O Boletim de Conjuntura (BOCA) publica ensaios, artigos de revisão, artigos teóricos e empíricos, resenhas e vídeos relacionados às temáticas de políticas públicas.

O periódico tem como escopo a publicação de trabalhos inéditos e originais, nacionais ou internacionais que versem sobre Políticas Públicas, resultantes de pesquisas científicas e reflexões teóricas e empíricas.

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratizacão mundial do conhecimento.



BOLETIM DE CONJUNTURA

BOCA

Ano VII | Volume 22 | Nº 65 | Boa Vista | 2025

http://www.ioles.com.br/boca

ISSN: 2675-1488

https://doi.org/10.5281/zenodo.15486005

BOLETIM DE CONJUNTURA

www.ioles.com.br/boca

DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA DA BACIA DO RIO TIBAGI (PR), BRASIL

Ana Karlla Penna Rocha[1]

Mauricio Moreira dos Santos[2]

Danielle de Almeida Bressiani[3]

Resumo

A exploração crescente e insustentável das águas subterrâneas, associada aos eventos climáticos extremos, coloca em risco a segurança hídrica em diversas regiões da Terra. Este artigo tem como objetivo geral compreender a interação entre águas superficiais e subterrâneas na bacia do rio Tibagi, analisando a variabilidade espacial e temporal da disponibilidade hídrica, a fim de fornecer subsídios para uma gestão integrada e sustentável da bacia. A pesquisa é de abordagem quantitativa, baseada na análise de dados secundários de precipitação (PCP) e vazão (Q) entre 1986 e 2016. Foram estimadas a restituição hídrica relativa anual (Rh) e a reserva reguladora aquífera (Rr) por meio da análise de recessão, utilizando o método de Maillet. Os resultados revelam uma significativa variação espacial e temporal na disponibilidade hídrica da bacia. Enquanto, no município de Castro, houve uma redução de 30,5 mm, em Cornélio Procópio – município menos chuvoso – observou-se um aumento significativo na PCP de 26,7 mm. No entanto, esse aumento não resultou em maior Rr, Rh ou Q. A análise da Rh e da Rr revelou variações significativas ao longo do tempo e do espaço, porém sem tendências estatísticas significativas. Conclui-se que a interação entre águas superficiais e subterrâneas na bacia é complexa e influenciada por múltiplos fatores, como uso e cobertura da terra, temperatura e evapotranspiração. Para tanto, reforça-se a necessidade da ampliação do monitoramento e acesso a dados públicos atualizados para orientar a gestão integrada dos recursos hídricos da região.

Palavras-chave: Alto Paraná; Curva de Recessão; Gestão de Recursos Hídricos; Padrão Hidrometeorológico; Recarga Subterrânea.

Abstract

The increasing and unsustainable exploitation of groundwater, associated with extreme weather events, puts water security at risk in several regions of the Earth. This article aims to understand the interaction between surface and groundwater in the Tibagi river basin, analyzing the spatial and temporal variability of water availability, to support an integrated and sustainable basin management. This research is a quantitative approach, based on the analysis of secondary data on precipitation (PCP) and streamflow (Q) between 1986 and 2016. The annual relative water restitution (Rh) and the aquifer regulatory reserve (Rr) were estimated through recession analysis, using the Maillet method. The results reveal a significant spatial and temporal variation in water availability in the basin. While in the municipality of Castro, there was a reduction of 30.5 mm, in Cornélio Procópio – a less rainy municipality – a significant increase in PCP of 26.7 mm was observed. However, this increase did not result in higher Rr, Rh, or Q. The analysis of Rh and Rr revealed significant variations over time and space, but without significant statistical trends. It is concluded that the interaction between surface and groundwater in the basin is complex and influenced by multiple factors, such as land use and land cover, temperature, and evapotranspiration. Therefore, it is necessary to increase monitoring and access to updated public data to guide the integrated management of water resources in the region.

Keywords: Groundwater Recharge; Hydroclimatic Patterns; Recession Curve; Upper Paraná; Water Resources Management.

[1] Doutora em Geografia pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). E-mail: ana.karlla.penna@uel.br

[2] Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutor em Geociências e Meio Ambiente. E-mail: mmsantos@utfpr.edu.br

[3] Professora da Universidade Federal de Pelotas. Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento. E-mail: danielle.bressiani@ufpel.edu.br

INTRODUÇÃO

Diante das crescentes restrições hídricas, o uso da água subterrânea tem se mostrado uma alternativa essencial. Sua utilização sustenta atividades econômicas e domésticas em todo o mundo. No entanto, o monitoramento incipiente, o uso insustentável e a deficiência na governança das águas subterrâneas, intensificados ao longo dos anos, devido à exploração clandestina e a poluição dos reservatórios subterrâneos, podem limitar a segurança hídrica e alimentar, o que piora com os eventos de seca e inundação mais frequentes, colocando em risco a universalização do acesso à água potável.

Nesse contexto, torna-se imprescindível compreender a interação entre as águas superficiais e subterrâneas, já que aproximadamente 90% dos rios brasileiros apresentam fluxo perene por causa do escoamento de base dos aquíferos. Entre as possibilidades de monitoramento da interação entre águas superficiais e subterrâneas, destaca-se a análise da curva de recessão nos hidrogramas. Essa abordagem fornece informações cruciais sobre retenção, transmissividade, armazenamento subterrâneo, recarga e reserva reguladora, contribuindo para o manejo sustentável das bacias hidrográficas.

A Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi - BHRT, no Paraná – Brasil, abriga cerca de 2,1 milhões de habitantes e inclui regiões urbanizadas, como as Regiões Metropolitanas de Londrina e Ponta Grossa. A bacia enfrenta desafios relacionados ao aumento populacional, com estimativa de crescimento de 400 mil pessoas até 2030 nos 49 municípios que dependem de seus recursos hídricos. A maior frequência de períodos de estiagem e dos eventos de chuva intensa, contribuem para a incerteza da captação e distribuição da água superficial, tornando as águas subterrâneas a principal fonte de abastecimento de água potável. A pressão das atividades antropogênicas, com o crescimento populacional, urbanização acelerada e superexploração das águas subterrâneas, intensifica a crise hídrica.

Dado o exposto, há necessidade urgente de gerenciar as águas superficiais e subterrâneas como um único recurso. Para isto, estudos e pesquisas são necessários para quantificar e qualificar a variabilidade espacial desses recursos. Esta pesquisa tem como objetivo geral compreender a interação entre águas superficiais e subterrâneas na BHRT. Para isto, este artigo foi composto por dois objetivos específicos: (1) compreender o comportamento temporal e espacial da interação entre as águas superficiais e subterrâneas na BHRT, por meio da estimativa da restituição hídrica relativa anual, baseada no método de Maillet; e (2) avaliar o comportamento da reserva reguladora aquífera anual tendo como referência o período 1986 a 2016. Para isto, foram coletados dados históricos de precipitação pluviométrica e de vazão, acompanhado de fatores climáticos, altimétricos e dos sistemas aquíferos. A análise da reserva reguladora aquífera e da restituição hídrica anual considera as águas superficiais e subterrâneas como um único sistema, auxiliando na gestão dos recursos hídricos, favorecendo a

simulação temporal e espacial necessária para alcançar os objetivos mencionados, sendo essencial para garantir a segurança e sustentabilidade hídrica na região.

Este artigo é estruturado em cinco seções, incluindo esta introdução. A segunda seção apresenta o referencial teórico, no qual aborda o tema "Ciclo hidrológico e a importância das águas subterrâneas". A terceira seção se refere à área de estudo escolhida, coleta dos dados secundários e detalha os procedimentos metodológicos adotados. A quarta seção analisa e discute os resultados obtidos. Por fim, a quinta e última seção apresenta as considerações finais, destacando as contribuições do estudo para a gestão integrada dos recursos hídricos.

REFERENCIAL TEÓRICO

Também conhecido como o "ciclo das águas", o ciclo hidrológico retrata a movimentação contínua da água entre a hidrosfera, a litosfera e a atmosfera (SINGH; SINGH, 2021). A circulação de água entre estes sistemas terrestres, promovida essencialmente pela radiação solar, é proporcionado por intermédio dos processos físicos como a evaporação, transpiração, precipitação, infiltração, percolação e escoamento superficial (SINGH; SINGH, 2021; TUCCI, 2020). Na hidrosfera, a circulação acontece principalmente nos oceanos; na litosfera, o movimento da água ocorre tanto no interior dos solos e rochas, como em sua superfície terrestre e na atmosfera e na atmosfera é onde acontece a maioria dos fenômenos atmosféricos (TUCCI, 2020).

Segundo Tucci (2020), o ciclo hidrológico é considerado fechado a nível global, porém devido às características diversas do planeta Terra, ele também pode ser caracterizado como um fenômeno local de movimentação da água. Entre os fatores que contribuem com a variabilidade do ciclo hidrológico, estão a influência da gravidade, rotação e translação da Terra, desuniformidade em que a energia solar atinge diversos locais, diferente comportamento térmico dos oceanos e continentes, e a variabilidade espacial de solos e coberturas vegetais (PRĂVĂLIE *et al*., 2019; TUCCI, 2020).

Em virtude de o ciclo hidrológico ser altamente influenciado pela energia solar, seus componentes se alteram de forma significante, fazendo com que o ecossistema se torne mais vulnerável. Como consequência aos efeitos adversos das mudanças climáticas, a frequência e intensidade dos eventos de precipitação tendem a aumentar em alguns locais, porém, em outras áreas é reduzida (SINGH; SINGH, 2021). O mesmo ocorre com a vazão dos rios, a depender das mudanças no padrão dos componentes do ciclo hidrológico, e ao longo do ano, a magnitude dessas mudanças varia de acordo com a distribuição geográfica (MAY; VOSS; ROECKNER, 2003).

A produção de água em uma bacia hidrográfica depende do ciclo hidrológico, onde a precipitação e o escoamento são responsáveis pela alimentação de um corpo d'água superficial e quanto ao escoamento subsuperficial e de base se encarregam da manutenção da água subterrânea (GARCEZ; ALVAREZ, 1988). Com a retirada da vegetação nativa, para a urbanização ou aumento das áreas destinadas à agricultura, ocorre a redução da infiltração da água no solo, maior escoamento superficial, aumento na vazão média da bacia e a diminuição na recarga subterrânea. Sob esta perspectiva, estas atividades de natureza antrópica podem maximizar as alterações nos componentes do ciclo hidrológico, logo intensificar a degradação das bacias hidrográficas (MUÑOZ-VILLERS; MCDONNELL, 2013; TUCCI, 2020).

A partir da Constituição de 1988 e a Lei das Águas, Nº 9.433 de 1997, que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos, foi adotado um modelo de gestão e gerenciamento atual de recursos hídricos, no qual envolve a conscientização com o uso sustentável da água (ROSA; GUARDA, 2019). No entanto, a preocupação com os recursos hídricos no Brasil concentrou-se principalmente nas águas superficiais (ZOBY; MATOS, 2002). Todavia, nos últimos anos, houve o progresso com o gerenciamento das águas subterrâneas devido ao Plano Nacional e Estadual de Recursos Hídricos (REBOUÇAS, 2008), Administração de Recursos Hídricos no Paraná (ROSA FILHO, 2010), Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (ANA, 2017), Programa Nacional de Águas Subterrâneas e Agenda Nacional de Águas Subterrâneas (VILLAR, 2016).

Devido à existência da conexão entre as águas superficiais e subterrâneas, o fluxo contínuo dos rios é mantido pela contribuição frequente do fluxo de base (MILLER *et al*., 2016). Isso adverte que o uso desenfreado e sem planejamento dos corpos hídricos podem limitar a segurança hídrica, o que piora com os eventos de seca e inundação mais frequentes, colocando em risco a universalização do acesso à água potável (SOUZA; REIS, 2022; VILLAR, 2016).

Nesse sentido, o fluxo contínuo de um rio, no qual é dependente das chuvas diretas nos canais, escoamento superficial e do fluxo de base, são influenciados por parâmetros climáticos, fisiográficos e geológicos (RICHARDSON *et al*., 2020). Aproximadamente 90% dos rios brasileiros são supridos pelo escoamento de base dos aquíferos, mantendo-os perenes (ANA, 2017). Nesse sentido, as bacias hidrográficas do nordeste brasileiro que apresentam um regime de fluxo intermitente foram assentadas em terrenos cristalinos subaflorantes, o que de fato evidencia que as características geológicas são capazes de influir sobre os componentes que compõem o ciclo hidrológico (REBOUÇAS, 2008; SHUBO; FERNANDES; MONTENEGRO, 2020).

Há diversos métodos que auxiliam na estimativa dos componentes hidrológicos, como escoamento superficial e fluxo de base (BLOOMFIELD; ALLEN; GRIFFITHS, 2009; RICHARDSON

et al., 2020). A partir de análises da curva de recessão presentes nos hidrogramas, o coeficiente de recessão pode ser estimado e fornecer informações acerca da retenção e transmissividade da bacia, armazenagem subterrânea, estimativa de recarga e sobre a reserva reguladora (BATISTEL; GRISON; MOTA, 2018; CARLOTTO *et al.,* 2019; SANTOS; CELLIGOI, 2002; SIMON *et al*., 2017). Portanto, considerado uma ferramenta necessária e importante no entendimento do comportamento temporal e espacial entre as águas superficiais e subterrâneas.

Diante do avanço tecnológico na hidrogeologia, com as técnicas de perfurações dos poços, houve a superexplotação da água subterrânea (REBOUÇAS, 2008). Segundo Villar (2016), o uso irregular, o monitoramento incipiente e a deficiência na governança das águas subterrâneas, intensifica sua degradação, já que é agravada pela exploração clandestina e contaminação devido às atividades humanas. Além disto, a superexplotação de seu uso ocasiona o rebaixamento dos níveis hídricos, reduz a capacidade de armazenamento, compromete a qualidade hídrica por causa do aumento da salinidade e interfere na vazão dos rios (ANA, 2017; SCHUCH *et al.,* 2023; YANG *et al*., 2022).

Apesar de ser utilizada como fonte de abastecimento de muitos municípios brasileiros, o conhecimento da quantidade e qualidade das águas subterrâneas é limitado (HIRATA; ZOBY; OLIVEIRA, 2010). O uso sustentável das águas subterrâneas deve respeitar a reposição natural dos aquíferos para que as reservas subterrâneas possam ser exploradas sem riscos ao aquífero. Peterlini; Pinese; Celligoi (2019) a partir da análise da curva de recessão, afirmam que os poços presentes na Bacia do Ribeirão Cafezal – PR utilizam aproximadamente 10,23% do potencial das reservas reguladoras. Porém, por se tratar de uma bacia altamente urbanizada, é recomendado que as áreas de recarga natural sejam preservadas a fim de garantir a manutenção das reservas reguladoras. Santos; Rocha; Tissiano (2021) observaram em alguns anos que a restituição relativa do aquífero guarani, em São Paulo, foi negativa, ou seja, a contribuição do escoamento de base para os rios foi maior que a recarga oriunda das chuvas.

No Brasil, alguns autores utilizaram o método de Maillet para estimar o coeficiente de recessão. Peterlini; Pinese; Celligoi (2019) aplicaram o método na Bacia do Ribeirão Cafezal – PR, encontrando o valor da constante de recessão k, de 0,0059 no ano mais seco e de 0,0078 no ano mais chuvoso. Silva; Bacellar; Fernandes (2010) aplicaram os métodos de Maillet, Boussinesq, Matching Strip e Drogue em seis bacias em área de embasamento cristalino na região centro-sul de Minas Gerais, encontrando valores de coeficientes de recessão próximos aos disponíveis na literatura. Nascimento *et al.* (2017) também aplicaram o método de Maillet e observaram uma tendência negativa no comportamento anual do coeficiente de recessão na Bacia do Rio Paraíba do Sul – RJ. Segundo os autores, a contribuição do

escoamento de base está superando a recarga pela precipitação, devido aos fatores climáticos, geomorfológicos e à intensiva alteração no uso do solo.

Em outros países, pesquisadores também investigam os processos de fluxo de base para obtenção de informações sobre os aquíferos. Dewandel *et al*. (2003) aplicaram os métodos de Maillet e de Boussinesq para analisar os hidrogramas de recessão em uma bacia hidrográfica de Omã, e concluem que o uso combinado das duas abordagens auxilia na estimativa da espessura do aquífero, apesar de possuírem características distintas. Na Itália, Abdin *et al*. (2021) também empregaram os dois métodos para observar a curva de recessão a fim de estimar as reservas de água subterrânea. Como a demanda global por água potável tende a aumentar no futuro, estas metodologias que auxiliam na obtenção de informações hidrogeológicas são fundamentais para satisfazer as necessidades hídricas dos seres vivos, assim como para otimizar a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

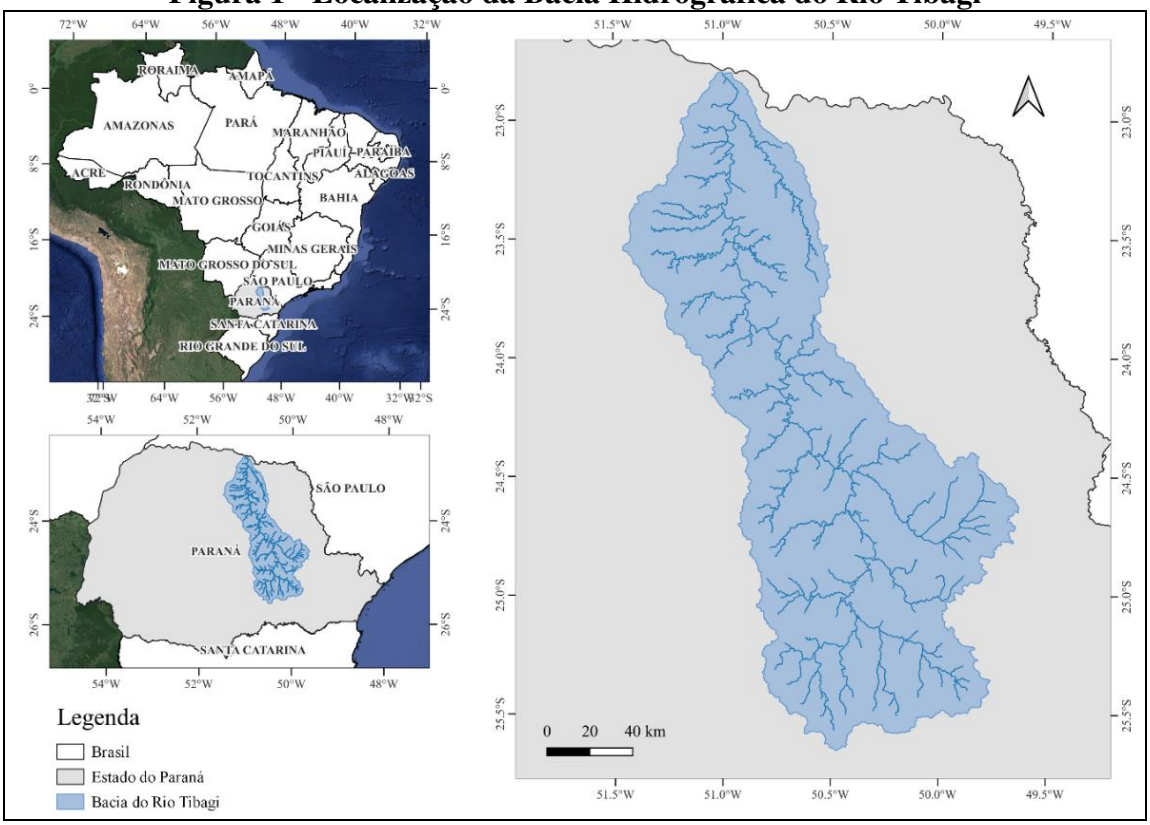
METODOLOGIA

Em termos metodológicos, a pesquisa proposta é do tipo "explicativa". Segundo Gil (2002), este tipo de pesquisa busca responder quais os fatores que determinam ou contribuem para a existência de um fenômeno. Além disto, tem como categoria de análise geográfica a paisagem e região, e como método de análise da realidade a Teoria Geral dos Sistemas, originado através do biólogo Ludwig von Bertalanffy, no qual pressupõe que os problemas ambientais são ocasionados a partir de uma combinação de diversos fatores, sejam eles climáticos, geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e a partir de ações antrópicas. Ainda, trata-se de uma pesquisa quantitativa com base na coleta de dados secundários (LAKATOS; MARCONI, 2008).

Área de estudo

A BHRT apresenta aproximadamente 25 mil km² de área de drenagem, cerca de 13% do território do estado do Paraná e os principais afluentes são os rios Taquara, Iapó, São Jerônimo, Congonhas, Ribeirão dos Apertados e Ribeirão Três Bocas, (PINESE, 2002; ROWIECHI *et al*., 2023). A área de estudo está situada na porção centro-leste do estado do Paraná, no sentido sul-norte, é composta por 49 municípios e contava com uma população de 2,1 milhões de habitantes em 2022 (IBGE, 2023). E está localizada entre as latitudes 22º 30' S a 25º 30' S e longitudes 49º 30' O a 51º 30' O (Figura 1).

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi



Fonte: Elaboração própria.

A bacia está dividida em duas Unidades Hidrográficas de Gestão de Recursos Hídricos, o Alto e o Baixo Tibagi. Sua nascente está localizada na Serra das Almas, Segundo Planalto paranaense, entre os municípios de Ponta Grossa e Palmeira, a uma altitude aproximada de 1100 m e deságua no reservatório da Usina Hidrelétrica de Capivara no Rio Paranapanema, divisa entre os estados do Paraná e São Paulo, a 298 m de altitude (PINESE, 2002; MANCHUR, 2023). De acordo com o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi, os municípios da BHRT possuem como principal atividade econômica a agricultura intensiva, seguida de pecuária, mineração e aquicultura. Quanto ao total da demanda hídrica, destaca-se o uso industrial (39,4%), seguido de abastecimento público (30%) e agricultura (26,4%) (IAT, 2020). Segundo a SEAB (2022) a produção agrícola, safra 2020/2021, dos municípios inseridos na BHRT ocupou 1.126.762 de hectares e somou 4.064.412 de toneladas para as culturas: amendoim, arroz, aveia, café, cana-de-açúcar, centeio, feijão, mandioca, milho, soja, sorgo, tomate e trigo.

A BHRT apresenta uma disponibilidade hídrica superficial de até 3,9 mil m³/hab/ano (IAT, 2020). A crescente demanda, evidenciada pelo aumento de 43,52% no consumo público em 2020, reforça a necessidade de ferramentas eficazes para gestão integrada (IAT, 2020). Quanto à captação das águas subterrâneas, os 117 poços existentes na bacia foram operados e monitorados pela SANEPAR,

com a captação total de 0,84 m³/s ou 72,7 mil m³/dia, sendo a disponibilidade hídrica das unidades aquíferas de até 151,84 m³/s (IAT, 2020). No estado do Paraná, o volume de água subterrânea captada pelo SANEPAR até 2010 cresceu em 30% (ROSA FILHO *et al.,* 2010).

Na BHRT, nota-se a presença de dois tipos climáticos: Cfa, no Baixo Tibagi e Cfb, no Alto Tibagi. No qual, o tipo Cfa corresponde ao clima subtropical úmido sem estação seca e com verão quente e o tipo Cfb clima subtropical úmido sem estação seca e com verão temperado (ALVARES *et al.,* 2013). Segundo Pinese (2002), quanto aos aspectos geológicos, a BHRT é considerada heterogênea, e parte dela está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná. Formado por derrames basálticos, a porção do Baixo Tibagi é constituído pelas Formações Piramboia (Tamarana e São Jerônimo da Serra), Botucatu (Tamarana, Mauá da Serra e São Jerônimo da Serra) e Serra Geral (Londrina, Sertanópolis e Jataizinho), ambos constituintes do Grupo São Bento.

No Alto Tibagi, próximo à sua nascente, encontram-se a sequência de sedimentos paleozoicos e mesozoicos do Grupo Rio Ivaí (PINESE, 2002). A partir dos aspectos geológicos que se originam as unidades aquíferas, segundo Rosa Filho *et al.* (2010), a BHRT apresenta as unidades aquíferas Caiuá, Guarani, Paleozoica Média Superior, Paleozoica Superior e Serra Geral Norte, na porção norte e Karst, Paleozoica Inferior, Paleozoica Média Superior, Paleozoica Superior e Pré-Cambriana, na porção sul (Figura 2).

Coleta e análise dos dados

Para a análise pluviométrica e fluviométrica na bacia em estudo, foram obtidas séries diárias de precipitação pluviométrica e de vazão no período de 1986 a 2016, por meio da coleta dos dados secundários nas estações pertencentes ao IAT (2025), conforme expresso na Tabela 1. Os dados diários de precipitação pluviométrica e de vazão foram convertidos para dados anuais, por meio de uma média aritmética.

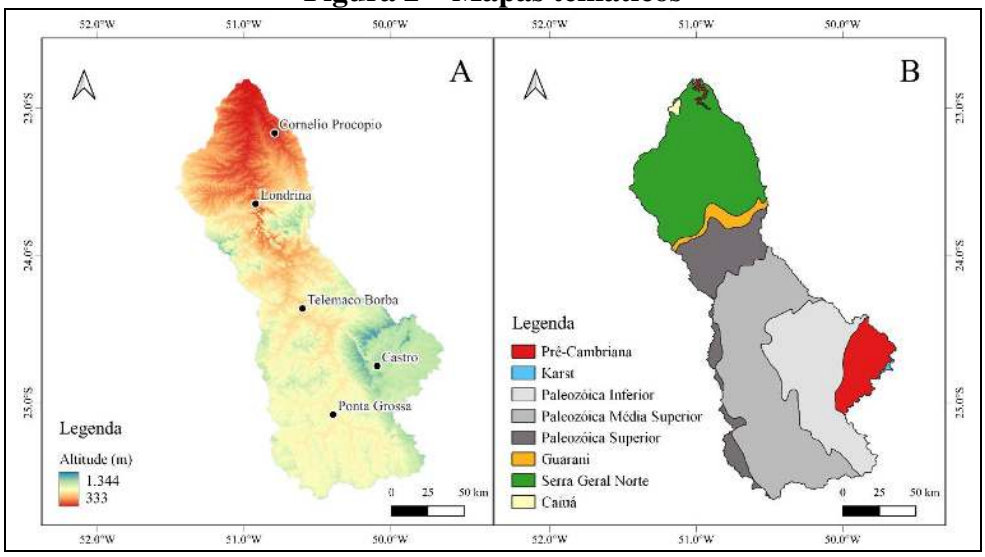
Tabela 1 - Relação das estações pluviométricas e fluviométricas situadas na BHRT (1986 a 2016)

	Município	Código	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Vazão	Cornélio Procópio	64508500	23° 10' 12"	50° 47' 17"	370
	Londrina	64501000	23° 38' 11"	50° 55' 22"	424
	Telêmaco Borba	64482000	24° 21' 34"	50° 35' 42"	700
	Castro	64477600	24° 44' 59"	50° 05' 20"	970
	Ponta Grossa	64444000	25° 04' 32"	50° 23' 20"	975
Precipitação pluviométrica	Cornélio Procópio	2350057	23° 10' 00"	50° 46' 59"	370
	Londrina	2351035	23° 31' 00"	51° 13' 59"	740
	Telêmaco Borba	2450011	24° 19' 59"	50° 37' 00"	768
	Castro	2449028	24° 46' 28"	49° 42' 00"	1051
	Ponta Grossa	2550003	25° 12' 00"	50° 09' 00"	790

Fonte: Elaboração própria.

Estas estações foram escolhidas por causa da simetria temporal e devido ao seu posicionamento em referência aos sistemas aquíferos (Figura 2).

Figura 2 – Mapas temáticos



Fonte: Elaboração própria.
Nota: A) Localização das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas. B) Unidades aquíferas presentes na BHRT.

Identificação do período de recessão e estimativa da restituição hídrica relativa anual

O coeficiente de recessão refere-se à taxa de liberação do escoamento de base para o rio, representando a contribuição das águas subterrâneas ao fluxo superficial após o término da infiltração de precipitação. Silva, Bacellar e Fernandes (2010) e Tallaksen (1995) defendem que, embora desafiadora, a análise de recessão – conforme revisão abrangente de diversos métodos – pode ser considerada um parâmetro útil para estimar o armazenamento hídrico subterrâneo em uma bacia hidrográfica. Wittenberg (2003) recomenda esse parâmetro para detectar e quantificar impactos sazonais e antrópicos no escoamento de base.

A constante de recessão pode ser calculada pelas Equações 1 e 2, baseadas no método de Maillet (1905), em que:

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

Q_0 representa a descarga do rio (m^3/s) no início da recessão;

k é a constante de recessão;

ln(Q) representa o logaritmo natural da descarga do rio (m^3/s);

$\ln(Q_0)$ representa o logaritmo natural da descarga do rio (m^3/s) no início da recessão;

ΔT é o intervalo de tempo, em dias, entre o início e o fim da recessão.

$$Q = Q_0^{e-kt} \quad (1)$$

$$k = -\frac{\ln(Q) - \ln(Q_0)}{\Delta T} \quad (2)$$

Para a estimativa da restituição hídrica relativa anual (Rh), serão utilizadas as equações 2, 3, 4 e 5, presentes também em Santos; Celligoi (2002), Santos (2005), Peterlini; Pinese; Celligoi (2019) e Santos; Rocha; Tissiano (2021), no qual: V, volume de água contribuinte para a bacia em cada ano selecionado (m³); Q_0, é a vazão no início da recessão; 86400, o número de segundos em um dia; k, constante de recessão; h, restituição hídrica (mm); A, área de drenagem da bacia localizada na zona de afloramento do aquífero (m²); hr, restituição relativa (%); pQ, soma da precipitação do primeiro dia até o dia referente à descarga do rio (Q) no término da curva de recessão do ano estudado (mm).

$$V = \frac{Q_0 \,.\, 86400}{k} \quad (3)$$

$$h = \frac{V}{A} \quad (4)$$

$$hr = \frac{(h)}{(pQ)} * 100 \quad (5)$$

Avaliação do comportamento da reserva reguladora anual (RR)

A partir dos dados obtidos pelas equações anteriores, o comparativo entre os anos estipulados (1986-2016) diante das oscilações da recarga subterrânea, será estimado por meio da equação 6, em que: Rr, representa a reserva da área de afloramento em cada ano selecionado (m³); Ac, a área de drenagem da bacia em cada ponto estudado (m²); hm, restituição hídrica da bacia para o ano selecionado (m).

$$R_r = A_c \times h_m \quad (6)$$

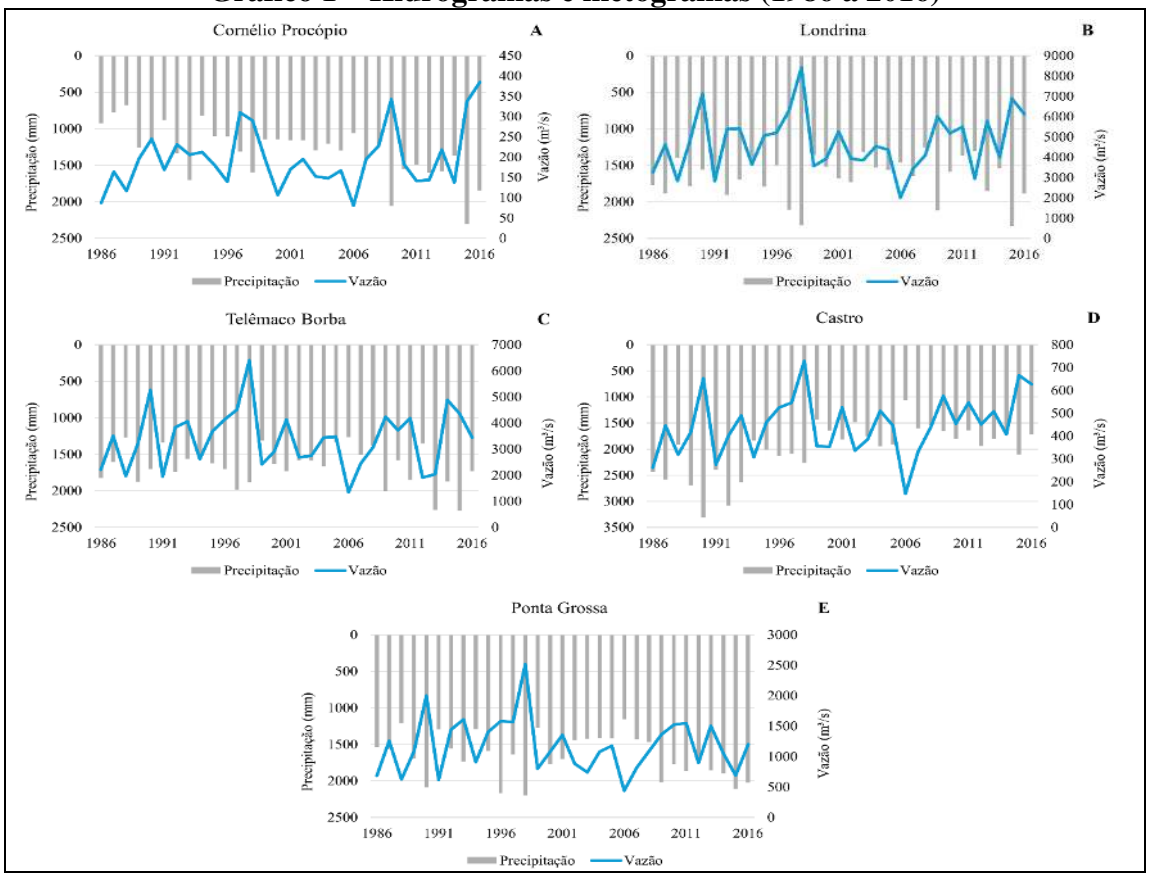
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos registros pluviométricos das cinco estações entre 1986 e 2016 (Figura 2) revelou uma precipitação média anual de 1.653,16 mm, obtida por meio da média aritmética, e evidenciou

importantes características espaciais e temporais. Observou-se uma variação espacial significativa, com Londrina e Castro apresentando as maiores médias de precipitação, enquanto Cornélio Procópio destacou-se como a menos chuvosa da bacia. No que diz respeito à variação temporal, a precipitação exibiu um padrão variável ao longo dos anos, sendo que a maior média anual (1.678,87 mm/ano) foi registrada na primeira década do período analisado. Notou-se ainda um aumento estatisticamente significativo nos índices de precipitação em Cornélio Procópio ao longo das décadas, com médias de 1.061 mm, 1.242 mm e 1.645 mm, respectivamente. Em contrapartida, em Castro foi constatada uma redução expressiva nos mesmos períodos, com médias de 2.490 mm, 1.847 mm e 1.742 mm.

Além disso, extremos pluviométricos foram identificados ao longo do período estudado (gráfico 1), por exemplo, precipitação superiores a 2.200 mm/ano foram registrados em 2015 nas estações de Cornélio Procópio, Londrina e Telêmaco Borba, enquanto os menores índices, inferiores a 1.200 mm/ano, ocorreram em 1988 em Cornélio Procópio, 2008 em Londrina e 2006 nas estações de Telêmaco Borba e Castro. Por fim, a análise revelou uma dispersão considerável nos índices pluviométricos tanto espacial quanto temporalmente, demonstrando que a distribuição das chuvas ocorreu de forma heterogênea (Gráfico 1 e Tabela 2).

Gráfico 1 – Hidrogramas e hietogramas (1986 a 2016)



Fonte: Elaboração própria.
Nota: A) Cornélio Procópio; B) Londrina; C) Telêmaco Borba; D) Castro; E) Ponta Grossa.

De modo geral, não foi identificado uma tendência positiva ou negativa na precipitação nesse intervalo temporal, mas sim uma variação espacial que pode ser influenciado por aspectos climáticos e geográficos globais ou regionais. A região sul brasileira localiza-se em uma área favorável à atuação de fenômenos meteorológicos (REBOITA *et al.,* 2010). Na escala global, observam-se as influências dos padrões de teleconexão, como o El Niño Oscilação Sul - ENOS, Oscilação de Madden e Julian – OMJ, Oscilação Decenal do Pacífico – ODP, que por sua vez influenciam na Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS, um dos principais sistemas meteorológicos que atuam no centro da Bacia do Rio Paraná (AMADO; PROCHNOW; ELTZ, 2002; ARSEGO *et al*., 2020; DOYLE; BARROS, 2011; ELY, 2019; RAFEE *et al*., 2020; SALTON; MORAIS; LOHMANN, 2021; ROCHA; SANTOS, 2022). Além disso, mudanças regionais, como o uso e ocupação do solo, podem intensificar ou atenuar as respostas pluviométricas de uma determinada localidade, e quando associadas ao padrão de ocupação urbana e agrícola, podem ocasionar danos e prejuízos (BARBOSA *et al.,* 2016; RUDKE *et al*., 2022).

Ao comparar os picos no hietograma e hidrograma presentes na Gráfico 1, é possível verificar que os valores médios anuais da vazão acompanham o padrão do comportamento pluviométrico. No entanto, há momentos em que a precipitação total não se correlaciona com o aumento proporcional na vazão. Especificamente em Londrina (Gráfico 1B), nos anos de 2009 e 2015, em que a precipitação total foi acima da média (1669,3 mm/ano) e não foi notado o pico correspondente na vazão. E apesar de apresentar uma tendência negativa na precipitação, foi constatado um incremento da vazão em quase 0,7% ou 17,68 m³/s/ano em Londrina (Tabela 2). Embora a inclinação da vazão em Telêmaco Borba tenha apresentado um valor positivo (3,62 m³/s/ano), essa tendência não foi estatisticamente significativa, indicando que a vazão permaneceu relativamente estável ao longo do período analisado. Em contraste, Castro evidenciou uma mudança no comportamento hidrológico a partir de 1995. Nesse intervalo, os picos de vazão, que anteriormente não excediam os valores correspondentes de precipitação, passaram a apresentar magnitudes superiores, tendência que se manteve até 2016 (Gráfico 1D).

Tabela 2 - Precipitação, vazão média e tendências anuais (1986 a 2016)

Estação	Precipitação (mm)	Vazão (m³/s)
Cornélio Procópio (A)	1.308,2 (+26,7) **	195,9 (+1,4)
Londrina (B)	1.669,3 (-2,4)	4.719,2 (+31,9)
Telêmaco Borba (C)	1.637,8 (+0,8)	3.381,3 (+13,7)
Castro (D)	1.994,9 (-30,5) *	448,5 (+5,5)
Ponta Grossa (E)	1.655,6 (+12,2)	1.179,6 (-1,5)

Fonte: Elaboração própria.
Nota: Valores em parênteses correspondem ao valor de Sen's slope ao longo do período de 31 anos; * valores significativos a 0,001 de significância estatística (p-value); ** valores significativos a < 0,0001 de significância estatística.

A relação entre chuva e vazão fornece informações fundamentais sobre as características específicas da resposta hidrológica de uma bacia. Essa relação é influenciada por processos como evaporação, infiltração e fluxo subterrâneo, destacando a importância de compreender essas interações complexas por meio de estudos locais que considerem as variações espaciais e temporais dos processos hidrológicos (SAYD; YONNANA; MUBI, 2020). Quando os picos de vazão apresentam uma correspondência direta com os de precipitação, observa-se uma resposta rápida da bacia às chuvas, caracterizada por um aumento do escoamento superficial. Esse comportamento é frequentemente observado em áreas urbanizadas, onde solos menos permeáveis, cobertura vegetal reduzida e infraestrutura inadequada limitam a infiltração (DU *et al*., 2019; WILSON *et al.,* 2022).

Por outro lado, valores máximos de vazão superiores aos de precipitação podem sinalizar um efeito acumulativo de chuvas anteriores ou indicar que a contribuição do fluxo de base está se tornando mais significativa, especialmente nos períodos de baixa precipitação, o que pode resultar na perda de uma parte significativa da precipitação que poderia ter percolado (SAYD; YONNANA; MUBI, 2020). Conforme observado na Gráfico 1D, Sayd; Yonnana; Mubi (2020) identificaram uma característica semelhante na Bacia do Rio Kilange, associando-a a mudanças no padrão de precipitação e vazão, o que indicaria uma diminuição dos recursos hídricos locais. Embora tenha sido constatada uma tendência negativa na precipitação, Doyle e Barros (2011) atribuíram o aumento no regime de vazão da Bacia do Alto Paraná à redução da cobertura vegetal original, combinada com a compactação do solo decorrente do uso intensivo de maquinário agrícola.

Já a ocorrência de máximos de precipitação superiores aos de vazão, aponta para uma bacia hidrográfica de maior capacidade de infiltração, típica de áreas com solos permeáveis ou vegetação densa, onde a precipitação é absorvida e armazenada, restringindo o escoamento superficial (KAN; CHENG; HOU, 2020; SOOMRO *et al*., 2021). De modo geral, fatores como infiltração, evapotranspiração, mudanças no uso e cobertura do solo, características edáficas e geológicas podem influenciar a capacidade da bacia hidrográfica de responder aos eventos de precipitação. Dessa forma, é essencial considerar todos estes fatores em estudos de previsão eventos hidrológicos extremos (DOUGHERTY; MORRISON; RASMUSSEN, 2021; SAYD; YONNANA; MUBI, 2020).

Dougherty; Morrison; Rasmussen (2021) ao utilizarem dados de alta resolução de chuva e vazão de duas bacias hidrográficas distintas dos EUA, identificaram a relação complexa entre chuva-vazão durante as inundações e enchentes são altamente variáveis, espacialmente em escala de sub-bacia. Os autores enfatizaram ainda a importância de compreender as características físicas da bacia na conversão da chuva em vazão nas águas superficiais.

A constante de recessão (k) foi determinada a partir do método de Maillet, crucial para estimar o comportamento anual da restituição percentual relativa (Rh) e reserva reguladora (Rr). Na Tabela 3 estão descritos os valores da constante de recessão anual para cada ponto estudado, no qual revela variação temporal e espacial, sendo Ponta Grossa apresentando valores médios acima dos demais pontos (k = 0,0248) e Cornélio Procópio a menor média (k = 0,0171).

Tabela 3 - Constante de recessão (k) anual dos pontos localizados na BHRT

Ano	Cornélio Procópio	Londrina	Telêmaco Borba	Castro	Ponta Grossa
1986	0,0207	0,0263	0,0261	0,0387	0,0276
1987	0,0163	0,0226	0,0218	0,0158	0,0306
1988	0,0114	0,0197	0,0249	0,0206	0,0236
1989	0,0080	0,0447	0,0217	0,0215	0,0270
1990	0,0165	0,0560	0,0144	0,0145	0,0371
1991	0,0136	0,0280	0,0214	0,0269	0,0252
1992	0,0181	0,0148	0,0428	0,0164	0,0171
1993	0,0101	0,0144	0,0176	0,0341	0,0160
1994	0,0183	0,0217	0,0226	0,0224	0,0234
1995	0,0259	0,0290	0,0286	0,0377	0,0374
1996	0,0105	0,0103	0,0159	0,0141	0,0332
1997	0,0066	0,0213	0,0216	0,0043	0,0172
1998	0,0185	0,0304	0,0158	0,0079	0,0273
1999	0,0306	0,0291	0,0340	0,0152	0,0394
2000	0,0117	0,0185	0,0192	0,0065	0,0238
2001	0,0114	0,0288	0,0321	0,0086	0,0204
2002	0,0242	0,0246	0,0146	0,0167	0,0217
2003	0,0159	0,0180	0,0234	0,0142	0,0179
2004	0,0201	0,0232	0,0251	0,0209	0,0270
2005	0,0225	0,0125	0,0190	0,0211	0,0120
2006	0,0110	0,0095	0,0094	0,0043	0,0172
2007	0,0281	0,0245	0,0225	0,0144	0,0218
2008	0,0156	0,0173	0,0203	0,0092	0,0215
2009	0,0132	0,0186	0,0240	0,0072	0,0197
2010	0,0124	0,0138	0,0151	0,0135	0,0165
2011	0,0128	0,0311	0,0316	0,0077	0,0316
2012	0,0226	0,0348	0,0229	0,0284	0,0335
2013	0,0173	0,0374	0,0237	0,0169	0,0369
2014	0,0225	0,0259	0,0310	0,0275	0,0237
2015	0,0259	0,0245	0,0290	0,0152	0,0174
2016	0,0171	0,0151	0,0306	0,0269	0,0256

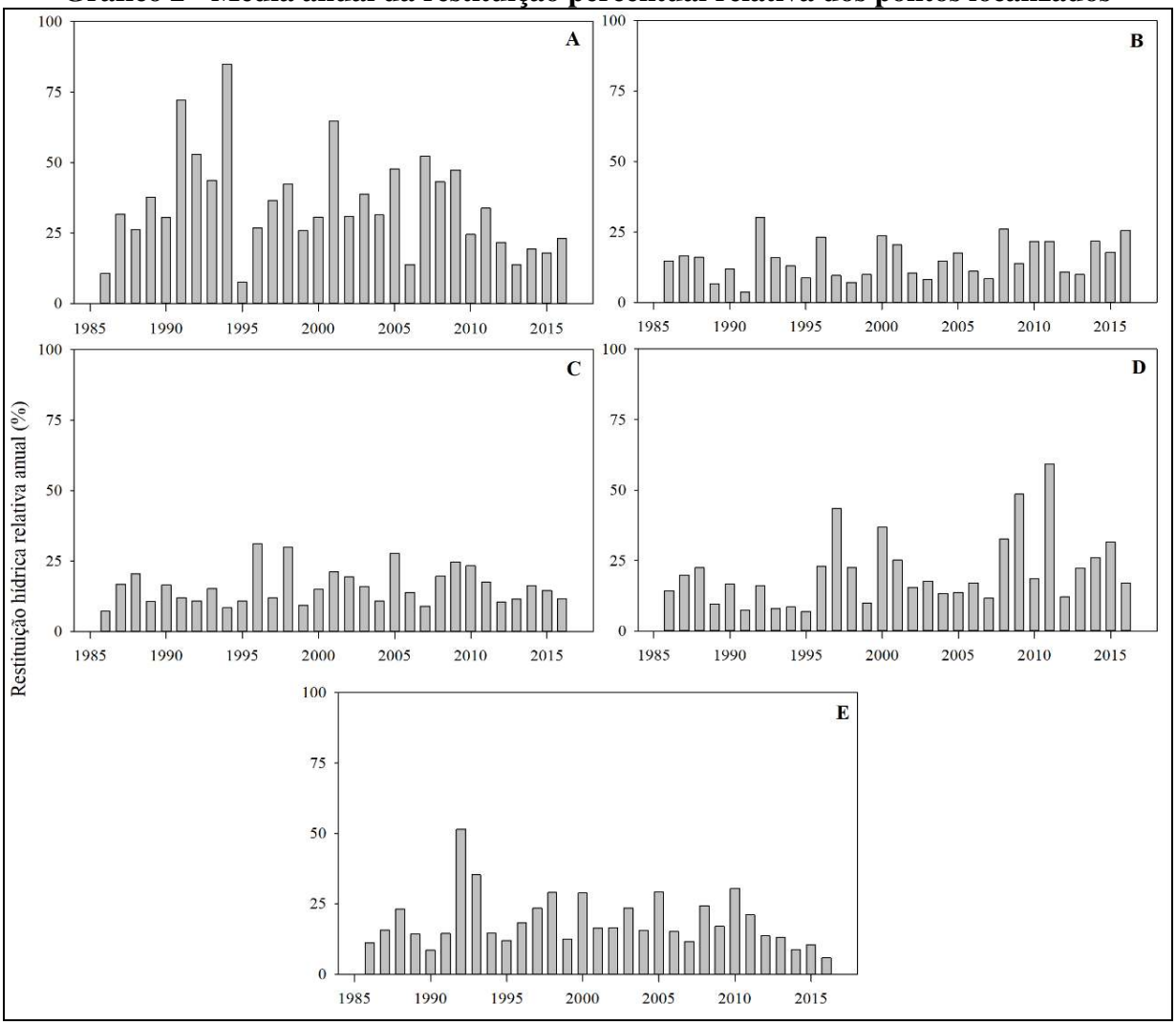
Fonte: Elaboração própria.

No presente estudo, o comportamento aleatório da restituição percentual relativa (Rh) ficou evidente ao longo da série de 31 anos de dados (Gráfico 2). Esse comportamento pode ser explicado pela dependência da Rh tanto da vazão inicial de recessão quanto da precipitação acumulada ao longo do período. Em Cornélio Procópio, os valores extremos ocorreram em 1994 e 1995, com um valor máximo de 80% e um mínimo de 10%, respectivamente. Já em Londrina, o pico ocorreu em 1992 (30,1%) e o valor mínimo em 1991 (3,7%). O maior valor foi registrado em 2011 (59,3%) e o menor foi em 1995 (6,9%) no município de Telêmaco Borba. Em Castro, o máximo foi de 31,1% em 1996 e o mínimo de 7,4% em 1986. Por fim, em Ponta Grossa, observou-se o maior valor em 1992 (51,5%) e o menor em 2016 (5,8%).

A maior Rh observada em Cornélio Procópio pode ser explicada por sua menor área de drenagem (~1,1 mil km²) em comparação aos outros pontos analisados. Essa variável exerce influência

significativa nos valores de Rh, uma vez que áreas de drenagem maiores requerem volumes mais elevados de precipitação acumulada para alcançar níveis similares de restituição hídrica. As áreas de drenagem das outras localidades são: Londrina, com 19 mil km²; Telêmaco Borba, com 13,8 mil km²; Castro, com 1,6 mil km²; e Ponta Grossa, com 4,5 mil km². Assim, confirma-se que, quanto maior a área de drenagem, maior é o volume de precipitação necessário para atingir níveis equivalentes de Rh.

Gráfico 2 - Média anual da restituição percentual relativa dos pontos localizados



Fonte: Elaboração própria.
Nota: A) Cornélio Procópio; B) Londrina; C) Telêmaco Borba; D) Castro; e, E) Ponta Grossa.

A análise da restituição hídrica relativa (Rh) ao longo das três décadas revelou variações significativas. Entre 1995 e 2005, foram observados os maiores valores de Rh (%) nos municípios de Telêmaco Borba e Ponta Grossa (Gráfico 2C e 2E). Em Castro, a Rh apresentou um aumento notável entre as duas primeiras décadas da série temporal, com uma média de 12,9% entre 1986 e 1995, que se elevou para 19,1% entre 1996 e 2005 (Gráfico 2D). Entretanto, em quase todos os pontos estudados,

exceto no município de Londrina, detectou-se uma leve tendência de redução na Rh a partir de 2010. Essa diminuição foi particularmente acentuada em Ponta Grossa, onde houve uma redução média de quase 5% ao ano no período analisado (Gráfico 2E).

Londrina destacou-se ao registrar a menor média de Rh ao longo de toda a série, com 15,2%, em comparação aos demais municípios. Por outro lado, Cornélio Procópio apresentou a maior média de Rh (35%), embora tenha sofrido uma redução progressiva ao longo das três décadas analisadas, com médias de 39,8% na primeira década, 37,6% na segunda e 28,3% na última (Gráfico 2A).

A queda na restituição hídrica relativa a partir de 2010 na maior parte das estações pode ser atribuída a uma série de fatores que influenciam na interação entre as águas superficiais e subterrâneas. Nos últimos anos, várias regiões do mundo têm experimentado mudanças nos padrões de precipitação, temperatura e evapotranspiração (ZHAO *et al*., 2022; LIU *et al*., 2022). A partir da análise multivariada, Tan; Liu; Tan (2020) revelou que o fluxo de base, foi altamente sensível à precipitação e ao armazenamento de água terrestre, respondendo por 64,8% e 20,2% de suas variações, consecutivamente. Além disto, a evapotranspiração, o índice de umidade – HI e o índice de vegetação - NDVI, apresentaram efeitos variados no escoamento de base. Este estudo foi realizado com base dados de mais de 2000 estações em todo o globo e explica como as mudanças na vegetação e no clima podem influenciar na gestão de águas subterrâneas.

O ciclo hidrológico tem sido impactado em nível mundial pelos efeitos combinados das intervenções humanas e das mudanças climáticas (KUANG *et al*., 2024). Estes eventos impactam diretamente a recarga natural das águas subterrâneas, pois a maior frequência de períodos de estiagem, combinada com o aumento de eventos de chuvas intensas, reduz a infiltração e a percolação no solo, favorecendo o escoamento superficial e limitando a recarga subterrânea (ONU, 2022). Esses efeitos são agravados principalmente quando há redução das áreas de vegetação nativa e arbustiva, que vêm sendo substituídas por uso agrícola, urbano e pastagem, conforme observado na Bacia do Alto Paraná (RUDKE *et al*., 2022). Entre 1985 e 2015, a classe de uso da terra urbano cresceu significativamente nessa bacia, especialmente na BHRT, com acréscimo de ~120 km², impulsionada pelo intenso crescimento populacional (RUDKE *et al*., 2022). Essa transformação do uso da terra reduz a capacidade de absorção e retenção de água pelo solo, aumentando o escoamento superficial e diminuindo a percolação para a recarga dos aquíferos.

Estudos como o de Mammadova; Negri (2024); Miguez (2023); Saini; Sharma; Kumar (2024) mostram que a superexploração dos aquíferos para abastecimento urbano e agrícola impacta o fluxo de base dos rios, comprometendo a disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos subterrâneos e reduzindo a capacidade de armazenamento dos aquíferos. Todos estes fatores supramencionados

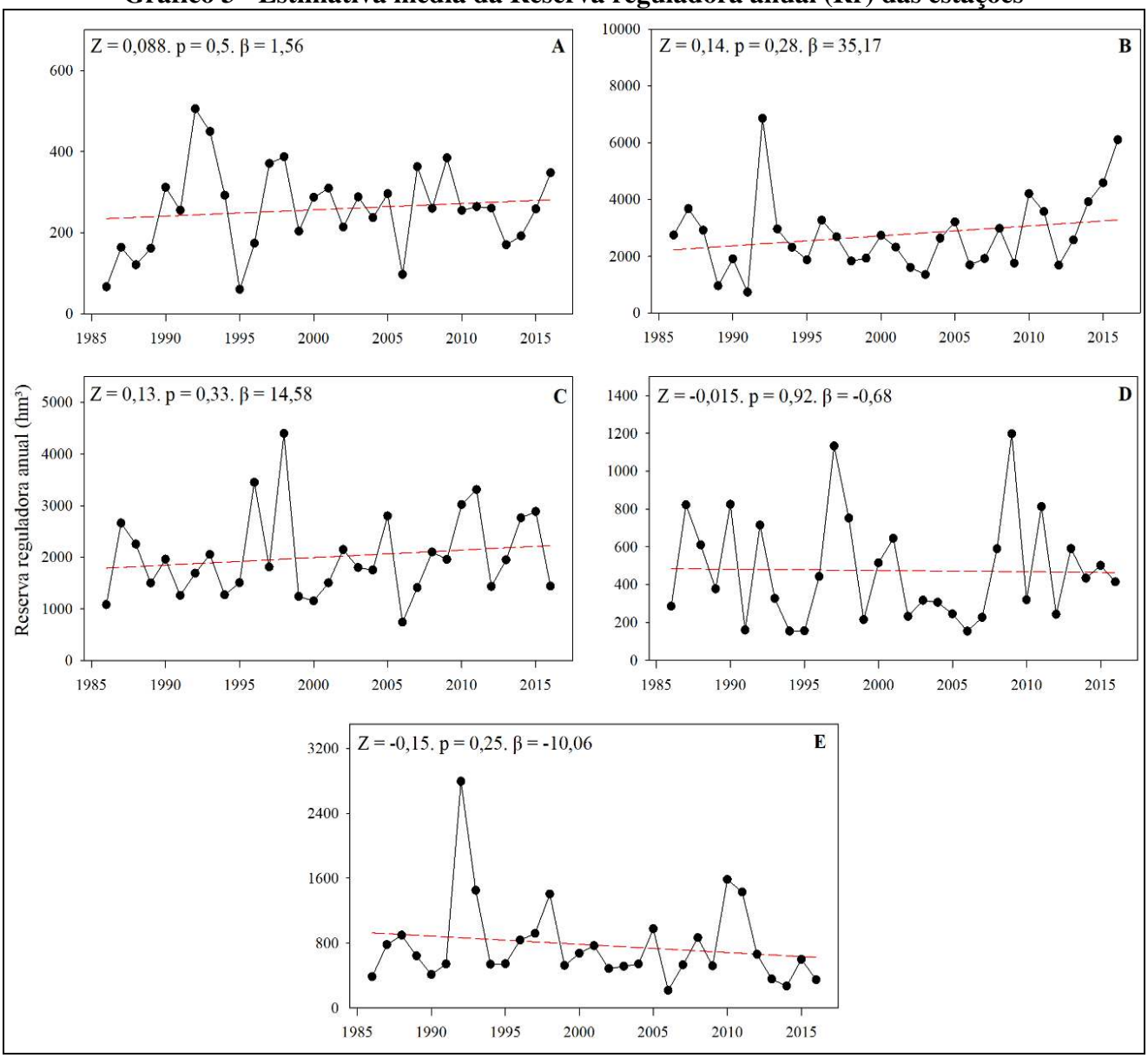
intensificam a vulnerabilidade hídrica da região, devido à menor recarga natural das águas subterrâneas, fundamental para a manutenção dos recursos hídricos.

A restituição percentual relativa (Rh) refere-se à proporção da precipitação que efetivamente contribui para a geração de vazão, seja ela superficial, subsuperficial ou subterrânea, após as perdas por evapotranspiração e retenção no solo. Esse indicador é fundamental para avaliar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, fornecendo informações sobre a eficiência do sistema em converter precipitação em escoamento. Em contextos relacionados à recarga de aquíferos, a Rh também pode ser interpretada como a fração da precipitação anual que contribui para o reabastecimento das reservas subterrâneas (PETERLINI; PINESE; CELLIGOI, 2019).

Anos com maiores médias de precipitação e vazão tendem a apresentar índices mais elevados de Rh, uma vez que o aumento na precipitação favorece a percolação da água no solo e, consequentemente, a reposição do sistema aquífero. Contudo, diversos fatores podem reduzir a eficiência desse processo, interferindo negativamente na percolação e, por extensão, na restituição percentual relativa. Entre esses fatores, destacam-se características físicas da bacia, como o uso e ocupação do solo, compactação do solo, cobertura vegetal reduzida e alterações climáticas que afetam a distribuição e intensidade das chuvas.

O comportamento anual da Reserva reguladora (Rr) em Cornélio Procópio, Londrina, Telêmaco Borba demonstrou um leve aumento no intervalo analisado (Gráfico 3). Ainda que o aumento observado da Rr possa sinalizar uma possível recuperação ou estabilidade das reservas, as tendências não apresentaram significância estatística. Em contraste, apenas a precipitação em Cornélio Procópio apresentou uma tendência de aumento estatisticamente significativa (+27,32 mm/ano, < 0,0001) no decorrer das três décadas (Tabela 2). Quanto a Castro e Ponta Grossa, foi identificado uma leve inclinação negativa, com valores de -0,68 hm³/ano em Castro, e -10,06 hm³/ano em Ponta Grossa. Porém, assim como nas outras estações, esses resultados não foram estatisticamente significativos (Gráfico 3). Nas estações localizadas em Londrina e Telêmaco Borba, os anos com maior valor de Rr correspondeu aos anos de precipitação acima da média. Cabe destacar que, em 1998, ano de maior vazão em Telêmaco Borba, também foi demonstrado uma relação mais evidente entre estes dois componentes hidrológicos, compreendendo tanto altas vazões quanto altos valores de Rr.

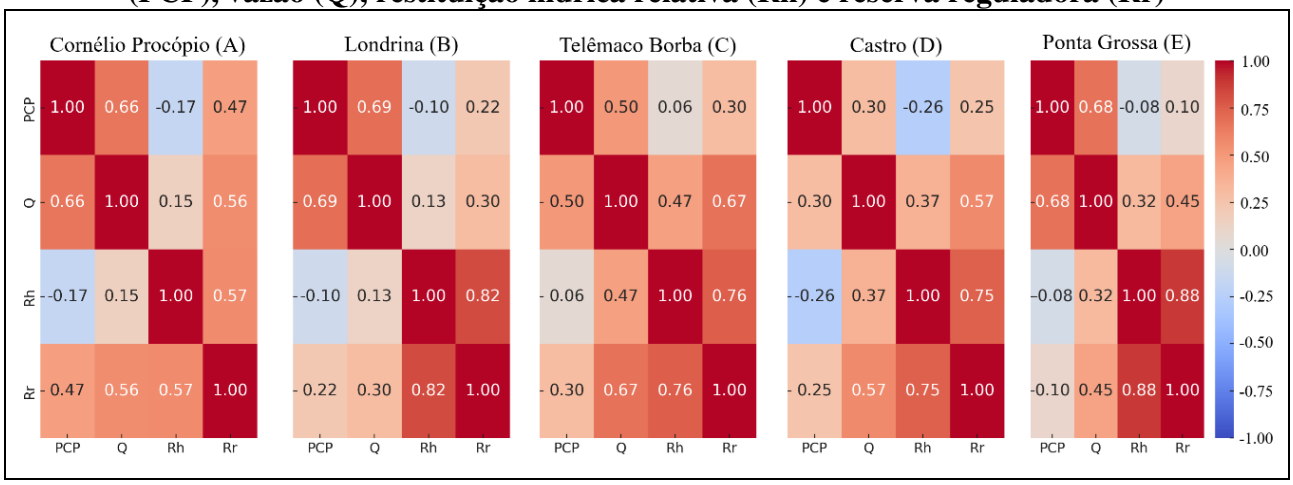
Gráfico 3 - Estimativa média da Reserva reguladora anual (Rr) das estações



Fonte: Elaboração própria.
Nota: A) Cornélio Procópio; B) Londrina; C) Telêmaco Borba; D) Castro; e, E) Ponta Grossa.

De acordo com o gráfico 4, a partir da análise de correlação, foi observado que a Rh apresenta uma forte correlação com a Rr na maioria dos municípios, sobretudo em Londrina (0,82) e Ponta Grossa (0,88). Por outro lado, a análise da relação entre Rh e a P em Castro (-0,26) e Cornélio Procópio (-0,17), foram baixas e negativas, sugerindo que há influência de outros fatores na interação entre as águas superficiais e subterrâneas, e que nem sempre a precipitação de forma isolada coopera diretamente para o aquífero. No entanto, em Castro, onde foi observada uma tendência negativa da precipitação (Tabela 2), pode indicar que a capacidade de recarga do aquífero foi impactada por essa redução pluviométrica.

Gráfico 4 - Matrizes de Correlação entre a precipitação (PCP), vazão (Q), restituição hídrica relativa (Rh) e reserva reguladora (Rr)



Fonte: Elaboração própria.
Nota: A) Cornélio Procópio; B) Londrina; C) Telêmaco Borba; D) Castro; e, E) Ponta Grossa.

Apesar da fraca relação linear entre a PCP e a Rh, seu valor negativo mostra que, em anos com maior precipitação, parte da água precipitada não contribuiu para recarga do aquífero (Gráfico 4). Dessa forma, em maior proporção, possivelmente ocorreu maiores taxas de evapotranspiração, escoamento superficial e consequentemente, menor infiltração no solo. Silva *et al*. (2023) discutem como as áreas urbanizadas e impermeabilizadas tendem a interferir nas áreas de recarga aquífera, pois a cobertura impermeável reduz a infiltração e aumenta o escoamento superficial, o que impacta sem sua recarga. Fatores adicionais como as características edáficas, o uso e ocupação do solo e condições meteorológicas pontuais podem influenciar no escoamento superficial e percolação, o que pode limitar a recarga do aquífero (PETERLINI; PINESE; CELLIGOI, 2019; ALVES *et al.,* 2024).

Adicionalmente, embora fraca, a correlação entre a Rh e Q em Telêmaco Borba (0,47) e Londrina (0,13), indicou que a vazão também exerce influência sobre a restituição hídrica, especialmente em momentos em que o fluxo de base se torna predominante em períodos de baixa precipitação. Em Telêmaco Borba, por exemplo, os valores de Rh mais elevados ocorreram entre 1995 e 2005, período em que a vazão superou seus valores médios, mesmo diante da sutil inclinação negativa na precipitação (Figura 3C e 4C).

CONCLUSÃO

A análise da interação entre águas superficiais e subterrâneas contribuiu para entender a dinâmica hídrica da Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi. Isso se deu por meio da avaliação na relação

chuva-vazão, a qual forneceu informações relevantes sobre a resposta hidrológica da bacia. Nossos resultados apontam para uma complexa interação entre fatores hidrológicos locais – como a infiltração e o fluxo de base – bem como as condições meteorológicas, pois estas características modulam a resposta da bacia aos eventos de precipitação.

Foi constatado que, apesar dos valores médios anuais de vazão acompanharem o comportamento pluviométrico em alguns anos e em certos pontos observados, essa relação não é constante. Em alguns períodos, os valores de vazão foram superiores aos de precipitação, possivelmente devido ao efeito acumulativo de chuvas anteriores, ao aumento do fluxo de base, ou às alterações no uso da terra, com a impermeabilização e compactação do solo, que podem influenciar a infiltração e o escoamento superficial. Em outros momentos, os valores de vazão foram inferiores aos de precipitação, indicando que parte da água precipitada não contribuiu diretamente para o escoamento superficial, mas foi absorvida e armazenada pelo solo, o que pode ser relacionado à intensidade das chuvas, ao aumento da temperatura do ar e até mesmo à maior evapotranspiração.

Além disso, utilizou-se o método de análise de recessão para estimar a restituição hídrica relativa (Rh) e a reserva reguladora anual (Rr), visando caracterizar a dinâmica hídrica subterrânea da BHRT e identificar os fatores influenciam na sua variabilidade. Os resultados revelaram que, embora a Rh apresente variações significativas ao longo dos anos e entre diferentes pontos da bacia, não foi identificada uma tendência estatisticamente significativa de aumento ou diminuição sustentada em seus valores. Em alguns pontos, anos de alta precipitação coincidiram com elevações na Rr, sugerindo que as condições pluviométricas influenciaram na recarga dos aquíferos, especialmente em áreas com menor impermeabilização. Por outro lado, verificou-se que em determinadas regiões uma parte da precipitação não contribui para a recarga, sendo direcionada ao escoamento superficial

Embora o método de análise de recessão seja recomendado por diversos autores por auxiliar na estimativa do armazenamento hídrico subterrâneo de uma bacia hidrográfica, algumas limitações foram observadas. A ausência de fatores que afetam a Rh e a Rr, como dados sobre as características do solo, o uso e cobertura da terra e variáveis climáticas específicas, pode influenciar a capacidade da bacia de responder aos eventos de precipitação.

Recomenda-se que futuras pesquisas explorem esses aspectos e considerem outras variáveis além da vazão e precipitação: uso e características do solo; temperatura e evapotranspiração; inclusão de mais pontos de observação (estações meteorológicas e pluviométricas), dado o tamanho da bacia; dados inerentes as unidades aquíferas (registro e quantidade de poços, demanda hídrica e tipo de utilização). Além disso, se faz necessária a adoção de práticas de manejo e conservação do solo, como a manutenção da vegetação nativa em áreas de recarga, a redução da compactação do solo em áreas

agrícolas e o incentivo ao uso de sistemas agroflorestais, silvipastoris, rotação de cultura e o uso de cobertura morta no solo, os quais favorecem a infiltração da água e reduzem o escoamento superficial.

No contexto urbano, é essencial a implementação de soluções que considerem a impermeabilização excessiva, como pavimentação permeável, jardins de chuva e sistemas de captação de água pluvial. Assim, é essencial a existência, continuidade e eficácia de políticas de manejo sustentável para as áreas de recarga, considerando o avanço da urbanização e a expansão agrícola na BHRT. As áreas urbanizadas e impermeabilizadas apresentam desafios adicionais para a recarga dos aquíferos, sendo essenciais estratégias que conciliem o desenvolvimento com a preservação da capacidade de infiltração do solo.

Para viabilizar estudos é importante que exista acesso público e gratuito a dados fluviométricos e pluviométricos e, que tais registros sejam contínuos e atualizados, incluindo séries temporais mais recentes, para avaliar o impacto das alterações no uso da terra e dos efeitos das mudanças climáticas sobre a recarga aquífera. A continuidade das pesquisas neste campo é fundamental para garantir a sustentabilidade hídrica e o desenvolvimento econômico da região, especialmente diante dos cenários climáticos futuros.

REFERÊNCIAS

ABDIN, E. C. *et al*. “Reliability of spring recession curve analysis as a function of the temporal resolution of the monitoring dataset”. **Environmental Earth Sciences**, vol. 80, 2021.

ALVARES, C. A. *et al*. “Köppen’s climate classification map for Brazil”. **Meteorologische Zeitschrift**, vol. 22, n. 6, 2013.

ALVES, R. A. *et al*. “Flood vulnerability mapping in an urban area with high levels of impermeable coverage in southern Brazil”. **Regional Environmental Change**, vol. 24, 2024.

AMADO, T. J. C.; PROCHNOW, D.; ELTZ, F. L. F. “Perdas de solo e água em períodos de anomalias climáticas: “El Niño” e “La Niña” no sul do Brasil”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 26, n. 3, 2002.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas Irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 23/03/2025.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura Recursos Hídricos no Brasil 2017**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 23/03/2025.

ARSEGO, D. A. *et al*. “Climatic index associated with the interannual variability of rice yield in Rio Grande do Sul”. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 35, n. 2, 2020.

BARBOSA, V. V. *et al*. “Análise da variabilidade climática do município de Garanhuns, Pernambuco – Brasil”. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 9, n. 2, 2016.

BATISTEL, L.; GRISON, F.; MOTA, A. "Relação entre coeficiente de recessão e índice de precipitação antecedente em bacias embutidas". **Revista de Gestão de Água da América Latina**, vol. 15, n. 1, 2018

BLOOMFIELD, J. P.; ALLEN, D. J.; GRIFFITHS, K. J. "Examining geological controls on baseflow index (BFI) using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK". **Journal of Hydrology**, vol. 373, n. 1, 2009.

CARLOTTO, T. *et al*. "Análise de curva mestra de recessão de uma bacia de mata atlântica na Lagoa do Peri, Florianópolis – SC". **Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu: UFPR, 2019.

DEWANDEL, B. *et al*. "Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer". **Journal of Hydrology**, vol. 274, 2003.

DOUGHERTY, E.; MORRISON, R.; RASMUSSEN, K. "High-resolution flood precipitation and streamflow relationships in two US river basins". **Meteorological Applications**, vol. 28, n. 2, 2021.

DOYLE, M. E.; BARROS, V. R. "Attribution of the river flow growth in the Plata Basin". **International Journal of Climatology**, vol. 31, n. 15, 2011.

DU, J. *et al*. "Different Flooding Behaviors Due to Varied Urbanization Levels within River Basin: A Case Study from the Xiang River Basin, China". **International Journal of Disaster Risk Science**, vol. 10, n. 1, 2019.

ELY, D. F. "Padrões espaciais das tendências das precipitações sazonais e mensais no estado do Paraná – Brasil". **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 25, 2019.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1988.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

HIRATA, R. C. A.; ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. "Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial". *In*: BICUDO, T.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (orgs.). **Águas do Brasil**: análises estratégicas. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010.

IAT – Instituto Água e Terra. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi**. Curitiba: IAT, 2020. Disponível em: <www.iat.pr.gov.br>. Acesso em: 23/04/2025.

IAT – Instituto Água e Terra. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Curitiba: IAT, 2025. Disponível em: <www.iat.pr.gov.br>. Acesso em: 23/04/2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. "Primeiros Resultados de População do Censo Demográfico 2022". **IBGE** [2022]. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 24/04/2025.

KAN, X.; CHENG, J.; HOU, F. "Response of preferential soil flow to different infiltration rates and vegetation types in the Karst region of Southwest China". **Water**, vol. 12, n. 6, 2020.

KUANG, X. *et al*. "The changing nature of groundwater in the global water cycle". **Science**, vol. 383, n. 6686, 2024.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia Científica**. São Paulo: Editora Atlas, 2008.

LIU, Y. *et al*. "The divergence between potential and actual evapotranspiration: An insight from climate, water, and vegetation change". **Science of The Total Environment**, vol. 807, 2022.

MAILLET, E. **Essais d'hydraulique fluviale**. Paris: Herman, 1905.

MAMMADOVA, L.; NEGRI, S. "Understanding the impacts of overexploitation on the Salento aquifer: A Comprehensive review through well data analysis". **Sustainable Futures**, vol. 7, 2024.

MANCHUR, J. **Elaboração do *Storymaps* para divulgação de dados da Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi** (Dissertação de Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos). Campo Mourão: UTFPR, 2023.

MAY, W.; VOSS, R.; ROECKNER, E. "Changes in the mean and extremes of the hydrological cycle in Europe under enhanced greenhouse gas conditions in a global time-slice experiment". *In*: BENISTON, M. (org.). **Climatic change**: implications for the hydrological cycle and for water management. Fribourg: Kluwer Academic Publishers, 2003.

MIGUEZ, P. H. G. **Desenvolvimento de um sistema para integração e disponibilização de dados de águas subterrâneas** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental). Londrina: UTFPR, 2023.

MILLER, M. P. *et al.* "The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin". **Water Resources Research**, n. 52, 2016.

MUÑOZ-VILLERS, L. E.; MCDONNELL, J. J. "Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region". **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 17, 2013.

NASCIMENTO, M. T. *et al*. "Estudo de hidrogramas do baixo curso do rio paraíba do sul para avaliação da contribuição hídrica subterrânea". **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis: UFSC, 2017.

ONU. **Groundwater**: Making the invisible visible. Paris: UNESCO, 2022. Disponível em: <www.onu.org>. Acesso em: 23/03/2025.

PETERLINI, G.; PINESE, J. P. P.; CELLIGOI, A. "Utilização do método de curvas de recessão na avaliação de reservas reguladoras de aquíferos: uma ferramenta de planejamento urbano ambiental". **Geografia em Atos**, vol. 2, n. 9, 2019.

PRĂVĂLIE, R. *et al*. "Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961–2013". **Catena**, vol. 172, 2019.

RAFEE, S. A. A. *et al*. "Spatial trends of extreme precipitation events in the Paraná river basin". **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, vol. 59, n. 3, 2020.

REBOITA, M. S. *et al*. "Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica". **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 25, n. 2, 2010.

REBOUÇAS, A. C. "Importância da água subterrânea". *In*: REBOUÇAS, A. C. *et al.* (orgs.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

RICHARDSON, C. M. *et al.* "Geologic Controls on Source Water Drive Baseflow Generation and Carbon Geochemistry: Evidence of Nonstationary Baseflow Sources Across Multiple Subwatersheds". **Water Resources Research**, vol. 56, n. 7, 2020.

ROCHA, A. K. P.; SANTOS, M. M. "Distribuição pluviométrica do município de Londrina/PR: análise do comportamento, balanço hídrico, probabilidade e tempo de retorno". **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 15, n. 6, 2022.

ROSA FILHO, E. F. *et al.* **As águas subterrâneas no Estado do Paraná**. Curitiba: Maxi Gráfica e Editora Ltda, 2010.

ROSA, A. M. R.; GUARDA, V. L. M. "Gestão de recursos hídricos no Brasil: um histórico". **Direito Ambiental e Sociedade**, vol. 9, n. 2, 2019.

ROWIECHI, J. *et al*. "Governança represada: assimetria de poder e resistência no Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi". **Interações**, vol. 24, n. 2, 2023.

RUDKE, A. P. *et al*. "Landscape changes over 30 years of intense economic activity in the upper Paraná River basin". **Ecological Informatics**, vol. 72, 2022.

SAINI, L.; SHARMA, K.; KUMAR, P. "Water efficiency in agriculture as a vital approach toward water management in rural areas". *In*: MADHAY, S. *et al*. **Water Resources Management for Rural Development**: challenges and mitigation. Cambridge: Elsevier, 2024.

SALTON, F. G.; MORAIS, H.; LOHMANN, M. "Dry periods in the state of Paraná, Brazil". **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 36, n. 2, 2021.

SANTOS, M. M.; CELLIGOI, A. "Utilização da metodologia de análise da curva de recessão para o cálculo das reservas reguladoras do aqüífero Caiuá na sub-bacia do Rio dos Índios-PR". **Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.** Florianópolis: ABRHidro, 2002.

SANTOS, M. M.; ROCHA, D. A.; TISSIANO, G. M. "Estudo sobre a variação histórica das reservas reguladoras aquíferas em zona de afloramento do sistema aquífero guarani (SAG) no estado de São Paulo". *In*: ANTONELLO, I. T. *et al*. (org.). **Interfaces socioespaciais e geoambientais**. Londrina: Editora da UEL, 2021.

SAYD, D.; YONNANA, E.; MUBI, A. "An Analysis of Rainfall and Discharge Relationship at the River Kilange Catchment, Adamawa State, Nigeria". **Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences**, vol. 11, n. 4, 2020.

SCHUCH, C. *et al*. "Overexploitation Assessment in an Urban Karst Aquifer: the case of Sete Lagoas (MG), Brazil". **Social Science Research Network**, vol. 88, 2023.

SEAB - Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Paraná. **Produção agrícola do estado do Paraná em 2021**. Curitiba: SEAB, 2022. Disponível em: <www.agricultura.pr.gov.br>. Acesso em: 23/04/2025.

SHUBO, T.; FERNANDES, L.; MONTENEGRO, S. G. "An overview of managed aquifer recharge in Brazil". **Water**, vol. 12, n. 4, 2020.

SILVA, H. V. *et al*. "A competência do município na gestão das águas subterrâneas e a contribuição da hidrogeologia urbana". **Revista UNG – Geociências**, vol. 22, n. 2, 2023.

SILVA, R. F. G.; BACELLAR, L. A. P.; FERNANDES, K. N. "Estimativa de parâmetros de aquíferos através do coeficiente de recessão em áreas de embasamento cristalino de Minas Gerais". **Rem: Revista Escola de Minas**, vol. 63, n. 3, 2010.

SIMON, F. W. *et al*. "Estimativa de recarga do sistema aquífero guarani por meio da aplicação do método da variação da superfície livre na bacia do Rio Ibicuí-RS". **Águas Subterrâneas**, vol. 31, n. 2, 2017.

SINGH, A. A.; SINGH, A. K. "Climatic controls on water resources and its management: challenges and prospects of sustainable development in Indian perspective". *In*: THOKCHOM, B. *et al.* (org.). **Water Conservation in the Era of Global Climate Change**. Amsterdam: Elsevier, 2021.

SOOMRO, S. E. *et al*. "Precipitation changes and their relationships with vegetation responses during 1982-2015 in Kunhar River basin, Pakistan". **Water Supply**, vol. 21, n. 7, 2021.

SOUZA, S. A.; REIS, D. S. "Trend Detection in Annual Streamflow Extremes in Brazil". **Water**, vol. 14, n. 11, 2022.

TALLAKSEN, L. "A review of baseflow recession analysis". **Journal of Hydrology**, vol. 165, 1995.

TAN, X.; LIU, B.; TAN, X. "Global Changes in Baseflow Under the Impacts of Changing Climate and Vegetation". **Water Resources Research**, vol. 56, n. 9, 2020.

TUCCI, C. **Hidrologia**. Porto Alegre: Editora ABRH, 2020.

VILLAR, P. C. "Groundwater and the right to water in a context of crisis". **Ambiente e Sociedade**, vol. 19, n. 1, 2016

WILSON, S. *et al*. "Urbanization of grasslands in the Denver area affects streamflow responses to rainfall events". **Hydrological Processes**, vol. 36, n. 10, 2022.

WITTENBERG, H. "Effects of season and man-made changes on baseflow and flow recession: Case studies". **Hydrological Processes**, vol. 17, 2003

YANG, H. *et al*. "Assessment of water level threshold for groundwater restoration and overexploitation remediation the Beijing-Tianjin-Hebei Plain". **Journal of Groundwater Science and Engineering**, vol. 10, n. 2, 2022.

ZHAO, M. *et al*. "Evapotranspiration frequently increases during droughts". **Nature Climate Change**, vol. 12, n. 11, 2022.

ZOBY, J. L. G.; MATOS, B. "Águas subterrâneas no Brasil e sua inserção na Política Nacional de Recursos Hídricos". **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2002.



BOLETIM DE CONJUNTURA (BOCA)

Ano VII | Volume 22 | Nº 65 | Boa Vista|2025

http://www.ioles.com.br/boca

Editor chefe:

Elói Martins Senhoras

Conselho Editorial

Antonio Ozai da Silva, Universidade Estadual de Maringá

Vitor Stuart Gabriel de Pieri, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Charles Pennaforte, Universidade Federal de Pelotas

Elói Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima

Julio Burdman, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Patrícia Nasser de Carvalho, Universidade Federal de Minas Gerais

Conselho Científico

Claudete de Castro Silva Vitte, Universidade Estadual de Campinas

Fabiano de Araújo Moreira, Universidade de São Paulo

Flávia Carolina de Resende Fagundes, Universidade Feevale

Hudson do Vale de Oliveira, Instituto Federal de Roraima

Laodicéia Amorim Weersma, Universidade de Fortaleza

Marcos Antônio Fávaro Martins, Universidade Paulista

Marcos Leandro Mondardo, Universidade Federal da Grande Dourados

Reinaldo Miranda de Sá Teles, Universidade de São Paulo

Rozane Pereira Ignácio, Universidade Estadual de Roraima