

Evapotranspiração potencial (ETp) e sua influência na vazão de rios do Cerrado Brasileiro

Flávio Alves de Sousa

da Universidade Estadual de Goiás – Iporá – Goiás – Brasil
flavio.alves@ueg.br

Derick Martins Borges de Moura

da Universidade Estadual de Goiás – Iporá – Goiás – Brasil
derickmartins@hotmail.com

Resumo: O presente estudo buscou entender a interação da evapotranspiração na vazão dos rios, para isso utilizou-se como parâmetro de análise a evapotranspiração potencial (ETp) e a vazão (Q) no intervalo de tempo de dez anos (2010-2020) em três bacias hidrográficas do estado de Goiás (Bacia do Rio Verde/Verdão; Bacia do Caiapó e Bacia do Paranã). Foram avaliadas as variações da ETp e das vazões dos mananciais dentro do período a fim de buscar as correlações entre estas variáveis. Considerando que o aumento de ETp é resultado do aumento da temperatura (T) e da diminuição da precipitação (P), esta última também foi utilizada nos parâmetros de análise. Foram calculados os índices de correlação entre as variáveis ETp, Q, P e T considerando o ano civil e hidrológico. Dados de vazão foram obtidos de estações fluviométricas diretamente do *site* da Agência Nacional de Águas (ANA) no sistema *HidroWeb*. Informações sobre temperatura, chuvas e evapotranspiração foram obtidos de estações pluviométricas no *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os resultados obtidos apontaram para uma correlação forte entre ETp e Q, mostrando que a primeira influencia significativamente na segunda. Constatou-se ainda que ETp tem aumentado nos últimos dez anos, bem como as vazões nas três bacias apresentaram declínio no mesmo período.

Palavras-chave: balanço hídrico; bacia hidrográfica; precipitação; temperatura; correlação.

Introdução

A água na natureza segue um ciclo impulsionado pela energia solar que representa 99,97% de toda a energia que circula no planeta, todavia a energia proveniente do sol representa apenas a bilionésima parte da energia que se origina no sol, e que chega à Terra em forma de ondas eletromagnéticas, e ainda assim, boa parte dessa energia é refletida de volta ou são absorvidas pelos organismos vivos e pela atmosfera, (MILLER, 2011).

A energia radiante que chega até a superfície a aquece e é transformada em energia de baixa qualidade, como o calor. A energia térmica transforma a água, fazendo com que esta mude seu estado físico conforme variações de temperatura, altitude e latitude, alimentando calotas polares, rios, lagos e águas subterrâneas, além de promover a manutenção de inúmeros ecossistemas (AYOADE, 1986).

No Brasil a água é abundante no estado líquido seja em rios e lagos, oceanos, nos lençóis subterrâneos e nos solos. Dessa maneira a água é muito utilizada nos processos agrícolas, industriais e domésticos, mas este uso excessivo e muitas vezes indiscriminado não considera o processo de manutenção da água no sistema, uma vez que a mesma só interessa se estiver disponível no estado líquido.

Os diversos processos interativos entre a biosfera, a litosfera e a atmosfera são responsáveis pelo equilíbrio do balanço hídrico, e entre estes processos podemos destacar a evapotranspiração, a temperatura e a cobertura vegetal da superfície.

O fenômeno que desencadeia todo o processo de evapotranspiração no planeta é a radiação solar, que apesar de intensa, não chega a atingir em 100% a superfície terrestre. Somente aproximadamente 51% da energia que atinge as camadas mais elevadas da atmosfera chega até a superfície da Terra, o restante é irradiado novamente para o espaço, (SILVA, 2007).

A radiação solar é absorvida por gases componentes da atmosfera como o dióxido de carbono (CO_2), vapor de água e demais gases. A energia que chega até a superfície, proveniente do sol, aquece a superfície e reflete-se novamente para a atmosfera (radiação terrestre), formando o balanço de radiação. Caso a atmosfera apenas absorvesse radiação, estaríamos num constante aquecimento, ou se somente refletisse, estaríamos resfriando, mas isso não ocorre, pois há um balanço entre a energia que chega e a que é refletida dando ao planeta uma temperatura adequada para a manutenção da vida, (MILLER, 2011).

Da energia que chega até a superfície parte é utilizada como geradora de trabalho, e parte é dispersa em forma de calor. A energia solar atinge os corpos hídricos, os vegetais e animais, promovendo a evaporação e liberando calor no ambiente, calor este que compõe a temperatura, numa constante troca de energia entre os corpos, como destacado por Miller (2011). A evapotranspiração exprime a quantidade de água que evapora de todos os corpos e é transmitida para a atmosfera em forma de vapor.

Enquanto a evapotranspiração real representa o volume de vapor de água efetivamente retirado dos corpos, a evapotranspiração potencial representa o potencial evaporativo que a radiação solar seria capaz de fornecer para aquele ambiente, caso houvesse água disponível para tal, (AYOADE, 1986.; CAMARGO; CAMARGO, 2000). A evapotranspiração potencial é, portanto, mais intensa no verão, pois a quantidade de radiação que chega até a superfície é mais vigorosa. Assim a avaliação da evapotranspiração

potencial está diretamente ligada ao grau de insolação em determinado local e pode ser utilizada como parâmetro para avaliar a intensidade da radiação solar de maneira indireta. Ela representa a água evaporada numa determinada unidade de tempo de uma superfície coberta por vegetação de baixo porte e suprida por água (TUCCI, 2000). A evapotranspiração potencial pode ser obtida de maneira indireta através da metodologia do balanço hídrico climatológico como o desenvolvido por (THORNTHWAITTE; MATHER, 1955). Pereira (2005) destaca o processo para elaboração do balanço hídrico climatológico.

Para sua elaboração, há necessidade de se definir o armazenamento máximo no solo (CAD - Capacidade de Água Disponível), e de se ter a medida da chuva total, e também a estimativa da evapotranspiração potencial em cada período. Com essas três informações básicas, o BHC permite deduzir a evapotranspiração real, a deficiência ou o excedente hídrico e o total de água retida no solo em cada período. (PEREIRA, 2005, p. 311).

Conforme Ayoade (1986), a evapotranspiração depende diretamente de fatores como radiação solar, temperatura do ar, velocidade dos ventos e umidade, além de energia para conseguir vaporizar a água. No caso, a energia de vaporização da água pode ser indicada pela temperatura do ar (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2015).

Não havendo necessidade de eficiência nos valores de evapotranspiração potencial, o cálculo do balanço hídrico climatológico poderá ser desenvolvido pela equação de Thornthwaite e Mather (1955), que apresenta em sua equação o modelo de cálculo para a ETp, conforme modelo de Thornthwaite (1948), apresentado em (TOMAZ, 2008).

Segundo Tundisi e Tundisi (2020), a vazão dos mananciais está sujeita a diversas variáveis, entre elas a precipitação, que representa a entrada de água na bacia hidrográfica, e a temperatura que também é um fator importante que pode influenciar a disponibilidade de água, pois controla as taxas de evapotranspiração (TIRIVAROMBO; OSUPILE; ELIASSON, 2018). A vazão de um rio representa o volume de água que escoam por uma determinada seção do canal principal, em um dado período de tempo. Esta seção deve considerar o volume de água dos canais tributários a montante.

[...] há um longo percurso para a água precipitada percorrer até atingir uma determinada seção do rio principal na bacia, além de “intervirem” ao longo desse caminho outras etapas do ciclo hidrológico, como evaporação, transpiração, infiltração, etc. Portanto, o comportamento da vazão ao longo do tempo é o resultado de todos os processos e etapas do ciclo hidrológico que ocorreram na bacia hidrográfica em questão, desde a ocorrência da precipitação até a composição dessa vazão (PAZ, 2004, p. 47).

As bacias hidrográficas apresentam correlações altas entre a evapotranspiração

potencial e as chuvas, conforme o trabalho de Steinke *et al.* (2017) que indica ganhos de evapotranspiração com o aumento das chuvas e perdas com a diminuição das chuvas. Nesse sentido os trabalhos de Sousa (2019) e Moura (2021) mostram através de balanço hídrico climatológico, no município de Iporá (Goiás), que a ETp é sempre maior nos períodos de estiagem, enquanto a mesma se iguala à evapotranspiração real ou permanece igual nos períodos mais chuvosos.

Uma vez que a ETp é maior nos períodos de estiagem pela ausência natural de chuvas significativas no período, é lógico pensar em uma vazão baixa neste mesmo período do ano, pois assim algumas variáveis que impactam diretamente a vazão são impedidas de atuar, como o escoamento superficial e a infiltração subsuperficial. Desta maneira a melhor forma de investigar a correlação entre ETp e vazão é analisar os dois fenômenos durante o período de estiagem. Primeiro porque as demais variáveis que interferem na vazão estão temporariamente inertes, e segundo, porque ETp tende a vaporizar com mais intensidade a água remanescente.

Conhecendo o processo de evapotranspiração e os mecanismos hidrológicos que implicam na vazão de um manancial hídrico, o presente estudo avaliou a variação da ETp durante um período de dez anos (2010-2020) em três bacias hidrográficas do estado de Goiás e fez a correlação desta com a vazão a fim de verificar o comportamento destas variáveis durante o ano civil e hidrológico, que em Goiás este último vai de outubro a setembro.

De acordo com Bezerra *et al.* (2013) as análises de vazão são destinadas mais comumente para determinação de outorgas de água, todavia neste trabalho ela serve ao propósito do planejamento de ações que possam auxiliar na manutenção da água nos sistemas hidrológicos de bacias hidrográficas, principalmente durante os períodos críticos de chuvas, onde as vazões tendem a ser menores. Geralmente as reduções de vazões são atribuídas única e exclusivamente à redução das chuvas, então pensou-se em avaliar também o impacto da ETp neste processo.

Espera-se com o estudo que se pense em atitudes práticas de recuperação/conservação ambiental de bacias hidrográficas, visando a manutenção da água das chuvas por maior tempo na bacia, bem como a utilização de coberturas que diminuam o albedo – que é uma medida da quantidade de radiação solar refletida de um objeto ou alvo com relação a quantidade de energia incidente – e favoreçam num maior tempo de retenção da água nos solos durante o período de estiagem.

Finalmente, espera-se contribuir para aumentar as possibilidades de pesquisas que acarretem em resultados positivos para manutenção da água no sistema hidrológico local, regional e nacional.

Materiais e métodos

Os dados necessários para execução deste estudo foram obtidos de estações fluviométricas e pluviométricas através das plataformas de bancos de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), no sistema *HidroWeb*, de onde se obteve os dados de vazão. Os dados de vazão foram obtidos em extensões MDB (Access) e CSV (Excel). A primeira para facilitar a organização e análise de dados no *software SisCaH*, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa e onde foram definidas as vazões mínimas $Q_{7.10}$, que representa a vazão mínima com sete dias de duração num período de retorno de 10 anos, e Q_{95} , que é a vazão mínima de permanência em 95% do tempo.

Os dados em formato CSV foram necessários para determinação das vazões de toda a série histórica 1971/72, conforme início de funcionamento da estação até 2020, uma vez que os dados em formato MDB só abrangiam o intervalo de 1971/72 até 2014 e desta maneira, os valores de vazões mínimas foram calculados somente dentro deste período e serviram para avaliar o desempenho da vazão no período do estudo e antes dele.

Para comparação da evolução das vazões foram desmembrados dois períodos dentro da série histórica, a primeira abrangendo 1971/72 até 2009 e outra de 2010 até 2020. Calculou-se ainda a vazão média histórica para comparação das variações entre os dois períodos.

Para obtenção dos dados de ETp utilizou-se do balanço hídrico sequencial obtidos através do *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) obtidos de estações automáticas das áreas de interesse do estudo. As informações foram baixadas em extensão CSV e tratadas diretamente no Excel. As informações de temperatura e pluviosidade foram obtidas da mesma planilha do balanço hídrico. Os dados de ETp, temperatura e pluviosidade foram obtidas apenas do período 2010-2020, período que o sistema de balanço hídrico disponibiliza.

Os dados de vazão, pluviosidade, ETp e temperatura foram organizados mensalmente e anualmente, sendo as análises feitas conforme o ano civil e o ano hidrológico para fins de comparação.

Para estabelecimento das correlações foi utilizada a ferramenta estatística de *correlação de Person* no Excel, onde foram correlacionadas as seguintes variáveis: Chuva (P) x Vazão (Q); ETP x Q; ETP x Temperatura (T); Q x T e ETP x P. As correlações foram realizadas utilizando valores médios mensais e anuais para ano civil e ano hidrológico.

Para definir o grau de efetividade da ETP na vazão ao longo do ano, observou-se os meses em que chuva e vazão se conectam, ou seja, meses em que há aumento das chuvas e aumento das vazões, bem como meses onde havendo decréscimo das chuvas a vazão também decresce, assim os meses em que não houve conexão foram considerados discordantes. Através dos gráficos e elaboração de quadros como os de número 1 e 2, foram definidos os meses concordantes e discordantes, atribuindo a eles uma porcentagem conforme sua quantidade ao longo do ano. Os valores de porcentagem foram obtidos somando-se o número de meses de cada categoria e calculando a porcentagem. Ex: (nº de meses de subida + nº meses de descida) x 100 / 12.

Quadro 1 - Exemplo de convergências e discordâncias de chuva (P) e vazão (Q).

Relação P x Q												
	jan	fev	mar	abr	Mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Subida de ambas									x	x	x	
Descida de ambas	x	x										
Discordância					x	x	x	x			x	x
% do ano em concordância	41,66											
% do ano em discordância	58,34											

Elaborado pelos autores

Quadro 2 - Exemplo de convergências e discordâncias de ETP e Q no ano.

Relação ETP x Q												
	jan	fev	mar	abr	Mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Subida de ambas								x	x	x	x	
Descida de ambas	x	x	x									
Discordância					x	x	x				x	x
% do ano em concordância	58,33											
% do ano em discordância	41,66											

Elaborado pelos autores

Quando chuva e vazão não são concordantes haverá a ação da ETP e de outras variáveis na composição da vazão. Neste caso utilizou-se os meses de discordância entre ETP e vazão, onde $ETP > Q$ e subtraiu-se o valor de discordância entre chuva e vazão, chegando-se assim ao grau estimado de efetividade da ETP sobre a vazão durante o ano (em porcentagem), conforme Equação 1 desenvolvida neste estudo.

$$G_e = (D_{E \times Q} - D_{P \times Q}) \quad (1)$$

Onde:

G_e é o grau de efetividade (%);

$D_{E \times Q}$ é a discordância entre ETp e Q;

$D_{P \times Q}$ é a discordância P e Q

As estações adotadas no sistema *HidroWeb* foram aquelas com início de medições mais antigas e o mais próximo possível da foz dos rios, pois nestes locais a vazão é mais intensa, pois o manancial já terá recebido o fluxo de grande parte de seus tributários.

Foram escolhidas estações fluviométricas e pluviométricas conforme maior tempo de disponibilidade de dados, sendo que as mais antigas são administradas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). O Quadro 3 e a Figura 1 mostram as bacias hidrográficas principais, os rios, as estações utilizadas e as localizações delas.

Quadro 3. Bacias, estações avaliadas e localização.

Bacia	Rio	Estação	Município	Tipo de Estação	Localização
Paraná	Verde	60790000	Acreúna	Fluviométrica	Lat (-17,54) Long(-50,56)
Paraná	Verde	1750007	Rio Verde	Pluviométrica	Lat (-17,80) Long(-50,92)
Araguaia	Caiapó	24750000	Arenópolis	Fluviométrica	Lat (-16,30) Long(-51,47)
Araguaia	Caiapó	1651000	Caiapônia	Pluviométrica	Lat (-16,95) Long(- 51,80)
Tocantins	Paraná	21500000	Nova Roma	Fluviométrica	Lat (-13,76) Long(-46,84)
Tocantins	Paraná	1447000	Alto Paraíso	Pluviométrica	Lat (-14,13) Long(-47,51)

Fonte: Hidroweb. Organização dos autores.

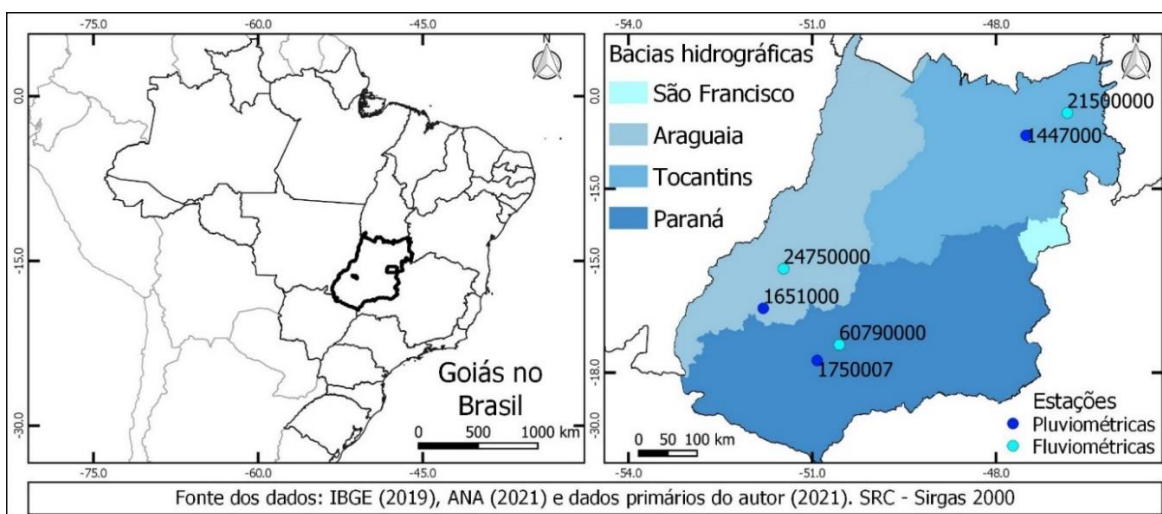


Figura 1. Localização das estações utilizadas
Elaborado pelos autores

As estações estão localizadas em território goiano, na área *core* do Cerrado Brasileiro, que apresenta um clima sazonal com uma estação chuvosa que vai de outubro a março e outra com chuvas insignificantes ou seca que vai de abril a setembro (SOUSA, 2013), onde são constatados os maiores declínios de vazão, principalmente nos meses de julho a setembro. Neste caso as bacias avaliadas apresentam pequenas variações entre suas correlações $ETp \times Q$, conforme sua posição geográfica, mas ambas com comportamentos semelhantes devido à sazonalidade climática. As bacias adotadas foram: Rio Verde/Verdão, Rio Caiapó e Rio Paranã.

O Rio Verde nasce na Serra do Caiapó, nas proximidades das rodovias GO-220 e GO-184, no município de Caiapônia e corre por municípios como Montividiu, Rio Verde, Santa Helena de Goiás e Maurilândia, sendo que neste último recebe como um de seus principais afluentes o Rio Verdão. Este manancial pertence à bacia do Paraná e é um dos principais rios do sudoeste goiano. A área drenada pela bacia é de 8.700 km².

O Rio Caiapó nasce no município de Caiapônia, no Centro-Oeste Goiano e deságua no Rio Araguaia entre os municípios de Montes Claros de Goiás e Aragarças. De acordo com Canedo (2018), a bacia do Caiapó drena uma área de 13 mil km² passando por doze municípios da região oeste de Goiás.

O Rio Paranã nasce no município de Formosa no planalto central brasileiro e sua foz é no Rio Maranhão, e juntos, formam o Rio Tocantins.

Resultados e Discussão

Bacia do Rio Verde ou Verdão

Correlacionando os elementos chuva, evapotranspiração potencial, temperaturas e vazões em escala média anual e mensal, chuva e vazão apresentaram o menor valor de correlação, uma vez que os volumes de água escoado e infiltrado nos períodos chuvosos apresentam um retardo em relação ao acréscimo da vazão. Neste sentido, o escoamento superficial promove um acréscimo mais rápido na vazão durante a duração das chuvas e conforme sua intensidade, mas as águas infiltradas que promoverão o aumento da descarga subsuperficial e subterrânea só vão contribuir com a vazão posteriormente. Daí a não correlação direta.

A análise da correlação entre a ETp e a vazão, que é foco deste estudo, indica no ano

civil uma correlação direta negativa, mostrando que toda vez que a ETp aumenta a vazão diminui, todavia, a correlação no ano civil se mostrou fraca, conforme disposto no Quadro 4. Já a evapotranspiração com a temperatura apresentou correlação direta alta quando considerado todo o ano civil, com um valor mediano no período chuvoso e alto no período de estiagem. A vazão diminui toda vez que a temperatura aumenta, porém, esta correlação com a temperatura apresenta valores baixos.

Com valores mensais as correlações entre P e Q e entre ETp e Q tiveram maior destaque, principalmente ETp e Q, mostrando que há uma correlação direta negativa entre ambas, onde o aumento de uma variável promove o decréscimo de outra e vice-versa.

Quadro 4. Correlações na Bacia do Rio Verdão com valores médios anuais 2010-2020

Ano Civil (valores anuais)			
Chuva x Vazão	ETp x Vazão	ETp x Temperatura	Temperatura x vazão
0,14	- 0,41	0,8	- 0,41
Ano civil (valores mensais)			
0,5	- 0,80	0,49	- 0,13

Elaborado pelos autores

Aplicado o ano hidrológico e considerando o período úmido e seco do intervalo, conforme mostra o Quadro 5, os valores de correlação foram mais expressivos, considerando que os índices de vazão e chuva são mais efetivos nos períodos de chuva, bem como a correlação entre ETp e temperatura, que são variáveis que flutuam conforme aumenta ou diminui o período chuvoso.

Chuva e vazão apresentam correlações baixas, como também aponta o trabalho de Veneziani e Mantovani (2020), a vazão sofre um retardo em relação às chuvas, e neste caso, o início do período seco coincide com um leve incremento da infiltração remanescente do período chuvoso anterior, elevando ligeiramente a correlação no período seco.

A ETp e a vazão apresentam correlações fortes, sendo direta positiva no período chuvoso, pois neste caso há umidade suficiente para evaporar e a vazão tende a aumentar neste período. No período seco a correlação se torna direta e negativa, indicando que pela escassez da chuva a ETp tende a aumentar e a vazão a diminuir.

ETp e temperatura também aumentam o índice de correlação com valores mensais, sendo que no período chuvoso a relação é direta e positiva, pois, se a temperatura aumenta a ETp também aumenta e se temperatura diminui a ETp também diminui.

A correlação entre temperatura e vazão também aumentou, apresentando índice significativo, com menor expressão no período seco, onde a vazão tende a diminuir em

relação ao aumento da temperatura.

Quadro 5 Correlações na Bacia do Rio Verde com valores médios mensais 2010-2020

Ano Hidrológico (valores médios mensais)			
Chuva x Vazão	ETp x Vazão	ETp x Temperatura	Temperatura x vazão
Valores médios - úmido			
0,19	0,83	0,83	- 0,53
Valores médios - seco			
0,21	- 0,92	0,93	- 0,72

Elaborado pelos autores

Quando avaliadas as correlações considerando os valores médios mensais, os resultados se mostraram mais efetivos devido a menores dispersões das médias (Quadro 5).

Chuva e vazão apresentaram correlação moderada quando considerado o ano civil. Ao utilizar o ano hidrológico os valores caem, primeiro porque escoamento e infiltração de água após as chuvas, apresentam retardo na vazão nos primeiros meses de chuva e sua efetivação ocorre no final das chuvas, quando o lençol freático apresenta uma elevação e influencia na vazão.

Evapotranspiração e vazão apresentaram correlação alta, sendo no ano civil uma correlação direta negativa, onde ETp aumenta e a vazão diminui.

No ano hidrológico (período chuvoso) a correlação foi mais alta, pois neste período a evapotranspiração foi equivalente à disponibilidade de água de escoamento. No período de estiagem a correlação foi bem elevada e negativa, considerando que neste caso a indisponibilidade de água das chuvas ocorreu e a ETp aumentou.

ETp e temperatura também apresentaram resultados mais significativos, principalmente no ano hidrológico e período seco. Temperatura e vazão apresentaram resultados diretos negativos, onde maior temperatura, menor vazão, sendo a correlação mais significativa durante o período seco.

A Figura 2 mostra a variação dos índices médios anuais de chuva e da vazão no período de 2010-2020, onde se nota uma tendência de decréscimo de ambas. A tendência de decréscimo da chuva foi de 22% e da vazão de 28% no período.

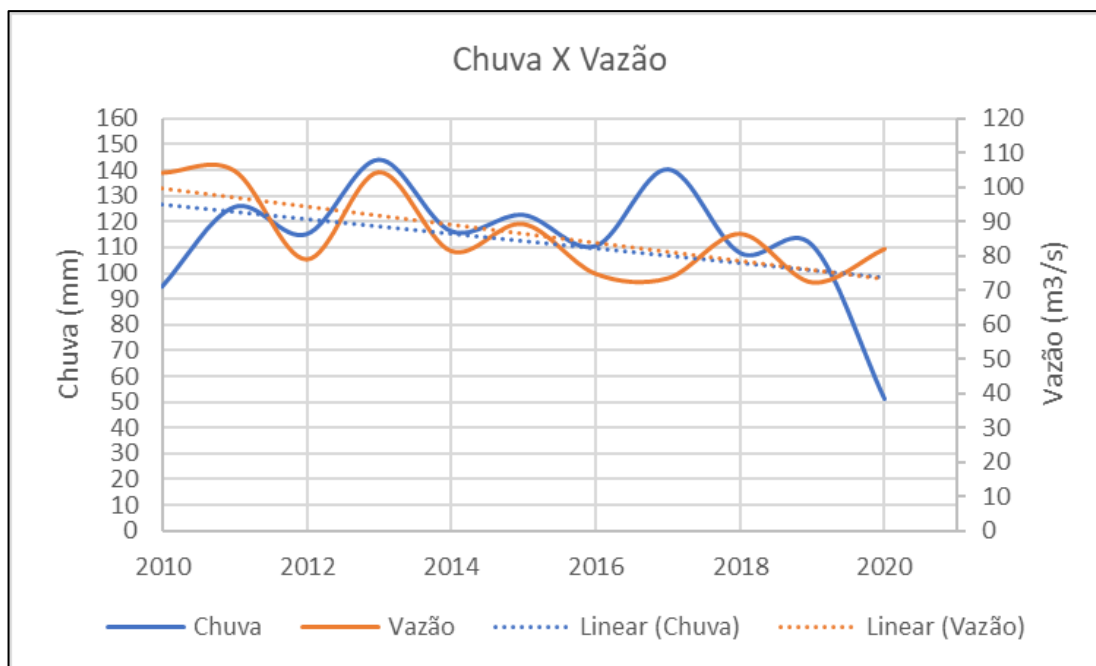


Figura 2. Variação de chuva e vazão entre 2010-2020.
Elaborado pelos autores

A Figura 3 mostra a variação entre ETp e vazão, bem como suas tendências, onde se percebe tendência de queda da vazão como apontado na Figura 1 e aumento da ETp em 29,3%.

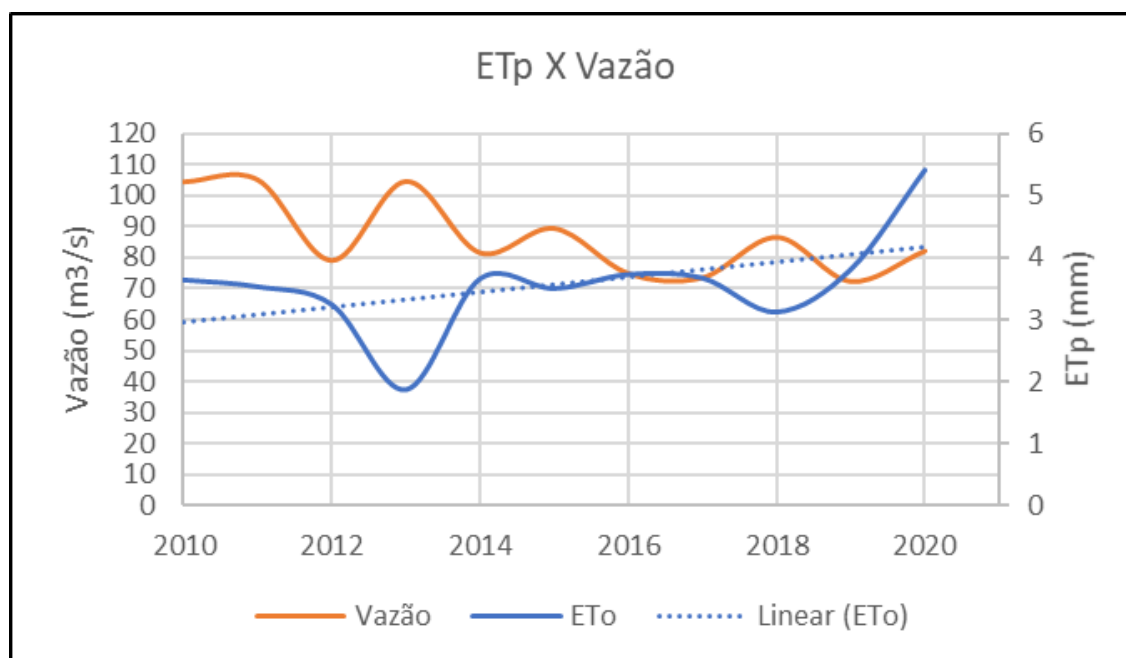


Figura 3. Variação de ETp e Vazão entre 2010-2020.
Fonte: Os autores

Considerando os intervalos de tempo de 1971 até 2009 e entre 2010 até 2020, percebe-se um decréscimo da ordem de 19,8% da vazão entre os períodos, mostrando que as vazões tem diminuído após 2010 como apontado pela tendência da Figura 2.

A Figura 4 mostra a variação entre as vazões médias mensais no período de 1971-2009 e entre 2010-2020 e também a $Q_{7,10}$ e Q_{95} , do período de 1971-2014 (período disponível para análise no sistema Hidroweb).

As vazões médias entre 1971-2009 estiveram acima dos valores das vazões mínimas consideradas, enquanto no período de 2010-2020 as vazões nos períodos de menor vazão coincidiram com a Q_{95} , indicando um decréscimo mais acentuado nos períodos de estiagem.

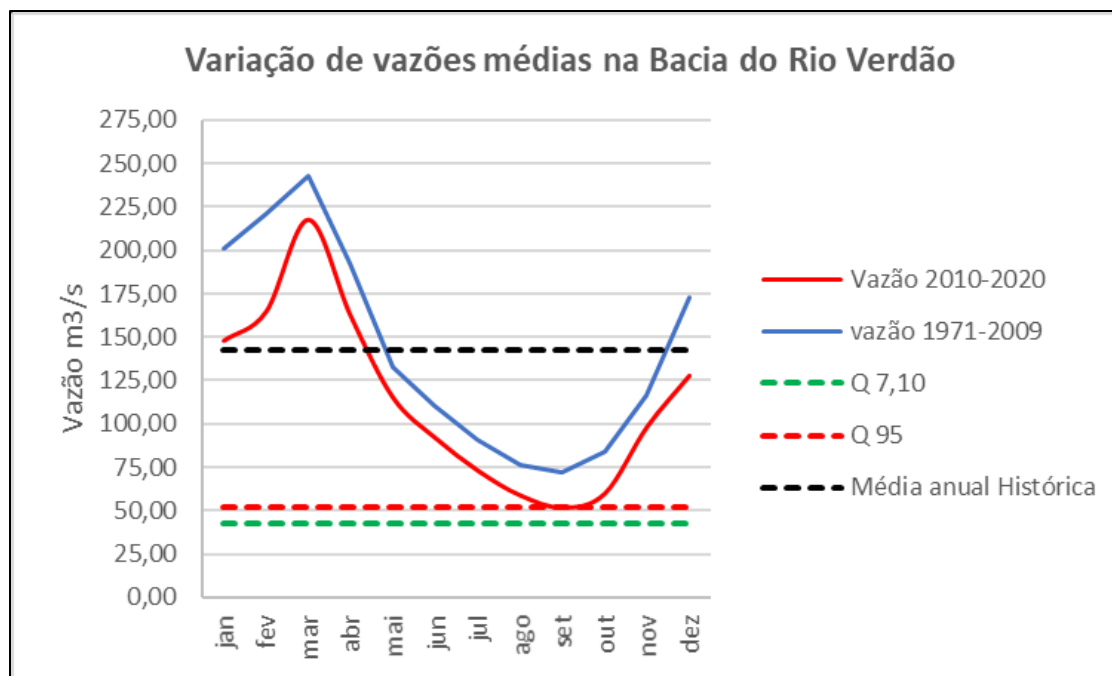


Figura 4. Variação das vazões nos períodos 1971-2009 e 2010-2020

Fonte: Os autores

Bacia do Rio Caiapó

Na análise de correlação do ano civil na bacia do rio Caiapó (Quadro 6), apenas a ETp x Vazão apresentou correlação significativa (70%) em análises mensais. As demais variáveis apresentaram correlações baixas, devido à variação de ambas no decorrer do ano, só fazendo sentido quando avaliadas mensalmente dentro do ano hidrológico, quando valores de chuvas, temperatura, vazão e ETp são mais simétricos, como demonstrado no Quadro 4, onde as correlações ETp x Vazão e ETp x Temperatura apresentam valores bastante

significativos, ou seja, ETp e vazão apresentam correlação direta positiva durante o período chuvoso e direta negativa no período seco, pois a vazão tende a diminuir neste período.

Quadro 6. Correlações na Bacia do Rio Caiapó com valores médios anuais 2010-2020

Ano Civil (valores médios anuais)			
Chuva x Vazão	ETp x Vazão	ETp x Temperatura	Temperatura x vazão
- 0,12	- 0,10	0,24	- 0,19
Ano civil (valores mensais)			
0,37	- 0,70	0,47	- 0,04

Elaborado pelos autores

Quadro 7. Correlações na Bacia do Rio Caiapó com valores médios mensais 2010-2020

Ano Hidrológico (valores médios mensais)			
Chuva x Vazão	ETp x Vazão	ETp x Temperatura	Temperatura x vazão
Valores médios - úmido			
- 0,23	- 0,68	0,94	- 0,43
Valores médios - seco			
0,08	- 0,84	0,90	- 0,57

Elaborado pelos autores

Durante o período analisado, a bacia do rio Caiapó apresentou tendência de decréscimo da precipitação média anual da ordem de 16,7% e da vazão de 40%. A Figura 5 mostra a comparação entre a chuva e a vazão e a tendência de decréscimo das duas variáveis no período.

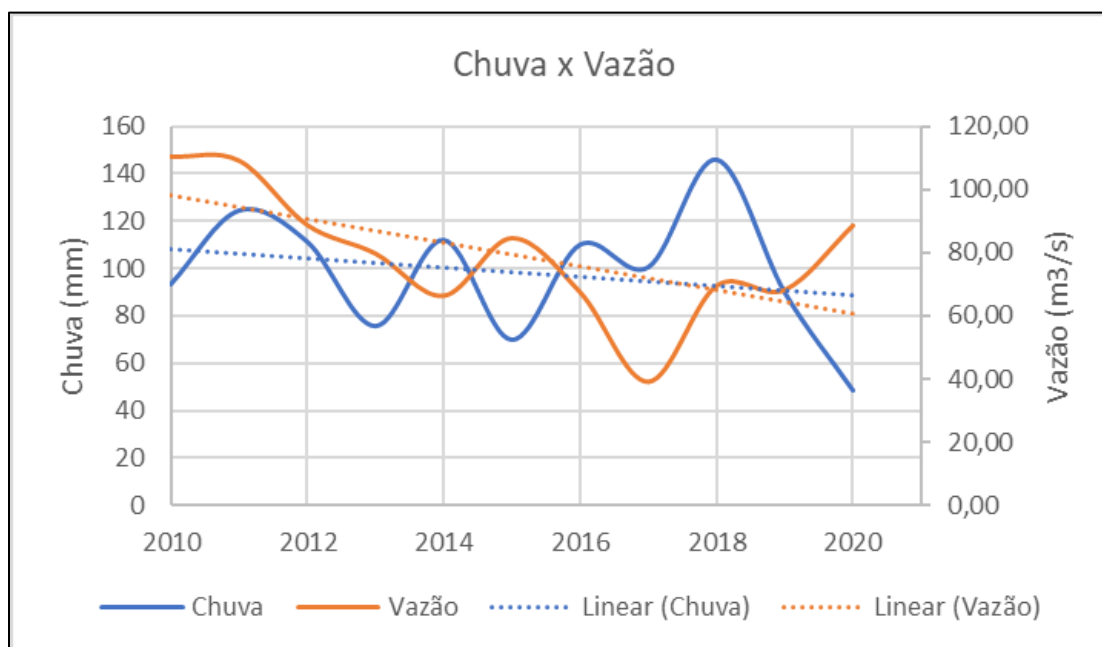


Figura 5. Variação de chuva e vazão entre 2010-2020.

Fonte: Os autores

Quanto à evapotranspiração, a mesma não sofreu alteração significativa no período analisado para a bacia, sendo seu acréscimo de apenas 3,1%, enquanto a vazão apresentou uma maior tendência de queda durante o período (40%), e a temperatura uma tendência de elevação de 0,5°C no período. A Figura 6 mostra as tendências de ETp e vazão no período.

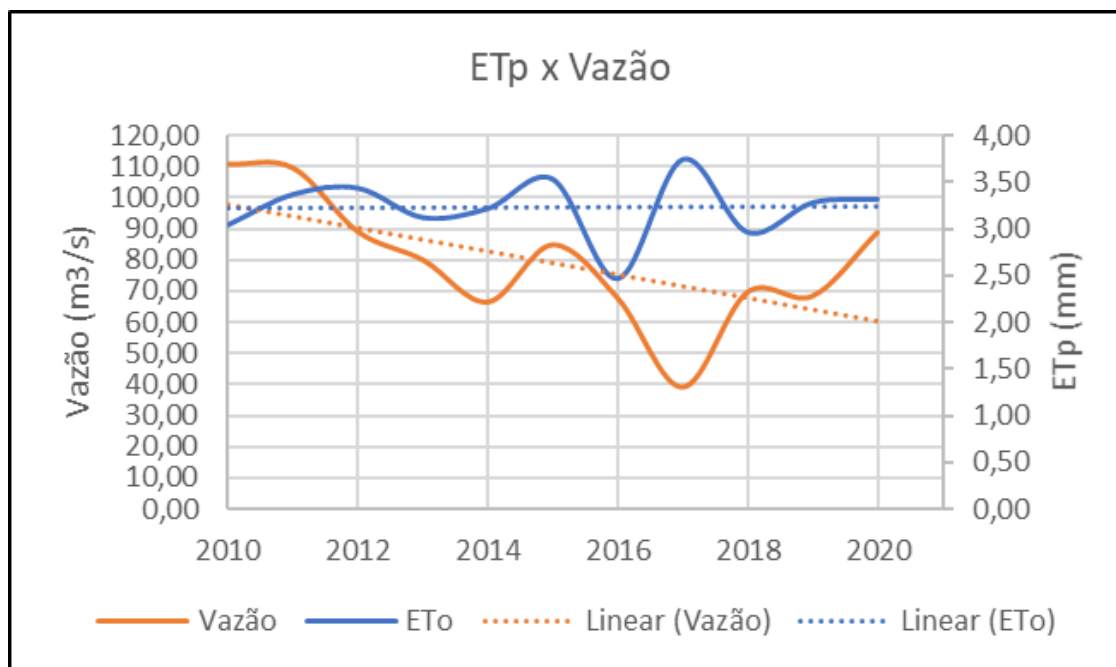


Figura 6 Variação de ETp e vazão entre 2010-2020

Elaborado pelos autores

Na comparação entre as médias anuais de vazão para os intervalos de tempo 1972-2009 e 2010-2020, nota-se um decréscimo da vazão em relação à vazão média da série histórica (1972-2020), da ordem de 58,7%, na última década. Os valores mínimos de vazão $Q_{7.10}$ e Q_{95} não são atingidos nos períodos de estiagem quando se considera os valores médios de 1972-2009, enquanto no intervalo de 2010-2020 as médias atingem a Q_{95} (31,86 m³/s) e a $Q_{7.10}$ (20,46 m³/s) nos períodos de estiagem, como mostra a Figura 7.

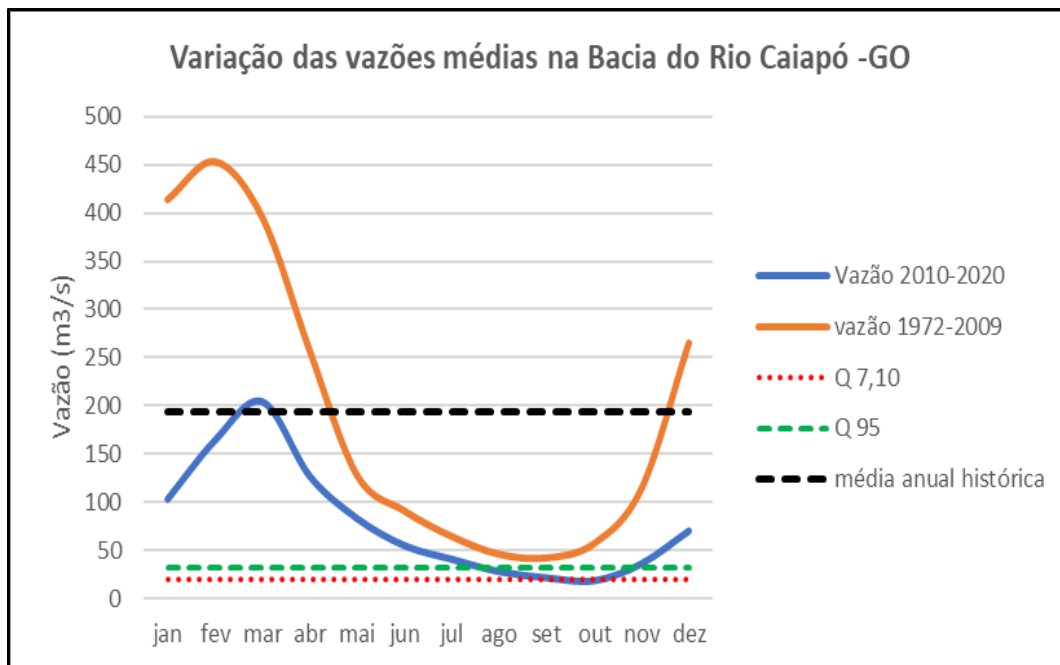


Figura 7. Comparação de vazões médias entre 1972-209 e 2010-2020.

Fonte: Os autores

Bacia do Rio Paranã

Como nos casos anteriores, as correlações ao nível anual entre as variáveis não apresentam valores significativos, exceto quando se utiliza valores mensais, e neste caso a correlação chuva x vazão tem um índice de 67% e entre a ETp e a vazão de 76%, numa correlação direta negativa (maior ETp, menor vazão). O Quadro 8 mostra os valores das correlações no ano civil.

Quadro 8. Correlações na Bacia do Rio Paranã com valores médios anuais 2010-2020

Ano Civil (valores anuais)			
Chuva x Vazão	ETp x Vazão	ETp x Temperatura	Temperatura x vazão
0,20	- 0,16	0,30	- 0,68
Ano civil (valores mensais)			
0,67	- 0,76	0,37	0,17

Fonte: Os autores

Conforme apresentadas no Quadro 9, as correlações no ano hidrológico apresentaram valores mais expressivos considerando que as definições de temperatura e chuvas são mais destacadas conforme os períodos mais chuvosos e secos. Desta maneira, chuva e vazão apresentam uma correlação baixa no período úmido, devido ao retardo da vazão após ao início das chuvas e um aumento de correlação no período seco, cabendo destacar que durante

este período a vazão reduz junto com o declínio das chuvas entre abril e maio, e depois se mantém em um declínio inferior ao das chuvas, devido ao fluxo subsuperficial e subterrâneo acumulado das chuvas anteriores, de maneira que com o retorno das chuvas, a vazão ainda se mantém inferior por um tempo.

Os valores entre ETp e vazão são fortes no período úmido e no período seco, com correlações diretas negativas, uma vez que a evaporação maior implica na diminuição da vazão.

Temperatura e ETp apresentam também correlações fortes e diretas, enquanto entre temperatura e vazão é mais forte no período chuvoso, onde as vazões tendem a ser maiores e as temperaturas mais amenas, porém diminuindo no período seco, quando as vazões diminuem.

Quadro 9. Correlações na Bacia do Rio Paranã com valores médios mensais 2010-2020

Ano Hidrológico (valores médios mensais)			
Chuva x Vazão	ETp x Vazão	ETp x Temperatura	Temperatura x vazão
Valores médios - úmido			
0,10	- 0,90	0,88	- 0,67
Valores médios - seco			
0,71	- 0,74	0,80	- 0,26

Elaborado pelos autores

Sobre a evolução das variáveis chuva e vazão no período avaliado, a Figura 8 mostra uma ligeira diminuição das chuvas na ordem 15%, enquanto a vazão apresentou um ligeiro acréscimo da ordem de 6%.

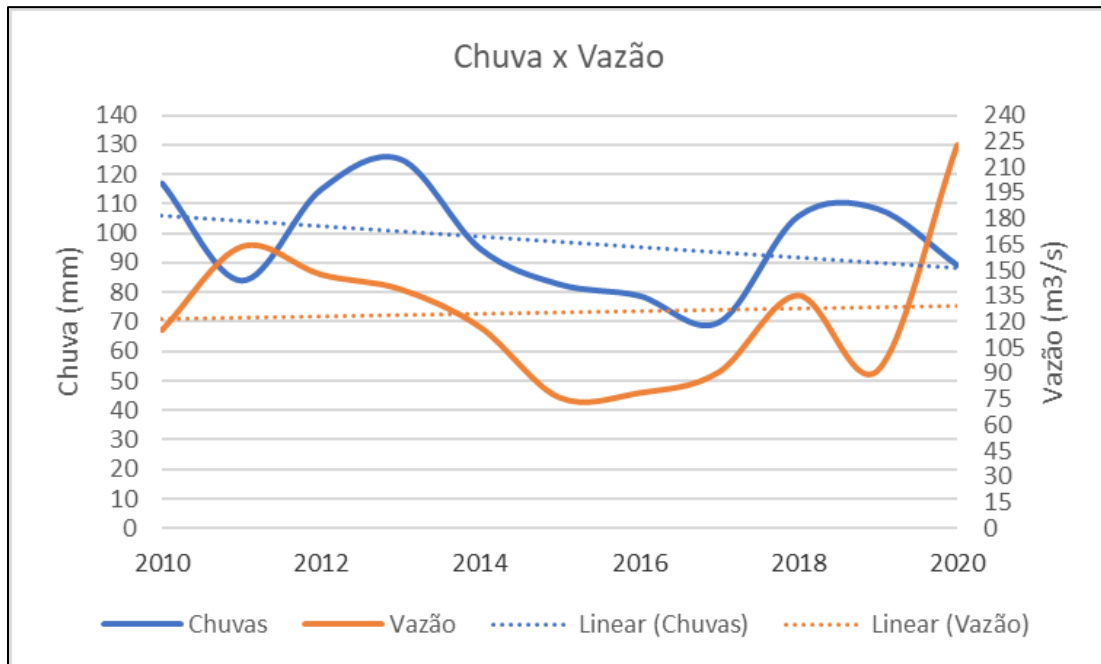


Figura 8. Variação de chuva e vazão entre 2010 – 2020.
Elaborado pelos autores

Quando analisados Vazão e ETP, nota-se na Figura 9 que ETP teve uma tendência de aumento da ordem de 32%.

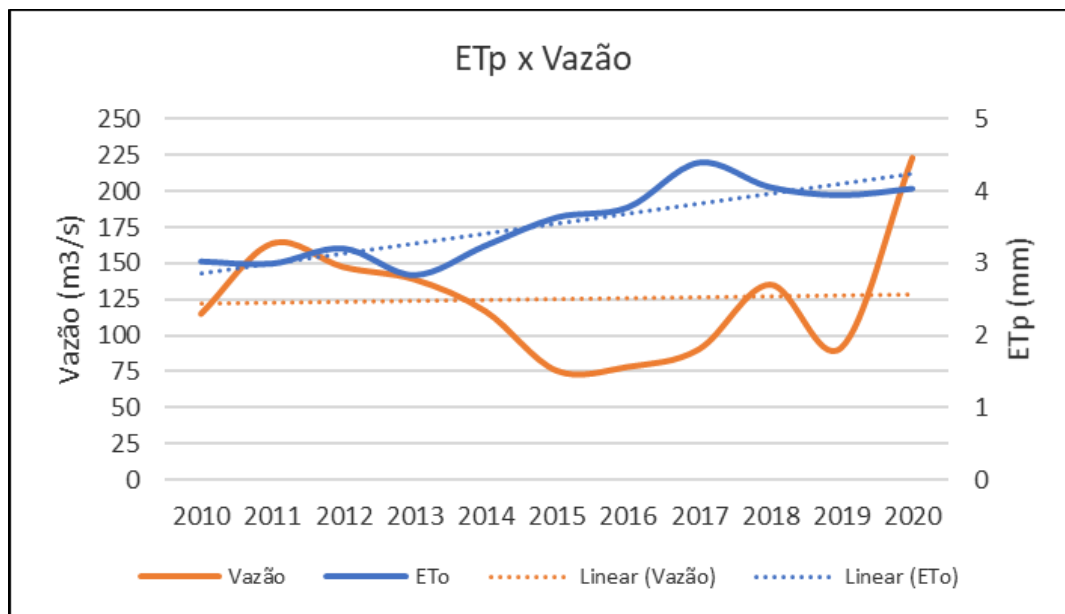


Figura 9. Variação de ETP e vazão entre 2010 – 2020.
Elaborado pelos autores

Avaliando o comportamento da vazão entre 1971 - 2009 e entre 2010 - 2020 foi possível perceber que a mesma apresentou médias superiores antes de 2010, como mostra a Figura 10. Nesta faixa de tempo as vazões nos meses mais secos não atingiram os limites da Q95 e da Q7,10, ao passo que no período 2010 -2020 os meses mais secos tiveram vazões que interceptaram estes índices.

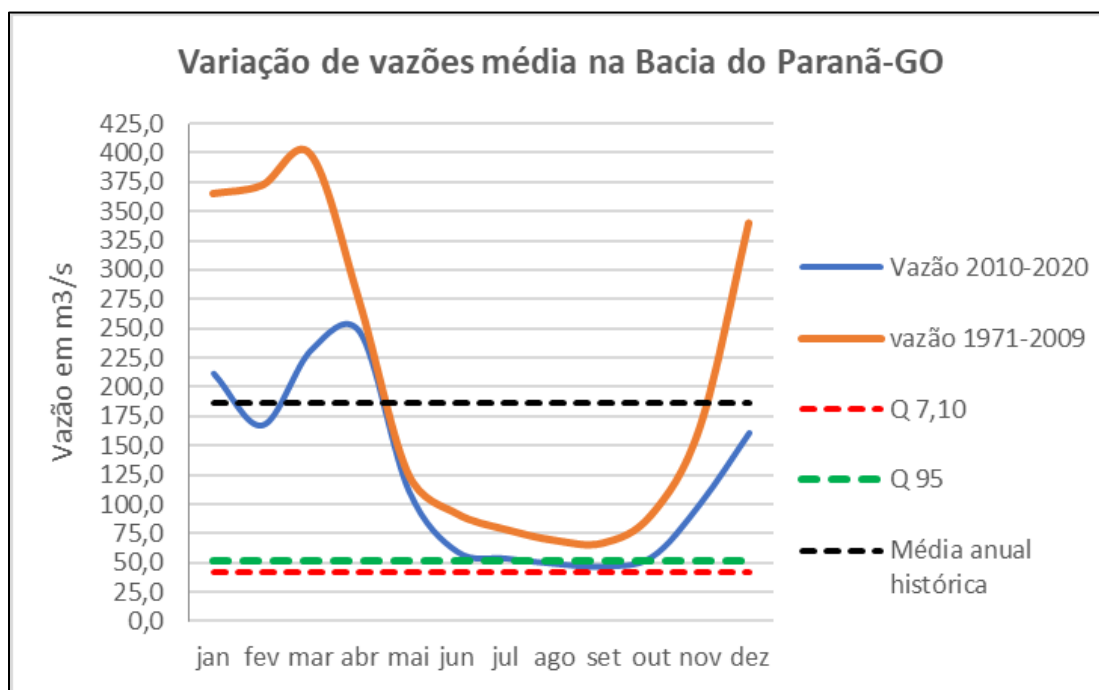


Figura 10. Variação da vazão nos períodos 1971-2020 e 2010-2020. Elaborado pelos autores

Comparando as correlações entre ETp e vazão nas três bacias analisadas e tomando como base o ano civil (Quadro 10), percebeu-se uma pequena variação entre elas, mas em todas elas os valores obtidos são significativos, diretos e negativos, ou seja, a vazão tende a diminuir com o aumento da evapotranspiração.

Quadro 10. Síntese da correlação ETp x Vazão nas três bacias

Bacia	Ano civil mensal
Rio Verde/Verdão	- 0,80
Rio Caiapó	- 0,70
Rio Paraná	- 0,76

Elaborado pelos autores

A evapotranspiração potencial (ETp) apresenta correlação significativa com a vazão (Q), ou seja, quando ETp é maior, a Q tende a ser menor, havendo ainda uma correlação

direta e negativa da ETp com as chuvas (P), uma vez que aumentando P, diminui ETp.

As chuvas apresentam uma maior influência na vazão ao longo do ano com predomínio nos períodos chuvosos, onde a vazão tende a aumentar, e com a diminuição das chuvas a vazão permanece estável por um período curto de tempo, fruto de fluxos subterrâneos e subsuperficiais e depois tende ao declínio, e neste caso a ETp passa a dominar e influenciar na redução da vazão.

Casaroli *et al.* (2018) destaca que nem toda água que entra no sistema da bacia pela via da precipitação escoará até o exutório, uma vez que haverá perdas por evapotranspiração, pelo escoamento superficial e pela drenagem profunda.

O grau de efetividade da ETp na diminuição anual da vazão foi estimada e representada no Quadro 11, que mostra o grau de influência da ETp na vazão dos mananciais. Nas três bacias a influência da ETp na vazão se mostrou bastante significativa.

Quadro 11. Grau de efetividade da ETp na vazão ao longo do ano.

Bacia	Porcentagem de discordância ETp x Q	Porcentagem de discordância P x Q	Grau de efetividade de ETp em Q (%)
Rio Verde/Verdão	75	50	25
Rio Caiapó	66,7	41,5	25,20
Rio Paranã	41,66	25	16,66

Elaborado pelos autores

Considerações Finais

A influência da ETp na Q foi comprovada com as análises realizadas, apresentando ainda, um cenário de diminuição das vazões nos últimos dez anos, conjuntamente com a diminuição das chuvas e aumento das temperaturas, sendo que esta última influencia diretamente no acréscimo da ETp juntamente com a diminuição das chuvas.

Os resultados apontaram que as chuvas possuem uma representatividade maior nas vazões em ambas as bacias e que a evapotranspiração influencia principalmente no período de estiagem, enquanto outras variáveis, embora não avaliadas neste estudo, contribuem com o restante, como características geológicas e armazenamento/fornecimento de água subterrânea, as características dos solos, entre outras.

Desta maneira foi possível constatar que no período de 2010 a 2020 houve uma significativa alteração com aumento das temperaturas e diminuição das chuvas, o que repercutiu diretamente no decréscimo das vazões, e neste sentido serão necessárias

atividades que busquem minimizar os impactos ambientais nas bacias hidrográficas, não só nas analisadas, mas em todas de maneira geral, pois a escassez hídrica já é um fato.

Agradecimentos

Ao laboratório de estudos do relevo, solos e água LAERSA da UEG Unidade Universitária de Iporá pelo fornecimento do ambiente de trabalho; ao Programa de Pesquisa e Pós-graduação da Universidade Estadual de Goiás pela aprovação do projeto de pesquisa.

Potential evapotranspiration (PEt) and its influence on the flow rate of rivers in Brazilian Cerrado

Abstract: The present study sought to understand the interaction of evapotranspiration in the flow rate of rivers. For this was analysed the potential evapotranspiration (PEt) and the flow rate (Q) in the ten-year period (2010-2020) in three hydrographic basins of Goiás State (Green River Basin; Caiapó Basin and Paranã Basin). Variations in PEt and streamflows within the period were evaluated in order to search for correlations between these variables. Considering that the increase in PEt is a result of the increase in temperature (T) and the decrease in precipitation (P), the latter was also used in the analysis parameters. Correlation indices between the variables PEt, Q, P and T were calculated considering the civil year and hydrological year. Flow rate data were obtained from fluvimetric stations in the website of the National Water Agency (ANA) in the HidroWeb system. Information on temperature, rainfall and evapotranspiration were obtained from rainfall stations on the website of the National Institute of Meteorology (INMET). The results obtained pointed to a strong correlation between PEt and Q, showing that the first significantly influences the second. It was also found that PEt has increased in the last ten years, as well as the outflows in the three basins showed a decline in the same period.

Keywords: water balance; watershed; precipitation; temperature; correlation.

Evapotranspiración potencial (ETp) y su influencia en el caudal de los ríos del Cerrado brasileño

Resumen: El presente estudio buscó comprender la interacción de la evapotranspiración en el caudal de los ríos. Para ello se analizó la evapotranspiración potencial (PEt) y el caudal (Q) en el período de diez años (2010-2020) en tres cuencas hidrográficas del estado de Goiás (Cuenca del Río Verde; Cuenca del Caiapó y Cuenca del Paranã). Se evaluaron las variaciones en el PEt y los caudales dentro del período para buscar correlaciones entre estas variables. Considerando que el aumento de PEt es resultado del aumento de temperatura (T) y la disminución de la precipitación (P), esta última también se utilizó en los parámetros de análisis. Se calcularon índices de correlación entre las variables PEt, Q, P y T considerando el año civil y el año hidrológico. Los datos de caudal se obtuvieron de las estaciones fluviométricas en el sitio web de la Agencia Nacional del Agua (ANA) en el sistema HidroWeb. La información sobre temperatura, precipitación y evapotranspiración se obtuvo de las estaciones de precipitación en el sitio web del Instituto Nacional de Meteorología (INMET). Los resultados obtenidos apuntan a una fuerte correlación entre PEt y Q, mostrando que el primero influye significativamente en el segundo. También se encontró que el PEt ha aumentado en los últimos diez años, así como las salidas en las tres cuencas mostraron una disminución en el mismo período.

Palabras clave: equilibrio hídrico; cuenca hidrográfica; precipitación; temperatura; correlación.

Referências

Folha de São Paulo/cotidiano. (2015). **Água no Brasil Enquanto o consumo de água por habitante cresce no país, perdas na distribuição têm melhora tímida**. Cotidiano. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/infograficos/2015/01/118521-agua-no-brasil.shtml>> . Acessado em 02/06/2020.

AYOADE, J. O. (2001). **Introdução à climatologia para os trópicos**, (6ª edição). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 332 p.

BEZERRA, R. R., RUDKE, A. P., ROCHA, V. N. L., SOUZA, W., ANDRADE, N. L. R. A., EVANGELISTA, D. H. R. (2013). Determinação da $Q_{7.10}$, Q_{90} e Q_{95} como ferramenta para gestão dos recursos hídricos: estudo de caso do Rio Jamari. **Bahia anais**. Salvador, v. 23, n. 2, p.425-435, abr./jun.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P.(2000) Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v. 59, p. 125-137.

CANEDO, G. S.(2018). **Análise da Estrutura da Paisagem na Sub-Bacia do Rio Caiapó-GO**. Dissertação de Mestrado. UFG. Pós-Graduação em Ciências Ambientais CIAMB. Goiânia, 55p.

CASSAROLI, D., RODRIGUES, T. R., MARTINS, A. P. B., EVANGELISTA, A. W. P., JOSÉ A. J. (2018) **Padrões de chuva e evapotranspiração em Goiânia, GO**. Revista Brasileira de Meteorologia 33(2). Abr – Jun . 247 - 256.

O Tempo. (2019). **Consumo de água no Brasil deverá crescer 24% até 2030, prevê estudo**. Disponível em <<https://www.otempo.com.br/economia/consumo-de-agua-no-brasil-devera-crescer-24-ate-2030-preve-estudo-1.2160450>>. Acesso em 02/06/2020.

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Hidroweb. Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>> Acesso em setembro de 2007.

MILLER, G. T. (2011). **Ciência Ambiental**. (12ª edição). São Paulo: Cengage Learning, 501 p.

MOURA, D. M. B. Proposta metodológica para avaliação e definição de fontes superficiais de abastecimento público: uma análise comparativa entre duas bacias hidrográficas, visando a segurança hídrica de Iporá (GO). 2021. 247 f. **Tese** (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

PAZ, A. R.. (2004). **Hidrologia aplicada**. texto básico para aula. UERGS. Caxias do sul. Disponível em: http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UERGS.pdf

PEREIRA, A. R. (2005). **Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather**. Agrometeorologia (nota). v.64, n.2. Bragantina, Campinas, p.311-313.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C. (1999). **Balanço hídrico normal por Thornthwaite e Matter (1955)**. Piracicaba. ESALQ. CD-ROM.

SILVA, F. N. R. (S/D). **Radiação Solar e Terrestre. Balanço de Calor**. Apostila capítulo 2. Disponível em: <http://meteo.cefet-rj.br/felipe/metgeral/capitulo2.pdf>. Acessado em 01/09/2021.

SILVA, L. M. C; HORA, M. A. G. M. (2015, junho). Conflito Pelo Uso Da Água Na Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos: O Estudo De Caso Da Uhe Batalha. **Engevista**, V. 17, N. 2, 166-174

SOUSA, F. A. de. (2013). **A contribuição dos solos originados sobre granitos e rochas alcalinas na condutividade hidráulica, na recarga do lençol freático e na suscetibilidade erosiva – um estudo de caso na alta bacia hidrográfica do rio dos bois em iporá-GO**. (Tese de doutorado). Uberlândia: UFU. Programa de Pós-graduação em Geografia. IG, 207p.

SOUSA, F. A. de. (2019). Identificação das zonas de recarga e caracterização dos sistemas freáticos de Iporá-GO. **Rev. Geoambiente on-line**. 33 (23), 22-44.

STEINKE, E. B., PAIVA, R. C. D. (2017) Análise de sensibilidade da evapotranspiração e vazão à variabilidade climática na América do Sul através de modelagem hidrológica. **XXII Simpósio brasileiro de recursos hídricos**. Florianópolis-SC. 8p.

THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J. R. (1955). The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey, Drexel Institute of Technology, 104p.

TIRIVAROMBO, S., OSUPILE, D., ELIASSON, P. (2018). Drought monitoring and analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI). **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, Volume 106, P. 1-10.

TOMAZ, P. (2020). **Evapotranspiração**. Método de Thornthwaite, 1948. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_URGS.pdf>. Acessado em 02/06/2020.

TUCCI, C. (2000). **Hidrologia: ciência e aplicação, (4ª edição)**. Porto Alegre, Editora UFRGS/ABRH, 145 p.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. (2020). Water infrastructure. In: **The Paraná River Basin**. Routledge, p. 61-79.

VENEZIANI, Y.; MANTOVANI, J. (2020). Modelagem chuva-vazão na avaliação de picos

de vazão em bacia hidrográfica urbana: córrego Três Pontes (1962 e 2011), Região Metropolitana de São Paulo (SP). **Boletim Goiano de Geografia**, v. 40, n. 01, p. 1-17.

VICENTE-SERRANO, S. M.; VAN DER SCHRIER, G.; BEGUERÍA, S.; AZORIN-MOLINA, C.; LOPEZ-MORENO, J. I. (2015). Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 42-54.

Sobre os autores

Flávio Alves de Sousa – Graduado, mestre e Doutor em Geografia. Professor da Universidade Estadual de Goiás, unidade de Iporá.

Derick Martins Borges de Moura - Graduado, mestre e Doutor em Geografia. Técnico Ambiental na Universidade Estadual de Goiás.

Recebido para avaliação em novembro de 2021

Aceito para publicação em março de 2022