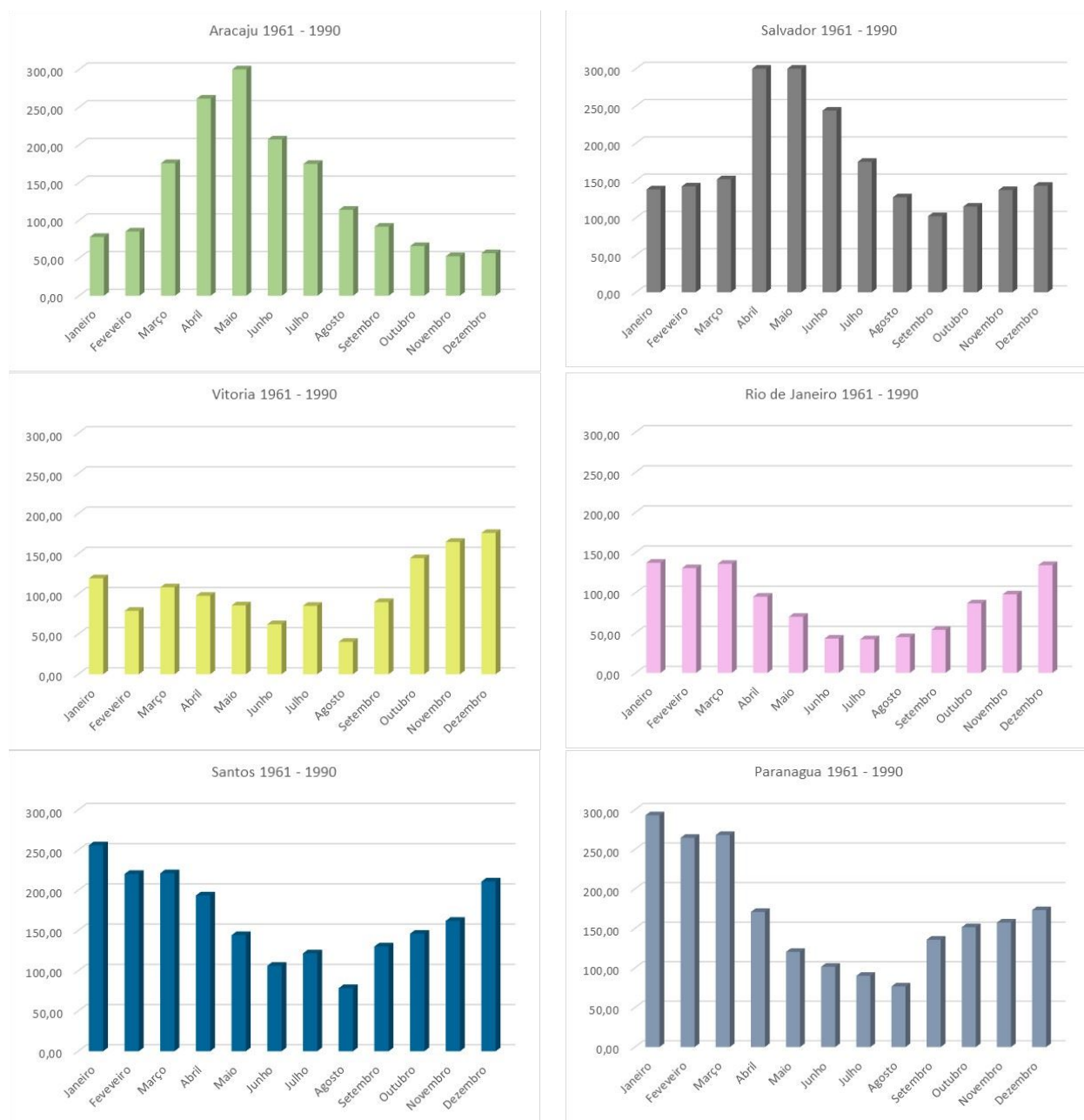
Importante ressaltar que, embora a bacia do rio Verde Grande esteja dentro dos limites do mapeamento do Fraturado Semiárido por questões de escala do mapa base, trata-se de uma região com predominância de aquífero de natureza cárstica, onde há uma grande interação rio/aquífero e deverá ser considerada na avaliação integrada.



Figura 4. Mapa da região de afloramento do Sistema Aquífero Fraturado Semiárido, onde há predominância de rios intermitentes e precipitações anuais abaixo de 800 mm.

No caso do **segundo critério**, parte da **região litorânea** foi excluída do escopo tendo em vista que **não dispõe de um período de estiagem bem definido** contrastante com o período de chuvoso, como se preconiza nas avaliações integradas. Conforme os gráficos de precipitação mensal das principais cidades litorâneas brasileiras (Figura 5), observa-se que, mesmo no

período menos chuvoso, há volumes significativos de precipitação, o que reduz a importância do fluxo de base para a formação das vazões superficiais, pois a grande relevância do escoamento de base é no período de estiagem, quando sustenta o escoamento no rio, em face das reduzidas precipitações. O mapa inicial utilizado para o recorte da região litorânea abrange os municípios defrontantes para o mar (IBGE), acrescido de regiões situadas além desse limite, onde ainda se supõe, com base no mapa de isoietas, haver influência do regime de chuvas do litoral (Figura 6).



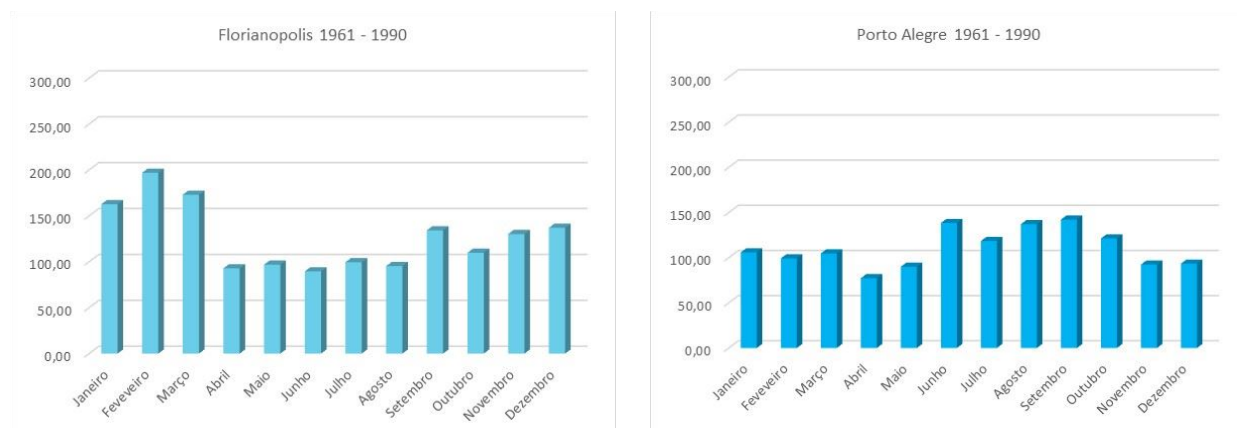


Figura 5. Gráficos de volume de precipitação mensal nas cidades do litoral brasileiro. Fonte: INMET (2020)



Figura 6. Mapa da região litorânea (municípios defrontantes para o mar), onde não há período de estiagem anual marcante.

O terceiro critério refere-se às **áreas com precipitações médias anuais históricas muito elevadas ($P \geq 2.000$ mm)**, com **baixa sazonalidade do regime de chuvas**, localizadas na **região hidrográfica Amazônica**. Nessa região, em **várias estações pluviométricas as precipitações mensais observadas são maiores que 100 mm**, dificultando a **discriminação de um período de recessão bem definido**; e, embora haja uma interação rio/aquífero, esta não chega a ser preponderante para a manutenção das vazões nos rios, tendo em vista que há um constante aporte de chuva (Figura 7) e, conseqüentemente, uma grande disponibilidade hídrica.

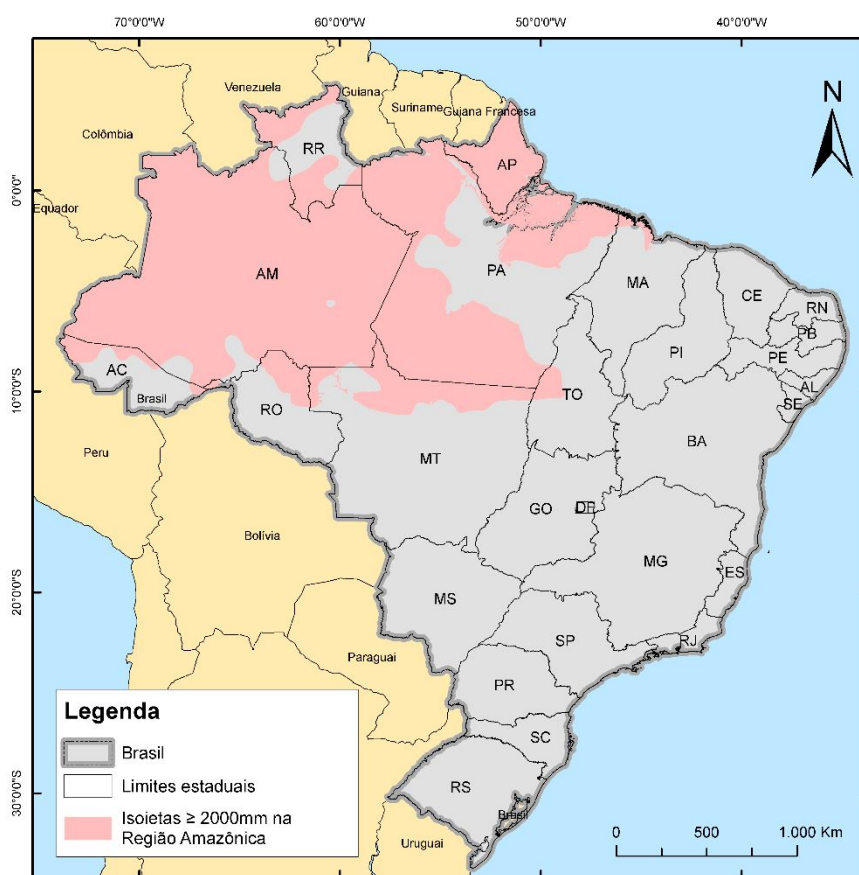


Figura 7. Regiões com precipitações anuais ≥ 2.000 mm na região Amazônica.

O mapa da Figura 8 representa uma compilação de todos os critérios de exclusão das regiões, em que as premissas de avaliação integrada rio/aquífero não se enquadram.

A área resultante, após as exclusões mencionadas, para a avaliação da relevância quanto à gestão integrada rio/aquífero, abrange cerca de 4,8 milhões km² (Tabela 1), dentro da qual serão selecionadas estações fluviométricas para dimensionar o escoamento de base (Figura 9).

Tabela 1. Estimativa da área delimitada para a avaliação integrada rio/aquífero.

LIMITE	ÁREA (KM ²)
Isoietas >2.000mm (excluída)	2.850.375,33
Zona Litorânea (excluída)	153.413,95
Fraturado Semiárido (excluída)	702.766,16
Fraturado Semiárido na Bacia Hidrográfica do rio Verde Grande (incluída)	22.432,09
Área excluída da análise	3.684.123,35
Brasil	8.482.749,49
Área de estudo	4.798.626,14

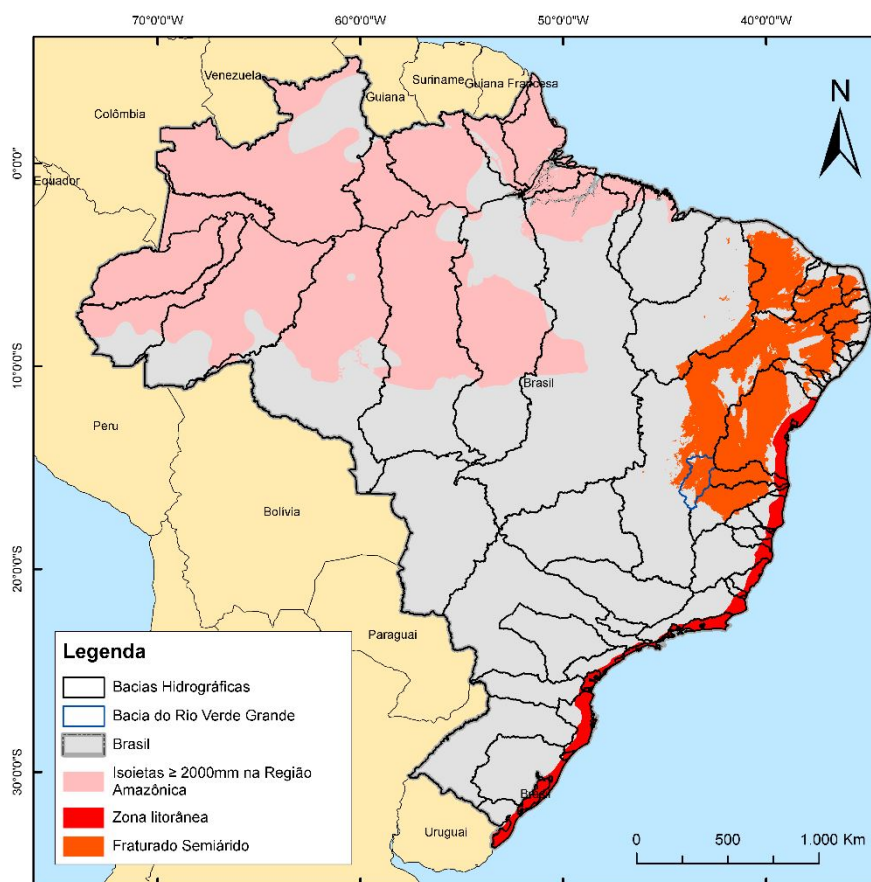


Figura 8. Compilação das regiões que não se enquadram nas premissas para a avaliação integrada rio/aquífero.



Figura 9. Região selecionada para efetuar a avaliação integrada rio/aquífero e para indicar as áreas prioritárias para a implementação da gestão integrada de recursos hídricos.

3.2. Avaliação da interação rio/aquífero: métodos adotados para estimativa do fluxo de base

A avaliação da **interação entre rios e aquíferos** normalmente se dá a partir de **dados de saída (escoamento de base) e de entrada (recarga) no sistema**, considerado aqui como os aquíferos livres e conectados com os corpos d'água superficiais. Essas duas vertentes de análise se complementam na avaliação de componentes múltiplas de interação do ciclo hidrológico, **variáveis temporalmente influenciadas pelo clima, uso do solo e da água na bacia e, vegetação**.

Para a definição das áreas relevantes para a gestão integrada rio/aquífero será adotada a estimativa do escoamento de base, a partir de dados de vazões superficiais, uma vez que a disponibilidade de dados fluviométricos é muito superior àqueles de recarga (variação de níveis de águas subterrâneas), numa abordagem em âmbito nacional.

Essa avaliação terá como condições de contorno: i) séries históricas de dados diários preferencialmente de, no mínimo, **10 anos**; ii) filtragem da influência de **reservatórios artificiais de regularização** nas vazões, sendo possível que, em algumas situações, considere-se o período de **dados anterior ao enchimento do respectivo reservatório**; iii) avaliação de **variações temporais**.

A estimativa do escoamento de base pode ser efetuada com a utilização de quatro métodos: relações entre vazões mínimas e médias (Q_7/Q_{mlt} ¹; Q_{90}/Q_{50} ; Q_b/Q_{mlt}); algoritmos de separação de fluxos (filtros digitais); análise de curvas de recessão; e curvas de permanência.

a) Relações entre vazões mínimas e médias:

➤ Relação Q_7/Q_{mlt}

A relação entre a vazão mínima (Q_7) e a vazão média de longo termo (Q_{mlt}) expressa a participação do escoamento de base, estimado por intermédio dessa vazão mínima, na composição da vazão média, de outra forma, a parcela de água entregue pelo aquífero para o rio. A vazão mínima (Q_7) representa o valor médio da série histórica das vazões mínimas das médias móveis de sete dias, ao longo do período de dados das estações fluviométricas. Em sendo a vazão mínima das médias móveis de sete dias, considerada ano a ano, representa a contribuição subterrânea, uma vez que é medida em época de baixas vazões, ou seja, durante a estiagem, quando a vazão superficial é mantida pelo fluxo de base.

➤ Relação Q_{90}/Q_{50}

A relação Q_{90}/Q_{50} é mencionada por diversos autores, entre eles Smakhtin (2001) e Welderufael & Woyessa (2010) como representativa da **proporção** do escoamento superficial originário do armazenamento subterrâneo, ou seja, indica a **participação** do escoamento de base, sem considerar os efeitos de escala. Esta metodologia, baseada em vazões características

¹ Q_{mlt} : Vazão média de longo termo

da curva de permanência, permite uma estimativa inicial razoável e expedita para a contribuição da parcela de água subterrânea ao escoamento superficial.

A ANA vem utilizando mais recentemente em diagnósticos de planos integrados de bacia a avaliação desta relação Q_{90}/Q_{50} para determinar a participação da contribuição subterrânea em estações fluviométricas pré-selecionadas, conjuntamente com a análise do comportamento dessas curvas quanto à sua inclinação e a amplitude das variações das vazões extremas, com o propósito de avaliar qualitativamente a capacidade de regularização dos reservatórios subterrâneos. Alguns valores desta relação, obtidos nestes planos para o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, são apresentados no Quadro 01 e na Figura 10.

Quadro 01. Resultados dos valores obtidos da Relação Q_{90}/Q_{50} para o Sistema Aquífero Bauru em estudos da ANA.

	Bacia do Rio Paranapanema	Bacia do Rio Grande	Bacia do Rio Paraguai
Diagnósticos Integrados dos Planos de Bacia	0,68	0,48	0,59
Estudo UFV ² (Faixa predominante)	0,62-0,73 (Figura 10)	0,48-0,51 (Figura 11)	*

*Não contemplada no estudo UFV (ANA, no prelo).

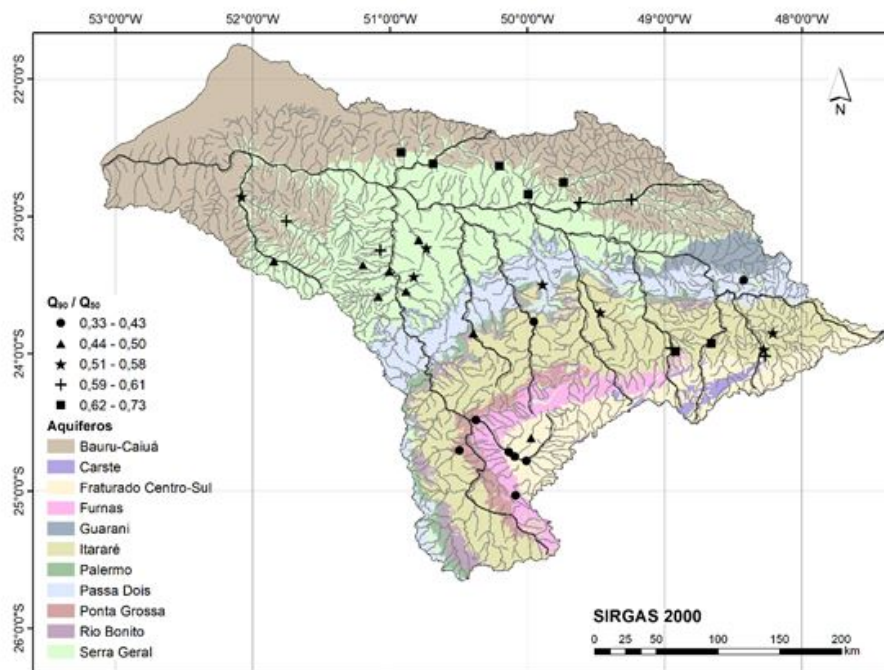


Figura 10. Valores médios da relação Q_{90}/Q_{50} nas estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Paranapanema (ANA, no prelo).

² Estimativas da contribuição do escoamento de base de aquíferos aos rios federais e aos seus principais tributários estaduais nas bacias hidrográficas dos rios Grande, Paranapanema e Paranaíba” (ANA, no prelo).



A relação Q_{90}/Q_{50} também foi utilizada na proposta apresentada pela SIP e SGH à DIREC de inclusão de pontos adicionais de monitoramento na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (Documento nº 02501.000.081717/19). Destaca-se que a partir de 2014, a ANA começou a trabalhar junto ao Serviço Geológico dos Estados Unidos e da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais do Brasil (CPRM) na proposta de uma Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência, que é parte da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), operada em nível de excelência e com tecnologia de última geração, a fim de prover dados confiáveis, representativos e tempestivos, para conhecimento e gestão de recursos hídricos, objetivando a proteção da vida e da propriedade, e o avanço da pesquisa científica no Brasil. Na proposta da RHNR, um dos objetivos (critérios) definidos para a seleção de pontos/estações é denominado “Mudanças e Tendências de Longo Prazo”, incluindo como um de seus objetivos específicos (subcritérios) “interações águas superficiais-subterrâneas” (Objetivo 4b), refletindo na participação do escoamento de base nas vazões superficiais.

No sentido de complementar este objetivo específico, em 2019, foi apresentada essa proposta de inclusão de pontos adicionais de monitoramento, que levou em conta, essencialmente, a conectividade hidráulica do sistema rio/aquífero, em que rios com maior percentual de vazão de base no escoamento superficial denotam maior dependência fluvial do aquífero. Desta forma, foram selecionadas as estações da rede que mostram maior participação do aquífero na vazão fluvial. Essa avaliação considerou duas abordagens, conforme detalhadas abaixo:

- a) estabelecimento de uma área mínima de contribuição de cada aquífero na estação, de forma a se obter um resultado que represente, especificamente, a resposta hidráulica, preponderantemente, de um único aquífero. Nessas condições, os aquíferos porosos considerados perfazem, pelo menos, 70% da área da estação, enquanto para os aquíferos fraturados a cobertura foi superior a 90%.
- b) consideração apenas do resultado da relação Q_{90}/Q_{50} , independentemente do aquífero presente na área de contribuição da estação fluviométrica.

Ademais, a fim de filtrar o número de estações, bem como melhorar a confiabilidade da seleção, adotou-se as seguintes etapas metodológicas:

- I. Análise de todas as estações da RHNR (863) sob a ótica do escoamento de base, a partir da relação Q_{90}/Q_{50} , dividindo-as em três faixas de contribuição: $Q_{90}/Q_{50} > 50\%$; $Q_{90}/Q_{50} > 60\%$ e $Q_{90}/Q_{50} > 70\%$.
- II. Análise quanto à presença de empreendimentos hidrelétricos, principalmente UHE e CGH, as quais podem alterar de maneira relevante as vazões regularizadas, elevando-as artificialmente. Diversas estações pré-selecionadas foram excluídas, segundo esse critério.
- III. Análise da extensão das séries de dados: as séries de curta duração, abaixo de 05 anos, foram desconsideradas.

- IV. Análise das áreas de contribuição das estações: áreas muito extensas (superiores a 70.000 km²) também foram desconsideradas, uma vez que há o efeito de escala.
 - V. Sobreposição de áreas de contribuição de estações: um pequeno aumento incremental de uma área para outra também foi critério para descarte de estações.
- Neste caso, em geral, foram preteridas as estações com maior área de contribuição.

Após comparação do número de estações selecionadas para cada faixa de contribuição foi indicada a inclusão, na RHNR, de 28 estações fluviométricas, sob a ótica da gestão integrada rio/aquífero, em que a participação do escoamento de base atinge os maiores valores, indicados pela relação Q_{90}/Q_{50} superior a 70%, mostradas na Figura 11, sobrepostas aos aquíferos selecionados, as quais são aderentes à RHNR segundo o objetivo 4b.



Figura 11. Mapa de áreas de afloramento de aquíferos com as áreas das estações fluviométricas com relação Q_{90}/Q_{50} superior a 70%.

b) Algoritmos para separação do Escoamento de Base:

No Projeto “*Estimativas da contribuição do escoamento de base de aquíferos aos rios federais e aos seus principais tributários estaduais nas bacias hidrográficas dos rios Grande, Paranapanema e Paranaíba*”, foram desenvolvidas duas rotinas de processamento baseadas em filtros digitais recursivos para a separação do escoamento de base, conforme os modelos de Lyne & Hollick (1979), modificado por Nathan & McMahon, 1990 e Arnold *et al.*, 1995 e

Eckhardt (2005), denominados de Filtro Simples (FS) e Filtro Duplo (FD), por contar com um e dois parâmetros de entrada para a sua aplicação, respectivamente.

Essas rotinas são aplicadas na mesma interface denominada FBBrazil³ que permite a aplicação dos dois filtros, ou um deles separado, e a comparação dos resultados numéricos e dos gráficos (Figura 12). O princípio básico dos filtros digitais consiste em considerar os sinais de alta frequência dos picos dos hidrogramas como sendo indicativos do escoamento superficial direto, enquanto os sinais de baixa frequência são associados com o fluxo de base (Eckhardt, 2005).

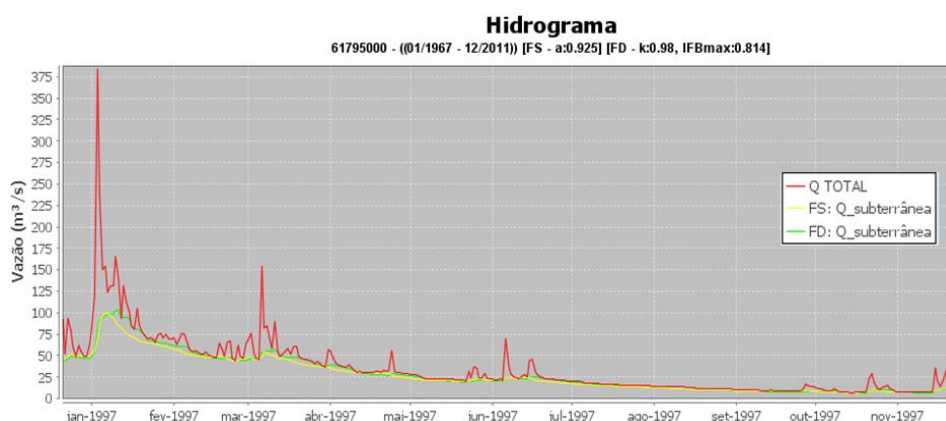


Figura 12. Resultados da separação aplicando-se os filtros FS (linha amarela) e FD (linha verde) para a estação 61795000 na bacia do rio Grande no ano de 1997 (ANA, no prelo).

Conceitualmente o Filtro Simples (FS) é dado pela **Equação 1**:

Equação 1:

$$Q_{fi(i)} = a Q_{fi(i-1)} + (Q_{(i)} - Q_{(i-1)}) \frac{1+a}{2} \rightarrow \begin{cases} Q_{fi(i)} \geq 0 \\ Q_{fi(i)} \leq Q_{(i)} \\ Q_{b(i)} = Q_{(i)} - Q_{fi(i)} \end{cases}$$

em que:

- $Q_{b(i)}$ = escoamento de base no instante i, $m^3 s^{-1}$;
- $Q_{fi(i)}$ = escoamento filtrado no instante i passo j, $m^3 s^{-1}$;
- a = parâmetro de filtragem.

O algoritmo do FS é dependente apenas do parâmetro de filtragem “a”, para o qual Nathan & McMahon (1990) e Arnold *et al.* (1995) determinaram o valor de 0,925 para obtenção de resultados coerentes com métodos manuais de separação, resultado reafirmado ao aplicar

³.FBBrazil - Consiste em duas rotinas computacionais aplicadas extensivamente aos dados de vazão, originando curvas de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo por meio da aplicação de filtros digitais recursivos (FS e FD) utilizando equações com até três variáveis, as quais são ajustadas de forma a estimar o escoamento de base



este filtro em três passos na série de dados, sendo que a segunda filtragem é reversa, para remover qualquer **distorção** de fase dos dados filtrados para a próxima filtragem (Lyne & Hollick, 1979; Nathan & McMahon, 1990; Arnold & Allen, 1999). Portanto, na primeira filtragem, os valores de **vazão** $Q_{(i)}$ e $Q_{(i-1)}$ são considerados para o cálculo de $Q_{f1(i)}$. A segunda filtragem, em modo reverso, **também** utiliza as **vazões** $Q_{(i)}$ e $Q_{(i-1)}$, mas iniciando a filtragem a partir do fim da série para o cálculo de $Q_{f2(i)}$. Após, são selecionados os menores valores de $Q_{f1(i)}$ e $Q_{f2(i)}$, para a remoção da **distorção** de fase, constituindo a terceira filtragem sobre estes valores selecionados, e resultando em $Q_{f3(i)}$. Por fim, calcula-se a **vazão de base** como $Q_{b(i)} = Q_{(i)} - Q_{f3(i)}$.

A **Equação 2** representa o algoritmo do Filtro Duplo, considerado como um modelo geral utilizado na formulação da maioria dos filtros.

Equação 2:

$$Q_{b(i)} = \frac{(1 - IFB_{max}) k Q_{b(i-1)} + (1 - k) IFB_{max} Q_{(i)}}{(1 - k IFB_{max})}$$

em que:

- $Q_{b(i)}$ = escoamento subterrâneo no instante i , m^3/s
- IFB_{max} = máximo valor do índice de fluxo de base;
- k = constante do período de recessão;
- $Q_{b(i-1)}$ = escoamento subterrâneo no instante anterior a i , m^3/s
- $Q_{(i)}$ = vazão correspondente ao instante i , m^3/s .

Gonzales *et al.* (2009) concluíram que o FD permitiu a obtenção de resultados mais próximos aos obtidos com o método da análise de traçadores. No entanto, salientam que este resultado era o mais **provável** de acontecer, já que o **parâmetro** de entrada no filtro recursivo, o IFB_{max} , foi previamente calibrado com o resultado da separação feita com o método da análise de traçadores.

Portanto, fica claro que para a aplicação desse filtro é necessário o **parâmetro** IFB_{max} ao mesmo tempo em que para a estimativa deste **parâmetro** é necessário se promover a **separação** por algum **método**. Assim, caso não se tenha conhecimento **prévio** deste **parâmetro**, a estimativa inicial do IFB_{max} pode ser feita considerando a **relação** Q_{90}/Q_{50} , ou a partir da aplicação de uma filtragem anterior (Stewart, 2015), como por exemplo pelo Filtro Simples (FS), o qual depende apenas do **parâmetro** de filtragem “a”. Desta forma, apesar de serem duas rotinas distintas, elas poderão ser aplicadas de forma auxiliar e integrada para a bacia estudada.

De acordo com Eckhardt (2005), que desenvolveu o filtro FD, podem ser assumidos valores de IFB_{max} de 0,8 para bacias **permeáveis** com rios perenes; 0,5 para bacias pouco permeáveis com rios intermitentes; e 0,25 para bacias rochosas com **predominância** de rios efêmeros. Neste contexto, Duki *et al.* (2017) **propõem** que o IFB_{max} pode ser estimado pela **Equação 3**:



Equação 3:
$$IFB_{max} = \sum_{i=1}^n A_{(i)} C_{(i)}$$

Entretanto, os valores de EB_{max} sugeridos por Eckhardt (2005) refletem condições específicas para as áreas testadas pelo autor, que não podem ser generalizadas, sendo necessárias estimativas para cada aquífero/bacia.

O FD também depende da constante de recessão k . Assim, a rotina desenvolvida dependerá da inserção deste parâmetro. O valor de k pode ser obtido por meio do ajuste da curva de recessão mestra (*Master Recession Curve* - MRC), sendo k dado por $e^{-\alpha}$ (Chapman, 1999; Brodie & Hostetler, 2005; Duki *et al.*, 2017). Destaca-se que o coeficiente de recessão α varia entre 10^{-4} e 10^{-1} (Feitosa *et al.*, 2008), então o valor de k varia entre 0,90 e 0,99. No entanto, Bosch *et al.* (2017) obtiveram um valor de k aproximadamente igual a 0,98, e adotaram este valor. Outros autores obtiveram resultados satisfatórios utilizando este mesmo valor para k (Lim *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013; Zomlot *et al.*, 2015).

A estimativa da constante de recessão k pode ser feita, ainda, pelo método de Meyboom, que consiste na plotagem da série de vazões em escala semilogarítmica e na verificação da declividade de uma linha reta traçada acompanhando a tendência de variação da vazão durante a recessão do escoamento. Isso significa que a equação de Maillet, representa um ajuste de decaimento exponencial. Assim, para a estimativa de seus parâmetros, primeiramente é necessária sua linearização pela equação abaixo.

$$\ln Q(t) = \ln Q_0 - \alpha t$$

Após esse procedimento, pode-se estimar o valor de α pelo Método dos Mínimos Quadrados.

$$\alpha = - \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} \rightarrow \begin{cases} y_i = Y_i - E(Y) \rightarrow Y_i = \ln Q(t_i) \\ x_i = X_i - E(X) \rightarrow X_i = t_i \end{cases}$$

em que:

$E(Y)$ e $E(X)$ correspondem às esperanças matemáticas (médias) das variáveis Y e X no intervalo considerado para a curva de recessão.

Assim, obtém-se o valor de k , representado pelo valor de $e^{-\alpha}$.

Obtidos os valores de IFB_{max} e de k , o algoritmo do Filtro Duplo (FD), dado pela Equação 2, é aplicado em um passo a toda série de dados de vazão para a obtenção dos valores da contribuição pelo escoamento de base, sendo calculados os valores de $Q_{b(i)}$.



Após a aplicação do Filtro Duplo é possível visualizar os resultados da aplicação de ambos os filtros e verificar os valores das contribuições em cada um deles, conforme a Figura 10.

Na Figura 13 é apresentada a comparação entre os valores médios anuais da relação Q_{90}/Q_{50} e os índices de fluxo de base médios obtidos por meio da aplicação dos filtros simples e duplo para a bacia do rio Paranapanema. A fim de melhor visualizar as diferenças entre essas variáveis, apresentam-se, na mesma figura, a Relação Q_{9050_IFB} para as estações consideradas no estudo (Equação 4).

Equação 4:

$$\text{Relação } Q_{9050_IFB} = \frac{Q_{90}/Q_{50}}{IFB} \times 100$$

Observa-se que são razoáveis as diferenças entre as estimativas de fluxo de base obtidas pela relação Q_{90}/Q_{50} e através da aplicação do FS ou FD. Com base nos resultados apresentados é possível concluir que a relação Q_{90}/Q_{50} é conservadora em relação aos filtros digitais utilizados, refletindo essencialmente a calibração dos parâmetros dos filtros. Talvez esse seja o ponto mais relevante nos cálculos por filtros digitais recursivos.

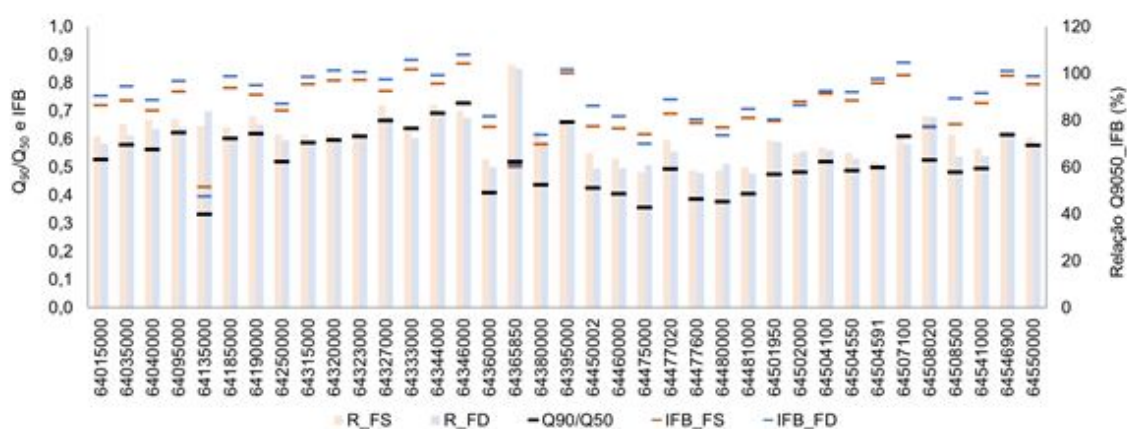


Figura 13. Valores de IFB, Q_{90}/Q_{50} e Relação Q_{9050_IFB} entre essas variáveis nas estações fluviométricas localizadas na bacia hidrográfica do rio Paranapanema (ANA, no prelo).

Ainda em relação aos valores de IFB calculados na bacia do rio Paranapanema para o SABC destaca-se que ficaram, majoritariamente, nas faixas de valores de 0,81 a 0,87, utilizando o Filtro Simples, e de 0,84 a 0,90, utilizando o Duplo. Na bacia do rio Grande, para este aquífero, ficaram entre 0,59 e 0,72 (FS) e 0,56 e 0,76 (FD), conforme pode ser visto nas Figuras 14a e 14b.

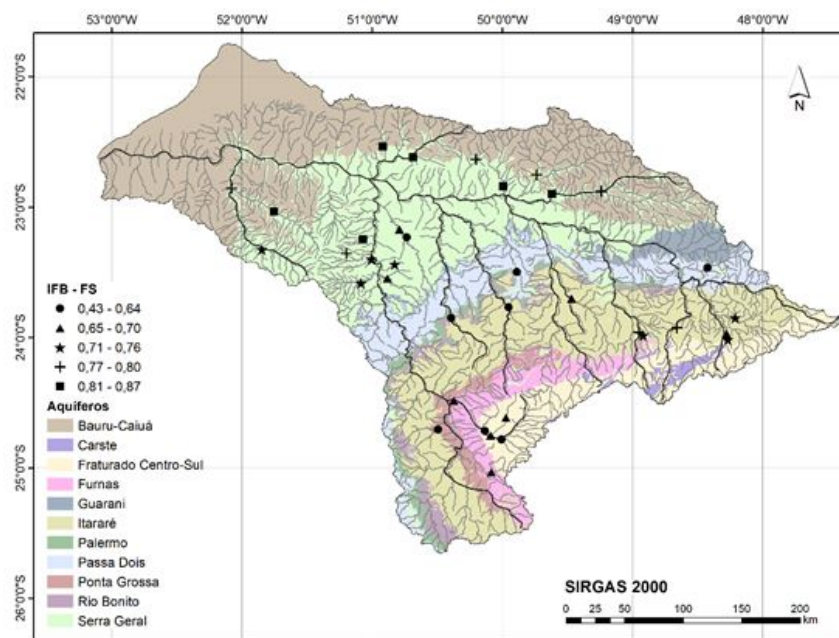
Foi desenvolvida, ainda, uma Macro no Microsoft Excel denominada AquiPRO que tem o objetivo de individualizar a participação de cada aquífero na vazão de escoamento de uma dada estação fluviométrica. Desta forma, a partir dos valores totais de escoamento de base, calculados pelo FBBrazil, para uma dada estação é possível quantificar a participação de cada aquífero nesta contribuição. A metodologia utilizada foi desenvolvida com base nos conceitos

físicos, estatísticos e algébricos da replicabilidade e da facilidade de aplicação nas condições diversas existentes no campo.

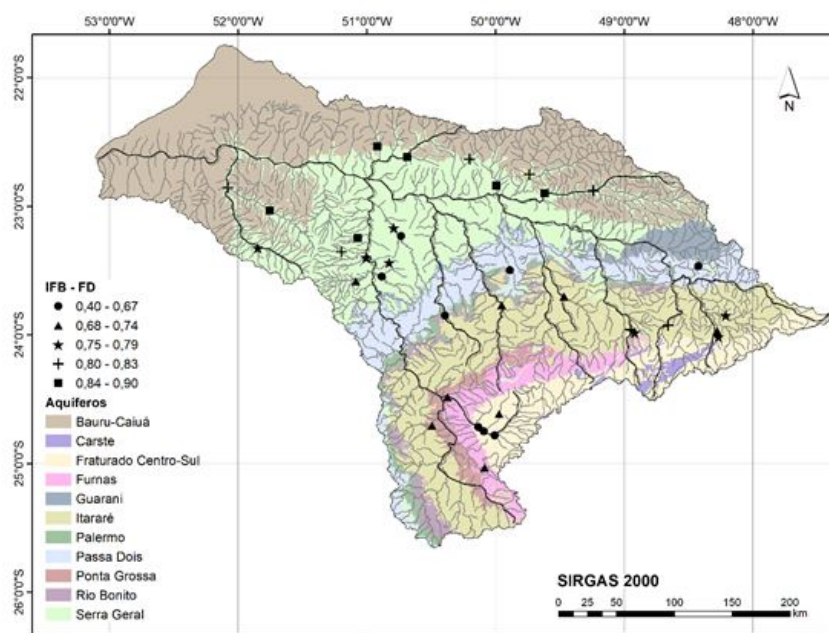
A metodologia foi desenvolvida com base em três premissas:

- I. Durante um período de análises, considera-se que a vazão de escoamento se encontra em regime estacionário;
- II. As características da área de drenagem (tipo de solo, cobertura e manejo) são mantidas constantes durante o período de análise;
- III. Para pequenas variações de vazão de escoamento, assume-se que o sistema é Linear, Invariante no Tempo (LIT) a parâmetros concentrados.

Nas avaliações integradas realizadas nos diagnósticos dos planos de bacias, em que é comum a escassez de dados hidrogeológicos, utilizou-se a ponderação em relação à área da estação. Na macro AquiPRO, essa proporcionalidade de contribuição subterrânea passa a ser feita de forma automática considerando não somente a área do aquífero, mas também parâmetros hidrogeológicos como a condutividade hidráulica do aquífero e o gradiente hidráulico (este último passível de substituição por outro parâmetro hidrodinâmico). Maiores detalhes serão dados no item 4.



(a)



(b)

Figura 14. Valores médios do Índice de Fluxo de Base obtido a partir da aplicação do FS (a) e FD (b), para as estações fluviométricas localizadas na bacia hidrográfica do rio Paranapanema (ANA, no prelo).

c) Análises de curvas de recessão:

As análises das curvas de recessão são utilizadas de forma a conferir a capacidade reguladora dos aquíferos representados nas áreas de contribuição das estações fluviométricas. Elas auxiliam na comparação com os resultados apresentados nas demais metodologias de

avaliação integrada utilizadas no escopo deste estudo. Contudo, essa análise será feita apenas onde a contribuição do escoamento de base é proveniente, majoritariamente, de um único aquífero livre.

Esse método consiste na análise de uma curva de declínio da vazão natural de um rio considerando a ausência de precipitação na bacia, sendo condicionada por leis de decaimento exponencial, dada pela **Equação 5**, conforme Domenico & Schwartz (1990). O volume subterrâneo restituído na recessão, anualmente, é estimado pela **Equação 6** e essa restituição em milímetros é obtida a partir da **Equação 7**, pela relação do volume contribuinte anual e área de contribuição da estação.

Equação 5: $Q = Q_0 \cdot e^{-kt}$, em que:

Q = representa a vazão do rio em m^3/s após um período de t (dias);

Q_0 = é a vazão do rio no início da recessão em m^3/s ;

K = é a constante de recessão.

Equação 6: $V = Q_0 \cdot 86.400/K$

Equação 7: $H = V/A$, em que:

V = volume subterrâneo contribuinte para o ano selecionado em m^3/ano ;

H = restituição em mm;

A = área de contribuição da estação fluviométrica.

O procedimento principal de análise consiste em: plotar as vazões diárias de uma determinada estação fluviométrica em um gráfico monolog (Figura 15); identificar a vazão no início do período de recessão (Q_0) e a vazão no final da recessão; e, em consequência, identificar o tempo de recessão. Com esses valores utiliza-se a Equação 5 para obtenção da constante de recessão (k) e com as Equações 6 e 7 obtém-se o volume subterrâneo restituído em m^3/ano e a restituição em mm, tomando em consideração a área de contribuição da estação fluviométrica.

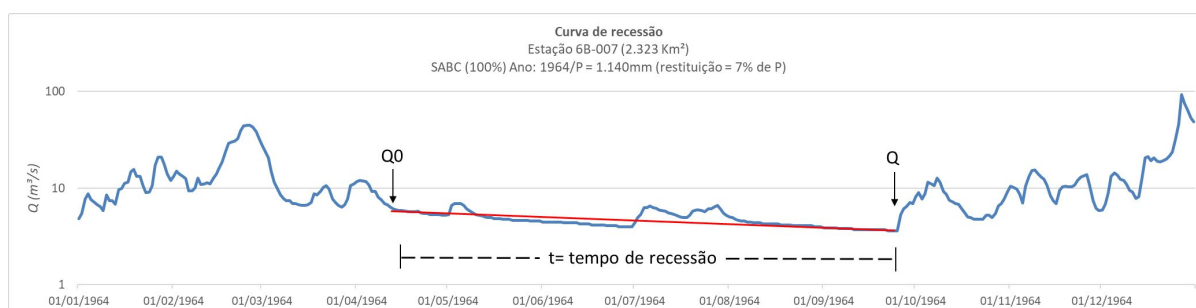


Figura 15. Exemplo de curva de recessão referente ao ano de 1964, com contribuição do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, na estação 6B-007, na Bacia do Rio Grande.

Essa análise é feita para diversos anos hidrológicos do período histórico de dados, selecionando aqueles em que a **recessão é bem definida**, ou seja, **sem importantes eventos de**

precipitação que interfira no decaimento natural da curva de recessão (Figura 16). A restituição (mm) final obtida é comparada com o volume de chuva do ano analisado de uma estação pluviométrica mais próxima, ou na falta do dado pluviométrico do mesmo ano, utiliza-se um valor médio de precipitação. Deste modo, tem-se o percentual que a restituição representa em relação ao volume de chuva na bacia.



Figura 16. Exemplo de curva de recessão não utilizada na análise de contribuição subterrânea por interferência de chuvas, devido ao período de estiagem não definido.

Aquíferos com maior potencial hidrogeológico costumam apresentar uma restituição entre 15 e 20% da precipitação (Figura 17 e 18), no entanto, esse valor pode variar em função da exploração das águas subterrâneas na bacia e do uso e ocupação do solo, uma vez que o escoamento de base representa o valor “líquido” da contribuição dos aquíferos para os corpos de água superficiais. Também é comum ter altos valores de restituição em anos mais secos, quando a restituição subterrânea se torna dominante. Rochas menos promissoras (argilosas, fraturadas sem cobertura de solo ou solo pouco espesso) apresentam curva de recessão mais inclinada e demonstram um controle mais deficitário/deficiente na regularização das vazões superficiais (Figura 19).

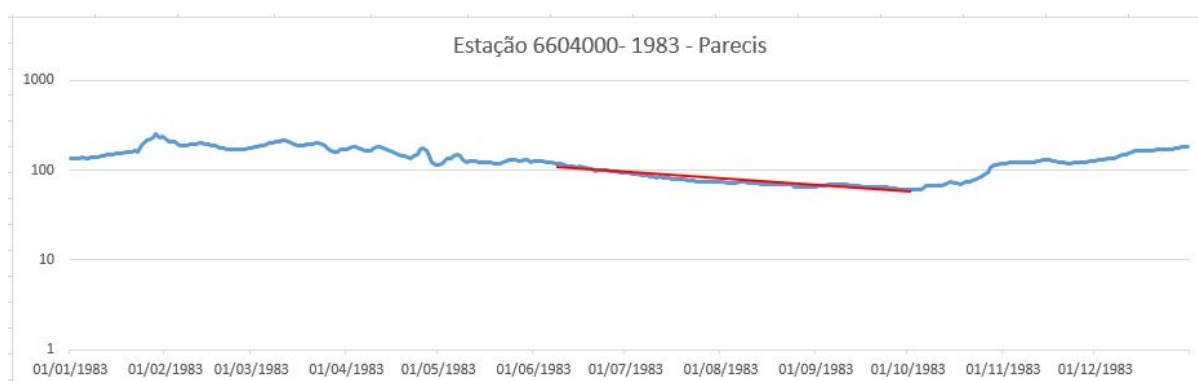


Figura 17. Exemplo de curva de recessão de contribuição do Sistema Aquífero Parecis na bacia do rio Paraguai (restituição de 27% da precipitação).

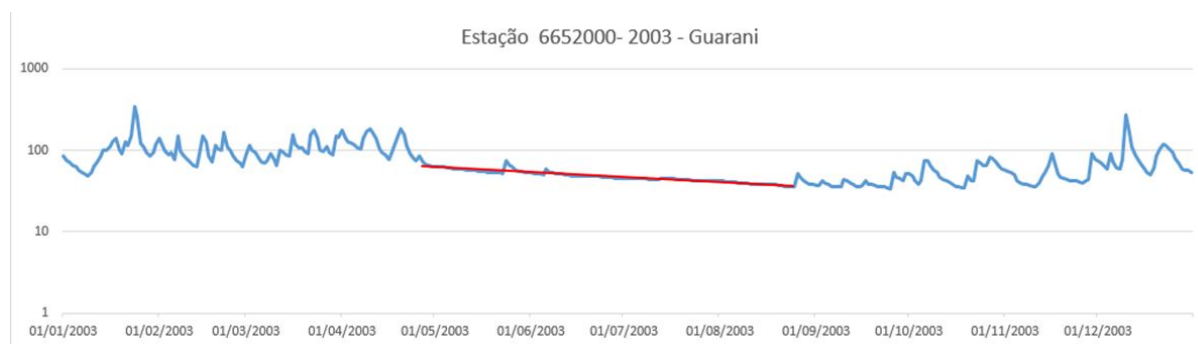


Figura 18. Exemplo de curva de recessão de contribuição do Sistema Aquífero Guarani na bacia do rio Paraguai (restituição de 19% da precipitação).

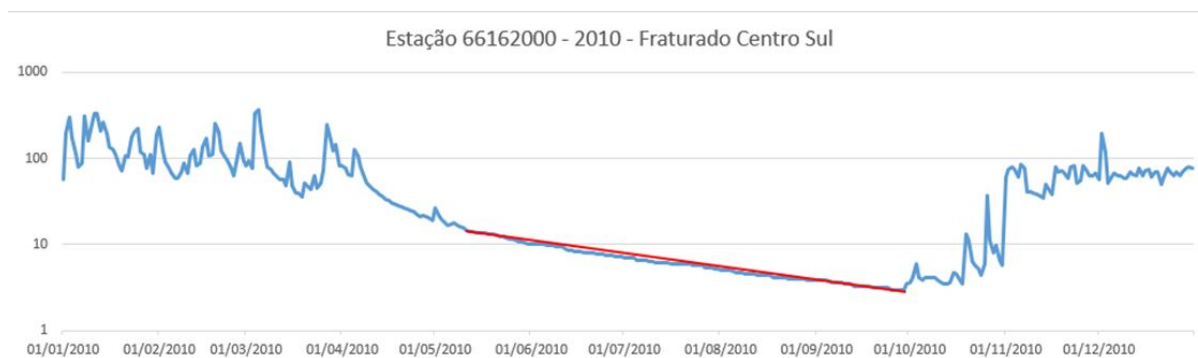


Figura 19. Exemplo de curva de recessão com contribuição do Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul na bacia do rio Paraguai (restituição de apenas 2,9%).

A recessão, em outras palavras, corresponde à contribuição subterrânea ao fluxo superficial, originária dos volumes armazenados nos aquíferos. Vale ressaltar, entretanto, que essa contribuição, em muitos casos é maior do que aquela calculada no período de recessão, haja vista que muitos aquíferos contribuem para a vazão dos rios mesmo nos períodos chuvosos, a depender, especialmente das condições de carga hidráulica na bacia, a qual é fortemente influenciada pelo relevo.

d) Curvas de permanência:

A curva de permanência ou de duração de vazões relaciona a vazão e a porcentagem do tempo em que ela é superada ou igualada sobre todo o período histórico utilizado para sua construção. A curva de permanência sintetiza a variabilidade das vazões, caracterizando a base de comportamento para a sustentabilidade de sistemas aquáticos (Cruz & Tucci, 2008). Embora seja utilizada em aplicações diversas, os autores definiram a curva de permanência como “resposta hidrológica nos rios oriundos de diferenças regionais em geologia”, em que se entende como a resposta dos mananciais subterrâneos.

A construção das **curvas de permanência auxilia de forma complementar e visual na avaliação de regularização das águas subterrâneas**. É uma ferramenta expedita de avaliação das magnitudes das vazões máximas, médias e mínimas, de forma que se pode utilizá-la para comparar relações entre vazões mínimas e médias, como a Q_{90}/Q_{50} utilizada para estimativas da contribuição subterrânea para os rios, bem como comparar as vazões de referência utilizadas como disponibilidade hídrica nos pleitos de outorga de recursos hídricos superficiais (Figura 20).

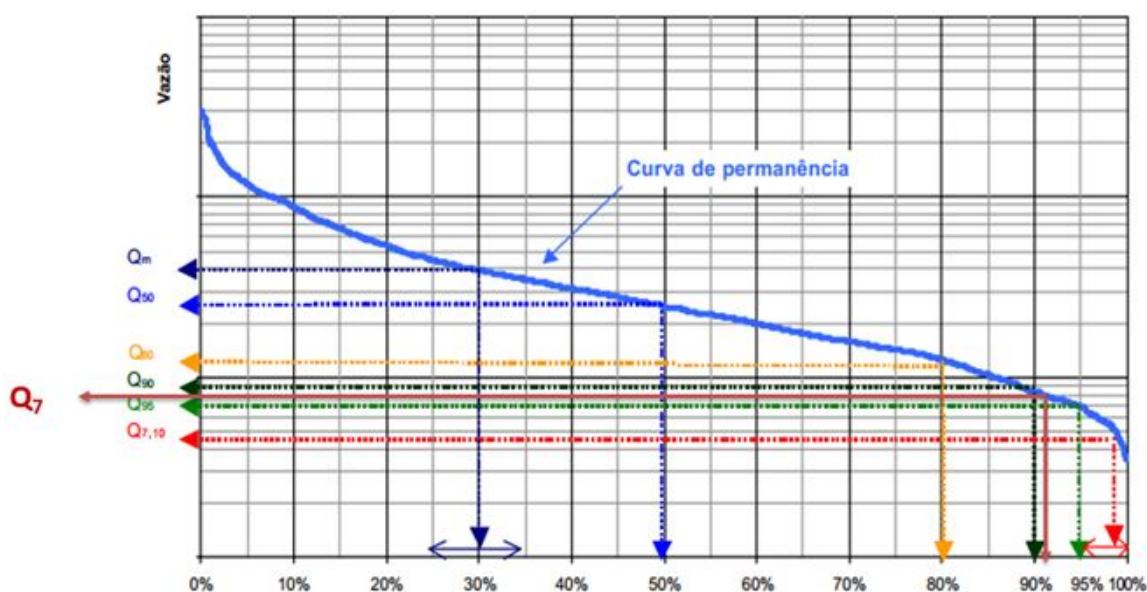


Figura 20. Exemplo de curva de permanência genérica e o posicionamento relativos das vazões de referência e das vazões mínimas $Q_{7,10}$ e Q_7 .

A **avaliação visual das curvas de permanência** é utilizada para observar as vazões extremas, bem como para analisar o formato das curvas construídas, a partir de dados de estações que dispõem predominantemente de uma unidade hidrogeológica em sua área de drenagem, de forma que seja possível considerá-la como representativa daquele manancial. Bons aquíferos costumam apresentar curvas de permanências mais achatadas, enquanto os aquíferos menos promissores exibem curvas mais inclinadas. A Figura 21 mostra curvas de permanência adimensionalizadas pela Q_{mlt} em estações fluviométricas da bacia do rio Paranapanema, representativas do Sistema Aquíferos Bauru-Caiuá (SABC), mais achatadas, e do Aquífero Passa Dois (APD), mais inclinada. O Sistema Aquífero Serra Geral exibe uma curva intermediária no seu formato. Essa análise visual das curvas corrobora a eficiência de regularização das vazões superficiais dessas unidades hidrogeológicas.

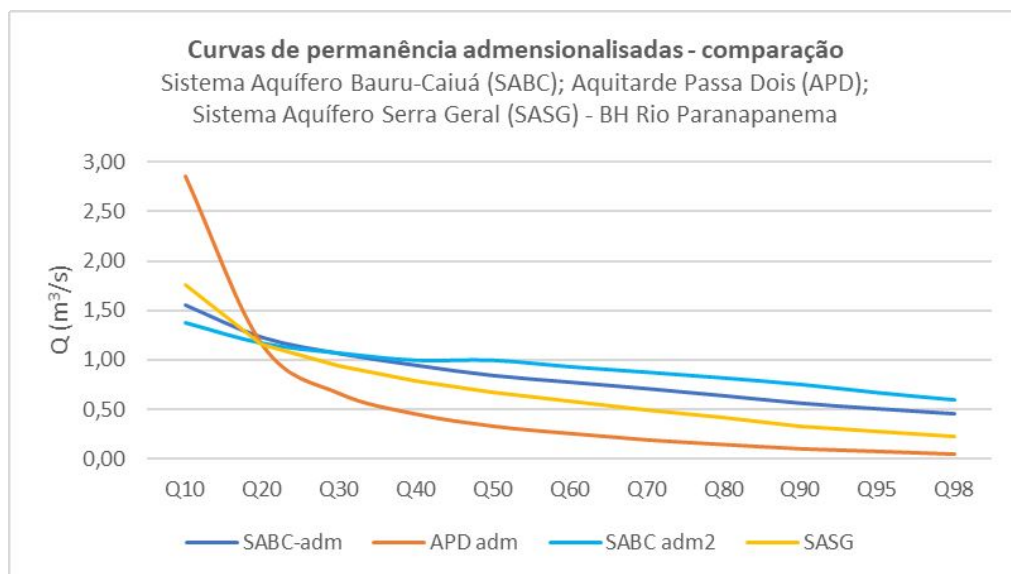


Figura 21. Comparação entre curvas de permanência adimensionalizadas dos Sistemas Aquíferos Bauru-Caiuá (SABC), Serra Geral (SASG) e do Aquitarde Passa Dois (APD) na bacia do rio Paranapanema.

4. Área de análise (área drenagem da estação, bacia ou sub-bacias hidrográfica, aquífero, trecho drenagem)

Conforme apresentado no item 3, o cálculo da contribuição do fluxo de base para os rios é feito para a área total da estação fluviométrica, e, posteriormente, estimado de forma individualizada para cada aquífero, sendo que esta estimativa tem sido feita de duas formas.

Destaca-se que o fluxo de base é um volume “integrador” entre águas subterrâneas e superficiais, e a sua determinação deve ser realizada, preferencialmente, por aquífero de forma a relacionar os volumes alocáveis em cada um deles. Entretanto, não há em nível nacional, muitas estações fluviométricas que tenham em sua área de contribuição somente um aquífero livre, de maneira que o fluxo de base calculado reflita as condições de armazenamento desse aquífero.

Esta realidade implica em duas questões. A primeira é a necessidade de definir as áreas mínimas de cobertura do aquífero estudado naquela estação. A segunda é a forma de fazer o cálculo na presença de mais de um aquífero na área de contribuição.

Nos diagnósticos dos Planos de Bacias, os valores utilizados de áreas mínimas dos aquíferos dentro da estação (representação areal do aquífero na estação) variaram de 60% (Paraguai) a 88% (Doce), ficando o Paranapanema e Grande na faixa de 82-83% de área mínima do aquífero na estação (no Grande foi utilizado 65,4% para o SASG) para que a **estação fluviométrica fosse considerada como “representativa” de determinado aquífero** (Figura 22). Assim, somente foi possível estimar a contribuição do aquífero para o rio para aqueles aquíferos que tinham áreas representativas nas estações selecionadas naquelas bacias.

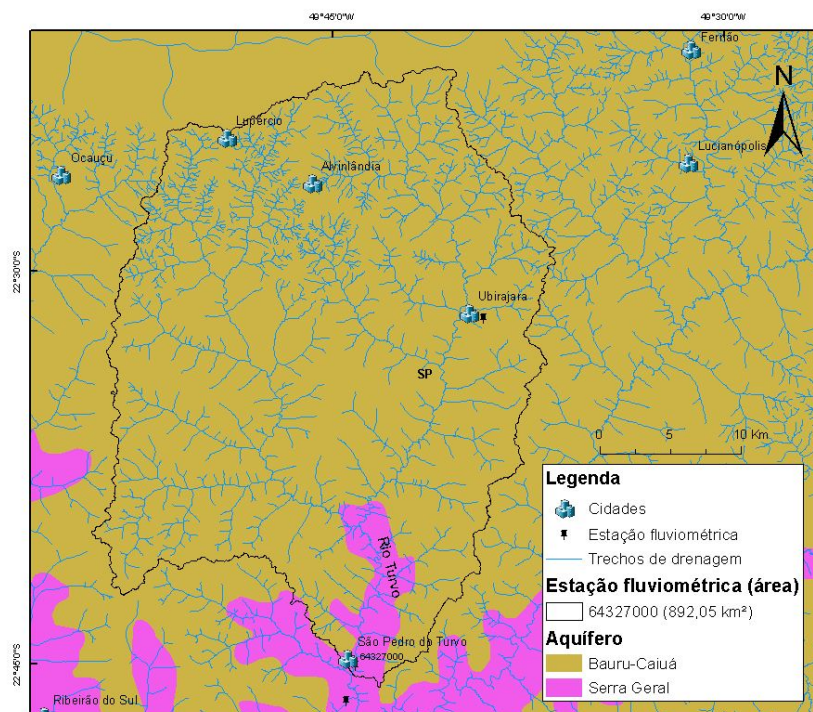


Figura 22. Exemplo da distribuição areal dos aquíferos numa estação fluviométrica. Estação representativa do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá (95%) de sua área na estação 64327000 (sub-bacia do Rio Turvo), bacia do rio Paranapanema.

No caso da ocorrência de mais de um aquífero numa dada estação fluviométrica, cujas áreas abranjam percentuais menores do que a faixa mínima estabelecida, uma das formas de fazer o cálculo da contribuição subterrânea dos respectivos aquíferos é por meio da ponderação utilizando parâmetros físicos tais como porosidade eficaz, condutividade hidráulica, declividade, entre outros, aplicados sobre o percentual da área de cada aquífero, conforme ilustrado na Figura 23.

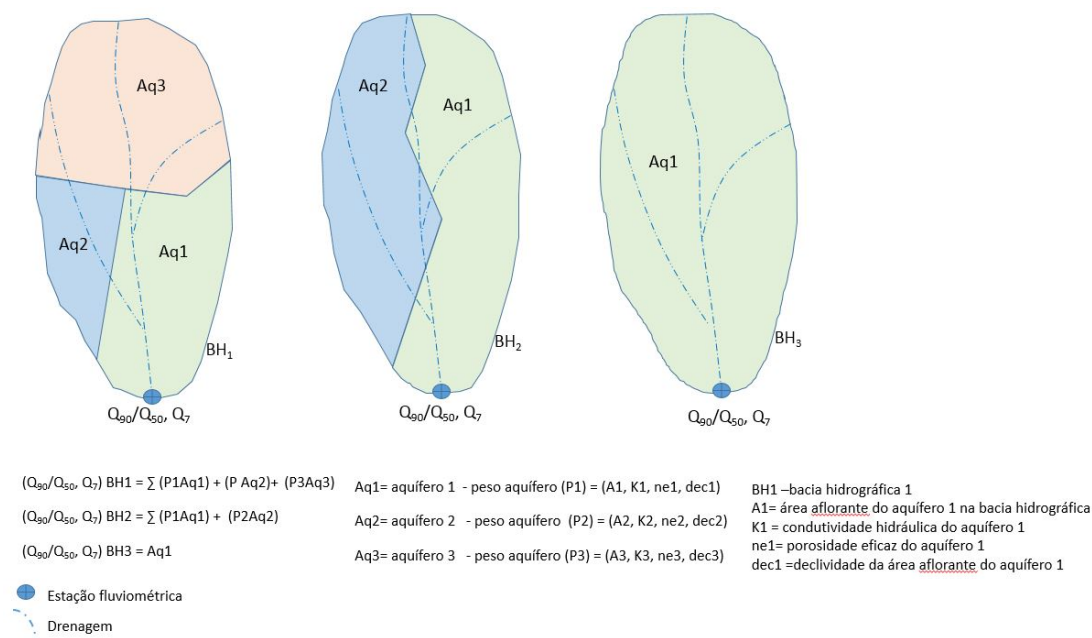


Figura 23. Estimativa do fluxo de base pela vazão mínima Q_7 e pela razão Q_{90}/Q_{50} em bacias com presença de diversos aquíferos contribuintes na formação do escoamento de base.

Nas avaliações integradas realizadas nos diagnósticos dos planos de bacias, em que é comum a escassez de dados hidrogeológicos, esta ponderação foi feita utilizando a área de cada aquífero em relação à área da estação. Na macro Aquipro, essa proporcionalidade de contribuição subterrânea é feita considerando a área do aquífero, a condutividade hidráulica do aquífero e o gradiente hidráulico (este último passível de substituição por outro parâmetro hidrodinâmico), agrupados em um peso para cada aquífero, multiplicado pela vazão específica da estação (**Equação 8** e Figura 24).

Equação 8: $Q_{Aqx} = \theta_{Aqx} \cdot Q_{EF}$, em que:

Q_{Aqx} = é a vazão específica fornecida pelo aquífero em m^3/s ;

θ_{Aqx} = é o peso (ponderador) de cada aquífero em relação ao observado na vazão específica da estação;

Q_{EF} = é a vazão específica obtida na estação fluviométrica em estudo.





Figura 24. Tela da Macro Aquipro mostrando os resultados na forma de gráficos e tabela para cada sistema aquífero (ANA, no prelo).

Importante salientar que além de não haver, em nível nacional, muitas estações fluviométricas que tenham em sua área de contribuição somente um aquífero livre, a distribuição das estações fluviométricas no território nacional também não é homogênea, podendo haver diferenças significativas nas densidades de estações.

Outro critério que deve ser levado em consideração é o efeito da sobreposição de áreas de contribuição de estações fluviométricas (Figura 25), característica que aliada à grande variação no tamanho dos aquíferos porosos livres no território brasileiro, pode trazer um grande nível de complexidade ao estudo e a necessidade de se trabalhar em múltiplas escalas.



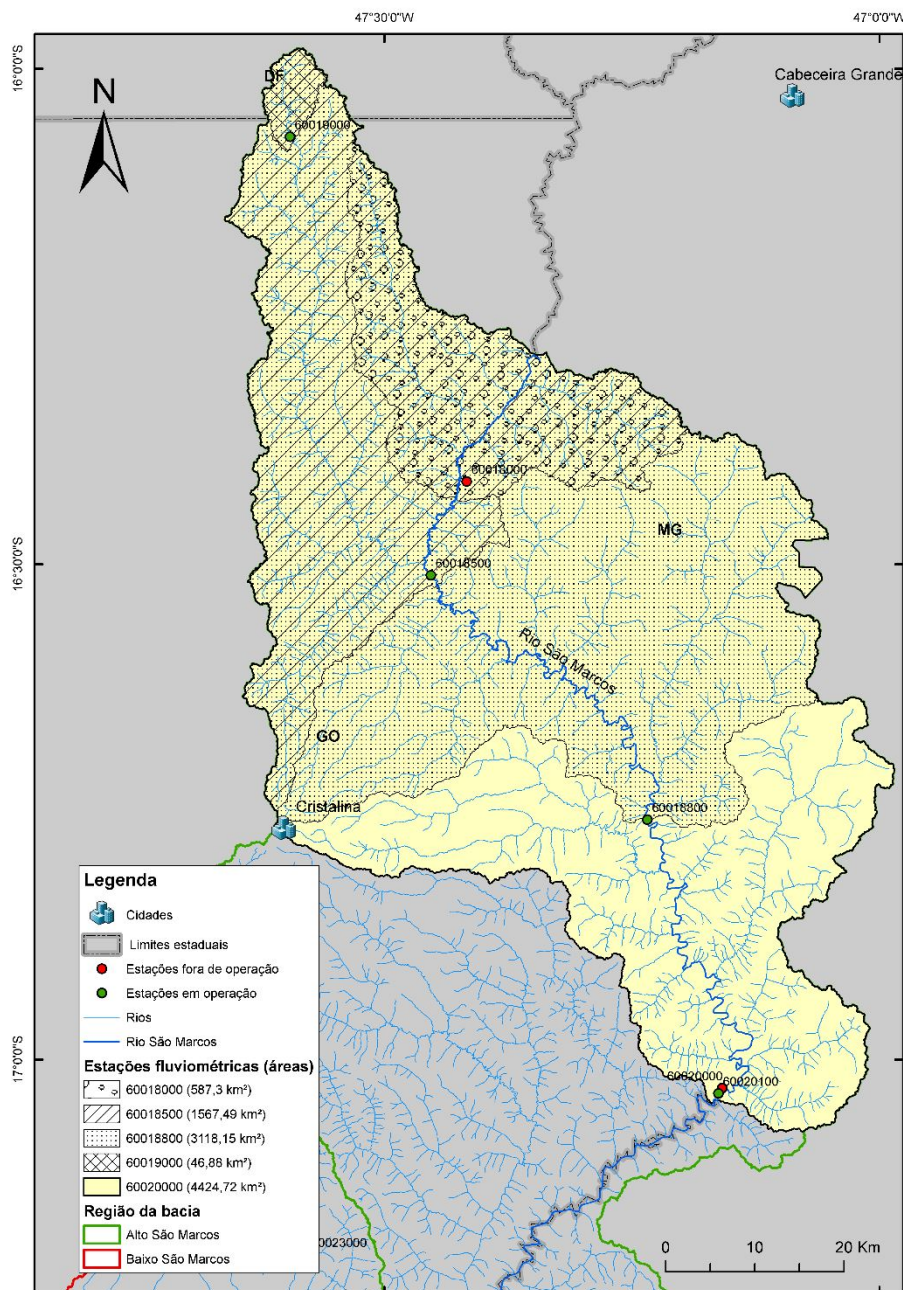


Figura 25. Exemplo de sobreposição no posicionamento das estações fluviométricas na bacia do rio São Marcos.

Interessante destacar que, nos diagnósticos dos planos das bacias dos rios Paranapanema, Grande e Paraguai, os resultados foram apresentados por estação e por aquífero, a partir dos quais se obtiveram os valores de escoamento de base para aquíferos específicos. Contudo, no diagnóstico da bacia do Rio Doce, houve um avanço na delimitação de algumas áreas de interesse com o uso das Ottobacias (Figura 26), o que poderá ser uma melhoria a ser avaliada nas próximas etapas deste estudo. Nesse tipo de recorte mais detalhado, deve-se avaliar, entretanto, as escalas dos demais níveis de informação como as

áreas de afloramento dos aquíferos, por exemplo, com vistas a compatibilizar as mesmas escalas e evitar respostas incongruentes nos cruzamentos das informações.

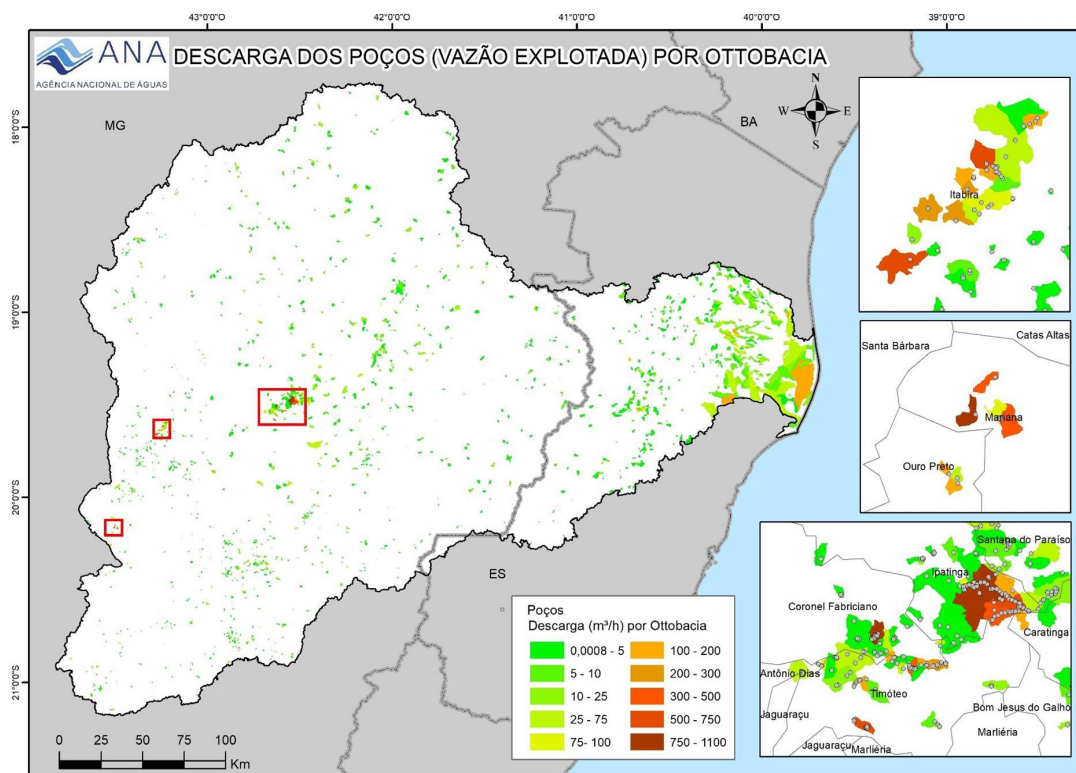


Figura 26. Recorte por Ottobacia utilizado na análise integrada do diagnóstico do plano de bacia do rio Doce (2019).

A aplicação dos métodos apresentados na presente Nota visa identificar as áreas relevantes para a **gestão integrada rio/aquífero**, destacando não somente os aquíferos com contribuição relevante para o fluxo de base dos rios, mas também as UGRHs, sub-bacias, e os rios de domínio da União e dos Estados que recebem uma contribuição significativa destes aquíferos. Ademais, visa indicar os trechos destes rios em que esta contribuição é mais relevante, o que poderá depender da escala da análise e da qualidade e quantidade de informações disponíveis.

5. Exemplos de aplicação de diferentes métodos para a avaliação integrada rio/aquífero

A avaliação integrada rio/aquífero tem sido aplicada em diversos estudos hidrogeológicos importantes desenvolvidos no país, em regiões onde a água subterrânea exerce papel importante na manutenção das vazões dos rios nos períodos de estiagens. Os estudos dos aquíferos Urucuia e Cárstico na bacia do rio São Francisco elaborados pela ANA, em parceria com os estados, são exemplos de aplicação dessa visão **integrada**, assim como alguns



diagnósticos de planos de bacia de rios de domínio da União elaborados mais recentemente pela ANA (Paranapanema, 2014; Grande, 2015; Paraguai, 2016 e Doce, 2019).

O **Sistema Aquífero Urucuia (SAU)** é um manancial subterrâneo que abrange seis estados brasileiros (Bahia, Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Maranhão e Piauí), constituído predominantemente por rochas arenosas que armazenam e transmitem as águas subterrâneas de forma eficiente. Tal potencialidade é constatada pela excelente produtividade dos poços explorados, cujas vazões chegam a $600\text{m}^3/\text{h}$; e, pela perenidade dos rios do oeste baiano, mantidos na estiagem pelo escoamento de base desse aquífero.

O escoamento de base do SAU para o rio São Francisco foi avaliado a partir da separação do escoamento de base, para o período histórico de 1975-2005, revelando valores de contribuição subterrânea que chegam a 80% da vazão média (Sobradinho) no período de estiagem (Figura 27). O valor médio da vazão de base específica é da ordem de 6 l/s/km^2 e cerca de 217 mm, o que representa 18% da precipitação na região.

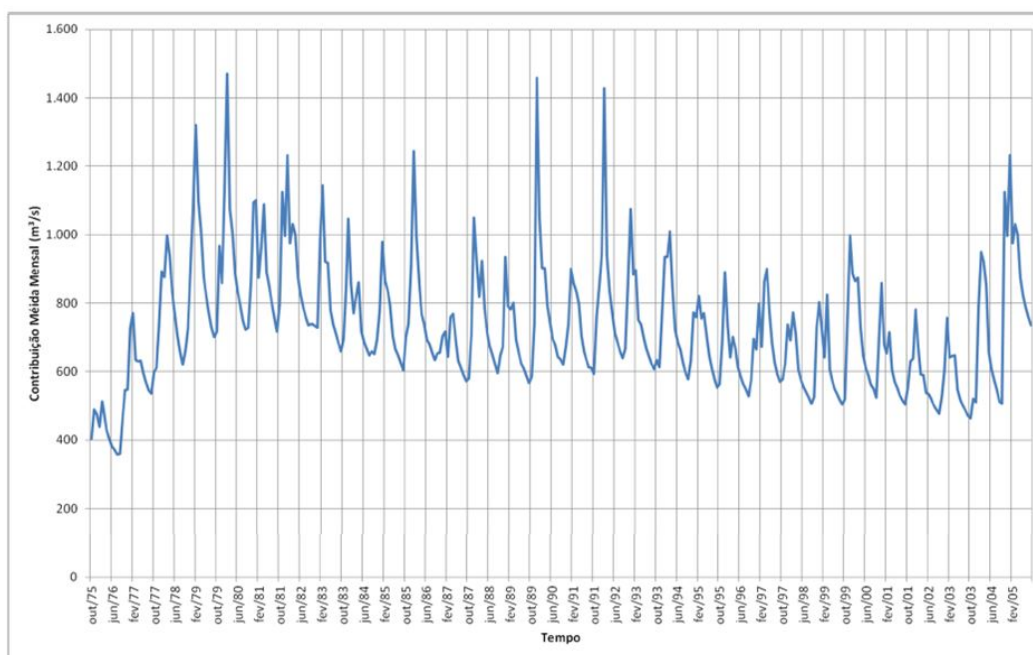


Figura 27. Contribuição do Sistema Aquífero Urucuia e Areado para a bacia do rio São Francisco. Vazões Médias Mensais (1975 a 2005). O gráfico mostra a vazão originária do escoamento de base do rio (ANA, 2017).

O Sistema Cárstico aflorante na bacia do rio São Francisco foi avaliado a partir da separação de escoamento de base, e embora tenha se mostrado um aquífero menos promissor, em termos de potencialidade comparado ao Urucuia, exerce um papel importante no suprimento de água na região semiárida da bacia.

A análise da estimativa da contribuição subterrânea das áreas carbonáticas aflorantes na bacia do rio São Francisco foi feita por meio dos hidrogramas de dados médios de vazão em postos fluviométricos selecionados e pela calibração das porosidades efetivas das rochas para o fluxo subterrâneo. As áreas das estações fluviométricas foram analisadas nas Unidades de

Gestão (UGAS) a partir da subdivisão das associações de rochas carbonáticas e pelíticas, com litotipos arenosos subordinados ou não, com o objetivo de analisar separadamente os calcários que tendem a configurar sistemas aquíferos essencialmente cársticos, daqueles que tendem a desenvolver sistemas cárstico-fissurados menos expressivos como aquíferos (Figura 28). Essa análise foi realizada no âmbito de um estudo realizado pela ANA, em 2018, denominado Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do São Francisco para a Gestão dos Recursos Hídricos.

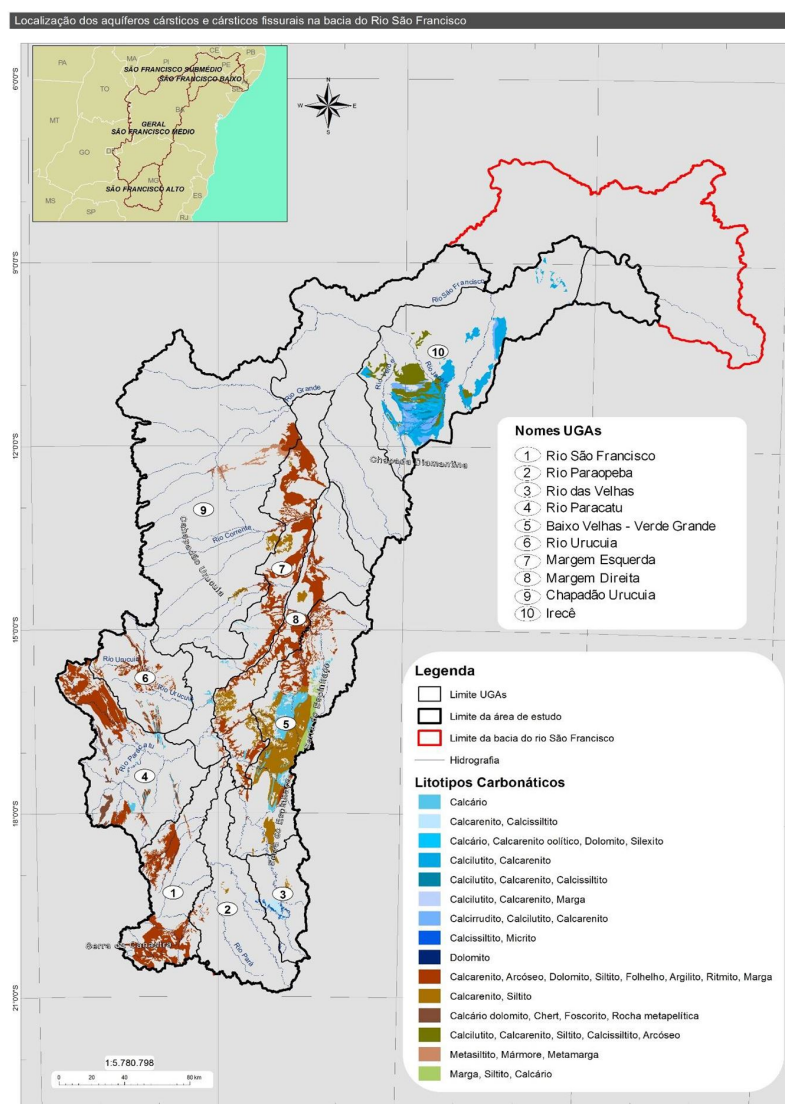


Figura 28. Regiões de aquíferos cársticos e fissuro-cársticos na bacia do rio São Francisco avaliados (Fonte: ANA, 2018).

As rochas carbonáticas apresentaram para a descarga subterrânea específica uma **variação** de 0,05 a 19,47 l/s.km², demonstrando uma grande **variação** das vazões específicas nas sub-bacias estudadas, refletindo a heterogeneidade natural dos ambientes cársticos. Com essa estimativa foi **possível** observar que a **participação** da **contribuição** subterrânea dos aquíferos

cársticos é mais expressiva na região do Alto São Francisco e na região do rio Paracatu (Figura 29), coadunando, inclusive com a hipótese conceitual de aporte (importação) de água da bacia do Grande, no limite sul da bacia do rio São Francisco (Figura 30). Cenário oposto de exportação de água ocorre na região do médio São Francisco, no limite oeste da bacia, onde o Sistema Aquífero Urucuia alimenta as nascentes dos afluentes do Alto Tocantins, mostrando uma assimetria entre as bacias hidrográficas e hidrogeológicas.

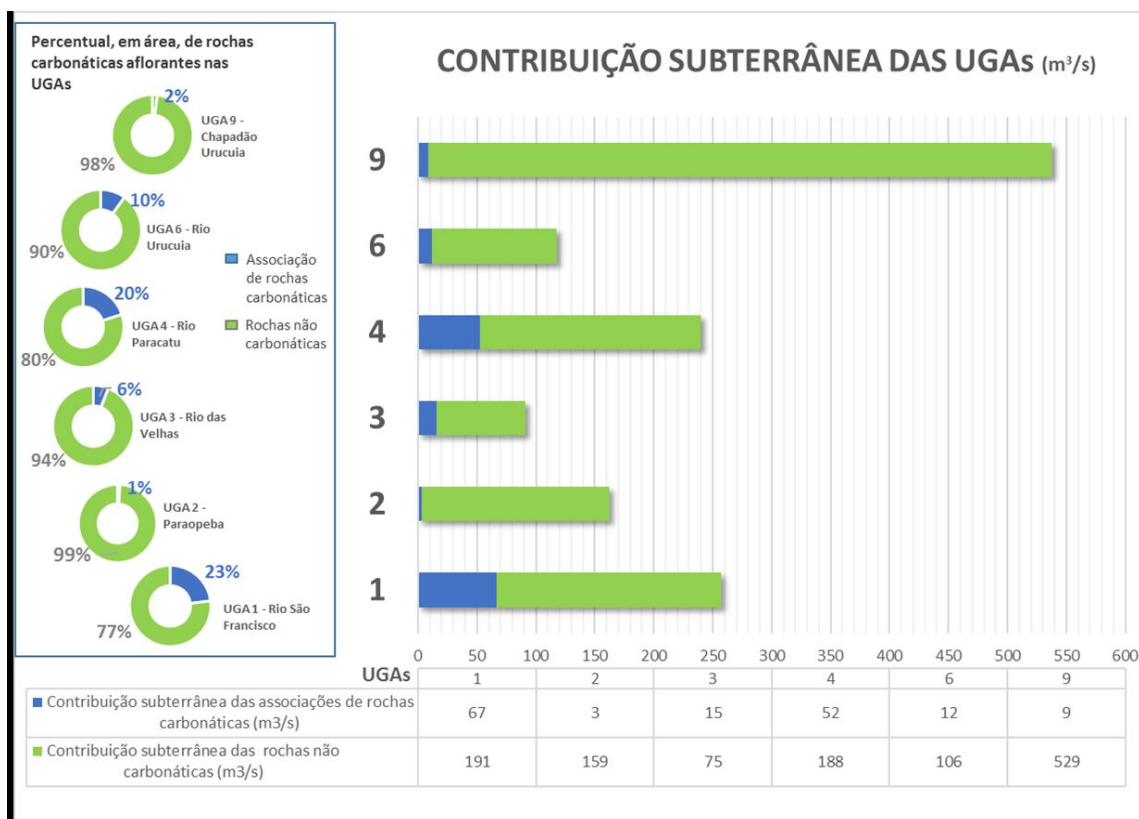


Figura 29. Estimativa da contribuição subterrânea dos aquíferos cársticos e não-cársticos na bacia do São Francisco



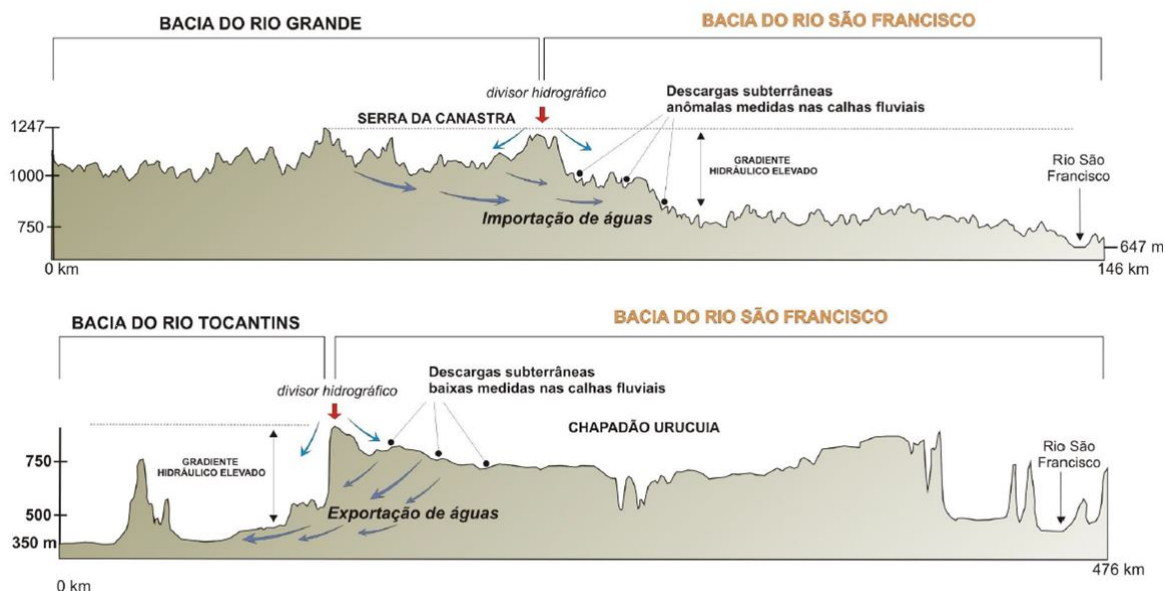
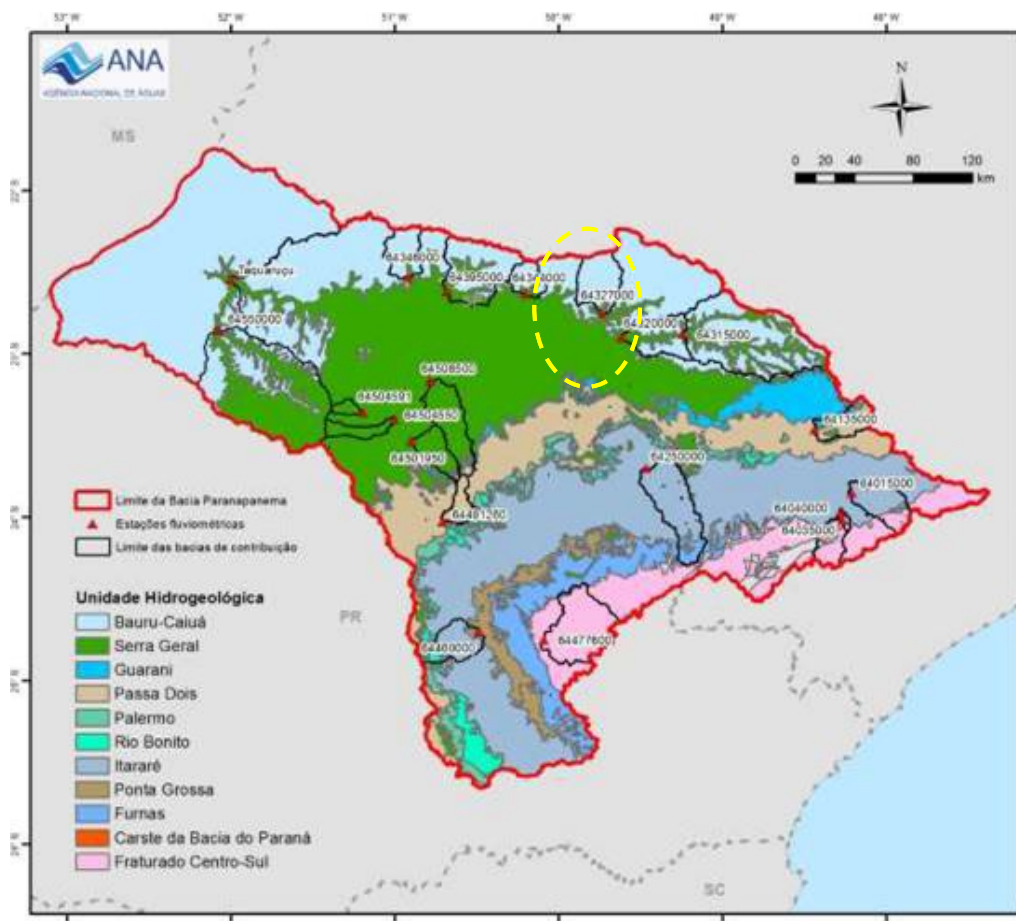


Figura 30. Condições de importação e exportação de águas nas bordas da bacia do rio São Francisco.

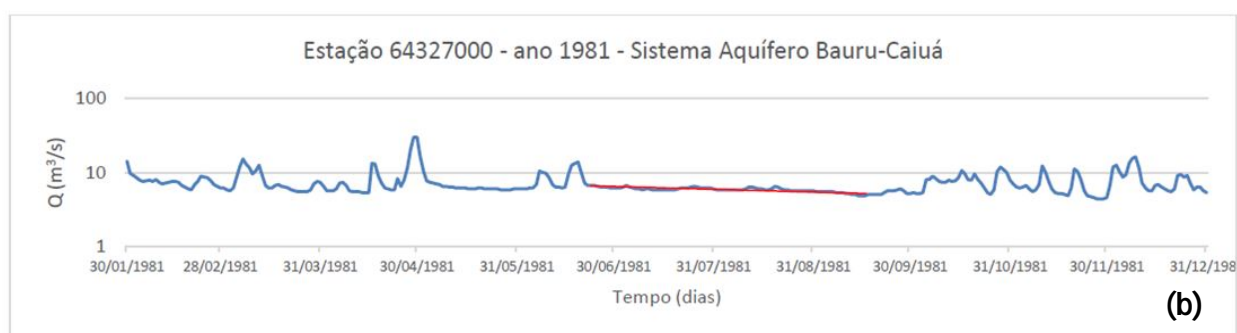
Dos **planos de bacia** de rios de domínio da União, nos quais se utilizou a **avaliação integrada rio/aquífero**, se destacam aquelas realizadas no aquífero Bauru-Caiuá nas bacias dos rios Paranapanema e Grande.

Na **bacia do Paranapanema**, utilizando as relações entre vazões mínimas e médias e as curvas de permanência das estações selecionadas, observou-se que o **Sistema Aquífero Bauru-Caiuá** é o de maior capacidade de regularização ou o que gera a maior contribuição do fluxo de base ao escoamento superficial, em, aproximadamente, 67% das estações avaliadas. Os valores calculados na curva de recessão vão ao encontro dos obtidos pelos cálculos anteriores e o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá se destaca com elevada contribuição, restituindo cerca de 17% da precipitação em média, como exemplificado nas Figuras 31a e 31b, no cálculo de recessão efetuado na sub-bacia do rio São João, afluente do rio Turvo, no médio Paranapanema.





(a)



(b)

Figura 31. (a) Localização da estação fluviométrica 64327000 (São Pedro do Turvo; 6D-010), no rio São João. (b) Exemplo de curva de recessão do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá na bacia do rio Paranapanema, para o ano de 1981.

Já no Plano da bacia do rio Grande, o **Sistema Aquífero Bauru-Caiuá** foi avaliado em três estações fluviométricas (Figura 32a), e revelou-se o menos promissor dentre os aquíferos avaliados (Sistema Aquífero Granítico Gnáissico-SAGG e Serra Geral-SASG), reflexo de suas características geológicas nesta porção da Bacia, onde é constituído por sedimentos finos da

formação do rio do Peixe. Esta condição foi confirmada pelos baixos valores de restituição obtidos para este sistema (média de 8% da precipitação média, enquanto o SAGG chegou a 16,4% e o SASG a 11%), conforme pode ser observado na Figura 32b. Entretanto, destaca-se que este comportamento foi caracterizado com base nos resultados de apenas três estações fluviométricas, as quais representam apenas 15% da área total de afloramento desse sistema aquífero na bacia. É possível, portanto, que essa caracterização possa ser revisada à medida que estejam disponíveis mais dados sobre a quantificação do uso da água subterrânea nesse aquífero, e que haja mais estações fluviométricas representativas desse Sistema.

Outros aquíferos importantes não puderam ser avaliados nestas bacias, nos diagnósticos realizados, como o Guarani (SAG), por não terem sido encontradas estações com áreas representativas destes.

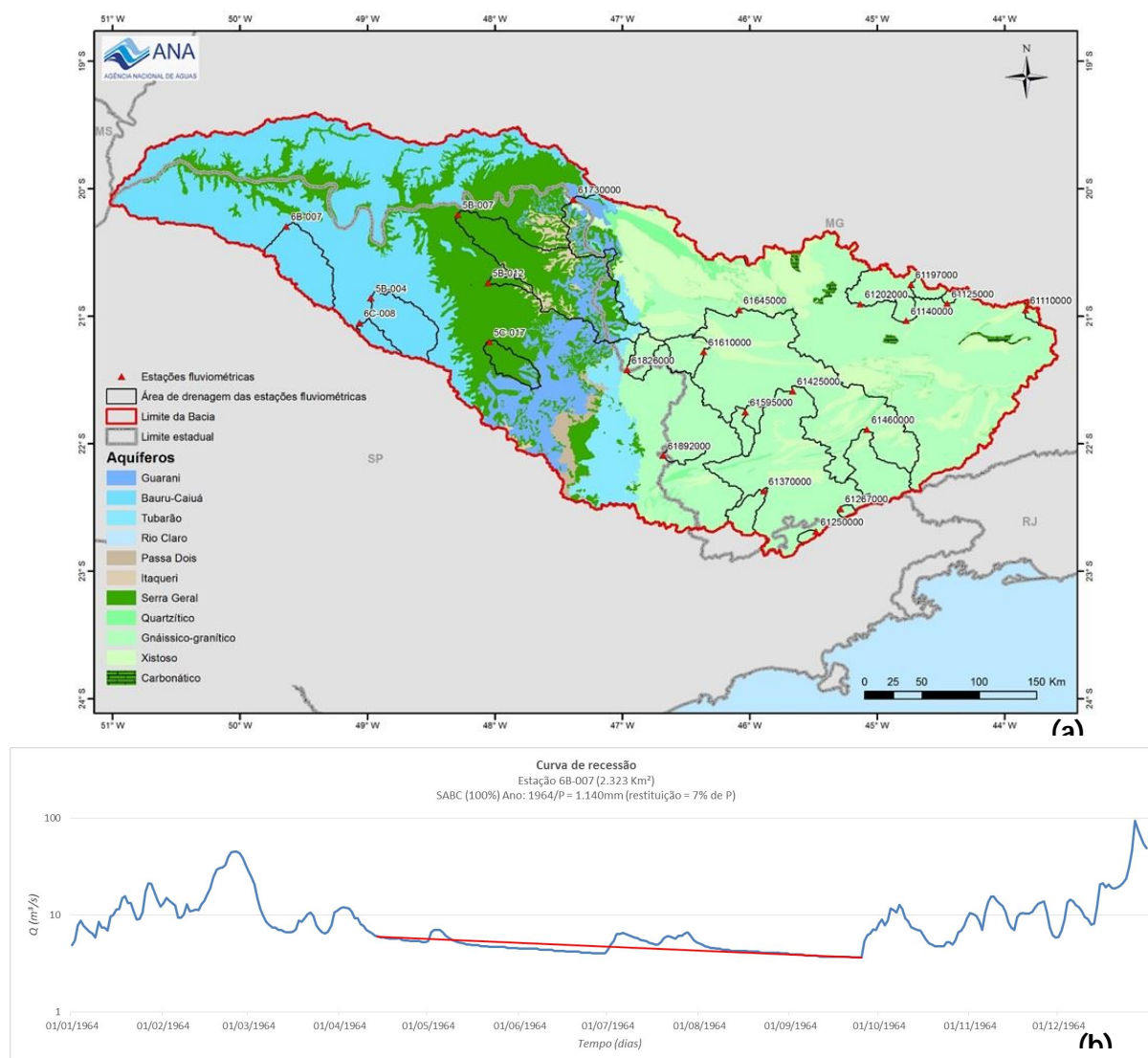


Figura 32. (a) Localização das estações fluviométricas avaliadas em área de afloramento do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá (6B-007); (6C-008) e (5C-017). (b) Exemplo de curva de recessão do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá na estação 6B-007, Bacia do Rio Grande.

6. Próximos passos

Esta Nota Técnica teve o objetivo de apresentar a metodologia para a indicação das áreas prioritárias para a implementação da gestão integrada rio/aquífero no Brasil, com base em conceitos técnicos que demonstrem uma conexão relevante entre rios e aquíferos. Relevância essa que pode ser avaliada a partir de estimativas de vazões mínimas e métodos de separação de fluxos de base provenientes dos aquíferos, em especial por filtros digitais.

Conforme apresentado, a definição das áreas prioritárias para a gestão integrada requer, inicialmente, uma delimitação, em escala nacional, de áreas compatíveis com as premissas pertinentes da avaliação integrada rio/aquífero. Nesse contexto, considerou-se a influência de aquíferos livres e rios perenes, em regiões onde se observa um período sazonal de estiagem bem definido. Assim foi definida uma área de estudo de aproximadamente 4.800 km², com base nos critérios de exclusão apresentados no item 3.1.

No que tange à avaliação da contribuição dos aquíferos para os rios, considerou-se utilizar múltiplos métodos de análise, com vistas a refinar as estimativas do escoamento de base, cujo valor é influenciado por muitas variáveis intrínsecas da bacia e das atividades de uso e ocupação do solo, bem como das extrações diretas dos aquíferos e rios. Neste sentido, a contribuição dos aquíferos livres para rios perenes pode ser calculada pelos diversos métodos disponíveis com a proposição de faixas de valores da participação do escoamento de base na vazão média, com vistas a definir prioridades na implementação da gestão integrada rio/aquífero.

Neste sentido, a próxima etapa será o levantamento de dados e a aplicação destes métodos de análise, para testar os valores propostos como áreas representativas dos aquíferos nas estações, conjugadas às análises dos comportamentos das curvas de recessão das estações fluviométricas e avaliando os valores de contribuição do fluxo de base de cada aquífero relevante para os rios de domínio da União e seus principais tributários de domínio dos Estados, a fim de indicar as áreas prioritárias para a implementação da gestão integrada pelos órgãos gestores da União e dos Estados de forma articulada.

No futuro, as áreas prioritárias identificadas poderão ser comparadas com aquelas elencadas em outros levantamentos consideradas como críticas e/ou com conflitos instalados ou potenciais, e priorizadas, segundo o grau de criticidade e/ou conflito existente ou com potencial de se instalar na bacia. Assim como poderá ser feito, no futuro, um levantamento das demandas por águas subterrâneas com base no Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH), que vem sendo alimentado pelos estados como meta do Progestão desde 2015 ou em outras bases existentes.

Os produtos esperados são mapas e tabelas de dados, com a indicação de áreas prioritárias para a implementação escalonada, por faixas ou zonas, da gestão integrada rio-aquífero de forma articulada e compartilhada pela União e estados.

7. Referências Bibliográficas

- Agência Nacional de Águas (ANA). No prelo. Estimativas da contribuição do escoamento de base de aquíferos aos rios federais e aos seus principais tributários estaduais nas bacias hidrográficas dos rios Grande, Paranapanema e Parnaíba. Relatórios Parciais 04 e 05. Relatório Parcial 04 (RP 04): Volume 1: Estado da arte das metodologias utilizadas na separação do escoamento de base. Volume 2: Desenvolvimento de rotinas baseadas nos filtros digitais recursivos. Volume 3: Metodologia para individualizar a participação de aquíferos no escoamento de uma estação fluviométrica. Aprovado de março de 2021. Relatório Parcial 05 (RP 05): Estimativas do escoamento de base por diferentes metodologias e avaliação e comparação dos valores estimados. Versão de 22/03/21.
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2018. Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do São Francisco para a Gestão dos Recursos Hídricos. Relatório Final – Volume IV – Gestão Integrada de Recursos Hídricos / Tomo 1 – Balanço Hídrico. Brasília: 204p.
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2017. Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuiá e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada. Relatório Final: Volume 1, Tomo II – Caracterização Climática e Hidrológica da Região de Estudo. Brasília: 91p.
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2016 Diagnóstico da Hidrogeologia e Avaliação da Disponibilidade Hídrica Subterrânea da Bacia do Paraguai. Nota Técnica nº 09/2016/COSUB/SIP. ANA, Brasília, 117 p.
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2015. Diagnóstico da Geologia e Hidrogeologia da Bacia do Rio Grande. Nota Técnica nº 07/2015/COSUB. ANA, Brasília, 95 p.
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2014. Diagnóstico da Geologia e Hidrogeologia da Bacia do Paranapanema. Nota Técnica nº 18/2014/GESUB/SIP. ANA, Brasília, 80 p.
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2013. Mapa das Áreas Aflorantes dos Aquíferos e Sistemas Aquíferos do Brasil, Escala 1:1.000.000 e estimativas das Reservas Potenciais Explotáveis dos principais aquíferos aflorantes. Nota Técnica nº 19/2013/GESUB/SIP. ANA, Brasília, 8 p.
- Arnold, J. G.; Allen, P. M. Validation of automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records. Journal of American Water Resources Association. v. 35, p. 411-424, 1999.
- Arnold, J. G.; Allen, P. M.; Muttiah, R.; Bernhardt, G. Automated Baseflow Separation and Recession Analysis Techniques. Groundwater. v. 33, n. 6, p. 1010-1018, 1995.
- Bosch, D. D.; Arnold, J. G.; Allen, P. G.; Lim, K.J.; Park, Y. S. Temporal variations in baseflow for the Little River experimental watershed in South Georgia, USA. Journal of Hydrology: Regional Studies, v.10, p. 110-121, 2017.
- Brodie, R. S.; Hostetler, S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. Bureau of Rural Sciences; Australian Government; Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. International Association of Hydrogeologist Conference. Camberra, 2005, 13 p.
- Chapman, T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. Hydrological Processes, v. 13, p. 710-714, 1999. In: Domenico & Schwartz. 1990.
- Cruz, J. C. & Tucci, C. E. M. 2008. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), volume 13 n.1 Jan/Mar 2008, 111-124.
- Domenico, P.A.; Schwartz, F.W.(1990) Physical and Chemical Hydrogeology. Ed. John Wiley & Sons, Singapore, 824 p.
- Duki, S. R. H.; Seyedian, S. M.; Rouhani, H.; Farasati, M. Evaluation of base flow separation methods for determining water extraction (case study: Gorganroud river basin. Water Harvesting Research, v. 2, n. 2, p. 54-70, 2017. Eckhardt. 2005.

- Eckhardt, K. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation. *Hydrological Processes*. v. 19, n. 2, p. 507-515, 2005.
- Feitosa, F. A. C.; Filho, J. M.; Feitosa, E. C.; Demetrio, J. G. A. *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. 3 ed. Revis. e ampl. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, LABHID, Rio de Janeiro, 2008, 812 p.
- Gonzales, A. L.; Nonner, J.; Heukers, J.; Uhlenbrook, S. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* v. 6, p. 3483-3515, 2009.
- Granziera, M. L. M. 2013. A fixação de vazões de referência adequadas como instrumento de segurança jurídica e sustentabilidade ambiental na concessão de outorgas de direito de uso de recursos hídricos. *Revista de Direito Ambiental*, v. 18, n. 70, p. 127-148, abr./jun., 2013.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Dados de precipitação mensal. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos> Acesso em março de 2021.
- Welderufael, W.A.; Woyessa, Y.E. 2010. Stream Flow Analysis and Comparison of Base Flow Separation Methods. Case Study of the Modder River Basin in Central South Africa. *European Water*, v. 31, p. 03-12.
- Lim, K. J.; Park, Y. S.; Kim, J.; Shin, Y. C.; Kim, N. W.; Kim, S. J.; Jeon, J. H.; Engel, B. A., 2010. Development of genetic algorithm-based optimization module in WHAT system for hydrograph analysis and model application. *Comput. Geosci*, v. 36, p.936-944.
- Lyne, V. D.; Hollyck, M. Stochastic Time-Variable Rainfall- Runoff Modeling. *In: Hydro. and Water Resour. Symp.* Institution of Engineers Austrália, Perth, Austrália, p. 89-92, 1979.
- Nathan, R. J.; MacMahon, A. A. 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, v. 26, n. 7, p. 1465-1473.
- Mato Grosso do Sul. 2015. Manual – Outorga de direito de uso de recursos hídricos. Instituto de Meio Ambiente do Mato Grosso do Sul – IMASUL.
- Mato Grosso do Sul. 2010. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia e Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. Plano estadual de recursos hídricos de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, MS: Editora UEMS, 2010. 194p
- Smakhtin, V.Y., 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240: 147-186.
- Sophocleous, M. 2000. From safe yield to sustainable development of water resources - the Kansas experience. *Journal of Hydrology* 235: 27-43.
- Stewart, M. K. Promising new baseflow separation and recession analysis methods applied to streamflow at Glendhu Catchment, New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 19, p. 2587-2603, 2015. Teixeira et al., 2003.
- Teixeira, W, Toledo, C.M., Fairchild, T. R., Taioli, F. 2003. Decifrando a Terra. Organização Wilson Teixeira [et al]. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2003.
- Zhang, J.; Zhang, Y.; Song, J.; Cheng, L.; Gan, R.; Shi, X.; Luo, Z.; Zhao, P. 2017. Comparing hydrological modelling, linear and multilevel regression approaches for predicting baseflow index for 596 catchments across Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*
- Zomlot, Z.; Verbeiren, B.; Huysmans, M.; Batelaan, O. Spatial distribution of ground\water recharge and base flow: assessment of controlling factors. *J. Hydrol. Reg. Stud.* v. 4, p. 349-368, 2015.

Atenciosamente,

(assinado eletronicamente)

MÁRCIA TEREZA PANTOJA GASPAR
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico

(assinado eletronicamente)
ADRIANA NIEMEYER PIRES FERREIRA
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico

(assinado eletronicamente)
FABRÍCIO BUENO DA FONSECA CARDOSO
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico

(assinado eletronicamente)
LETÍCIA LEMOS DE MORAES
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico

De acordo, à SIP.

(assinado eletronicamente)
FERNANDO ROBERTO DE OLIVEIRA
Coordenador de Águas Subterrâneas

De acordo.

(assinado eletronicamente)
TIBÉRIO MAGALHÃES PINHEIRO
Superintendente de Implementação de Planos, Programas e Projetos

