



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**TENDÊNCIAS, PADRÕES E PERSISTÊNCIA DA
PRECIPITAÇÃO, VAZÃO E ÁREA
INUNDADA EM TRÊS SUB-BACIAS DA BACIA DO ALTO RIO
PARAGUAI (BAP)**

MARIA EDUARDA MORAES SARMENTO COELHO

**ORIENTADOR: HENRIQUE CHAVES
COORIENTADOR: ERALDO MATRICARDI**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: {NÚMERO DA DISSERTAÇÃO / TESE}

BRASÍLIA/ DF: ABRIL/2025

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
FLORESTAL**

**TENDÊNCIAS, PADRÕES E PERSISTÊNCIA DA
PRECIPITAÇÃO, VAZÃO E ÁREA
INUNDADA EM TRÊS SUB-BACIAS DA BACIA DO ALTO RIO
PARAGUAI (BAP)**

MARIA EDUARDA MORAES SARMENTO COELHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

**HENRIQUE MARINHO LEITE CHAVES, PhD (UnB) -
Orientador**

MARIA RITA FONSECA, Doutora (UnB) – Membro interno

**VIVIANE DIB, Doutora (Instituto Internacional pela
Sustentabilidade - IIS) – Membro Externo**

MARCELO LATUF, Doutor (UNIFAL) – Membro externo

DATA: BRASÍLIA/DF, 24 de Abril de 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

COELHO, MARIA EDUARDA MORAES SARMENTO

Tendências, padrões e persistência da precipitação, vazão e área inundada em três sub-bacias da Bacia do Alto rio Paraguai (BAP) [Brasília, Distrito Federal] 2025.

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

- | | | |
|---------------|----------------------|------------------|
| 1. Pantanal | 2. Mudança Climática | 5. Área inundada |
| 3. Hidrologia | 4. Persistência | |

REFERÊNCIA

COELHO, M. E. M. S. (2025). Tendências, padrões e persistência da precipitação, vazão e área inundada em três sub-bacias da Bacia do Alto rio Paraguai (BAP). Dissertação de Mestrado, **Publicação G.DM-001A/90**, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 39 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Maria Eduarda Moraes Sarmiento Coelho

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Tendências, padrões e persistência da precipitação, vazão e área inundada em três sub-bacias da Bacia do Alto rio Paraguai (BAP)

GRAU / ANO: Mestre / 2025

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir a dissertação de mestrado e para emprestar ou vender somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Maria Eduarda Moraes Sarmiento Coelho
Dudacoelho1997@gmail.com
Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Este trabalho nasce do encontro entre a ciência e a paisagem. Foi no fluxo das águas do Cerrado e nos pulsos do Pantanal que encontrei a paixão que me move – e a confirmação necessária para traçar o fim do início (ou início do fim?) da minha carreira profissional. Este é meu caminho.

Agradeço à minha família, por me emprestarem paciência quando precisei dedicar meu tempo aos estudos e ao trabalho. Obrigada por compreenderem minha ausência e, ainda assim, estarem presentes – como raízes profundas, firmando o chão sob meus passos, mesmo sem saber. Às minhas mães Marcia e Lia, e ao meu pai, Heitor, dedico este trabalho e todos os outros que virão.

Ao meu companheiro Miguel, obrigada por ser margem firme e água corrente. Pela escuta, pelo incentivo e pelos cuidados, que me ancoraram mesmo nos dias mais turbulentos – tua presença foi abrigo e direção.

Ao meu orientador, Professor Henrique Chaves, agradeço por cada provocação e dedicação ao longo desses dois anos. Você foi bússola em terreno de grande transformação. Aos demais professores e colegas do Departamento de Engenharia Florestal da UnB, bem como colegas de equipe do WWF-Brasil, agradeço as trocas generosas que nutriram meu caminhar.

O mestrado não se resume à conquista de um título ou à publicação de um artigo. Foi um mergulho profundo em mim, num processo de autoconhecimento e de amadurecimento. Estudar sobre o mundo é também aprender sobre o que permanece e o que muda dentro da gente. Por isso, esta dissertação carrega muito mais que resultados: ela reverbera encontros, aprendizados e transformações.

A todos, minha gratidão por este momento.

“Vocês, humanos, têm esse curioso hábito de nomear os seres.
Rio.
Eu não me chamo Rio.
Alguns me conhecem pela nebulosidade das minhas águas.
Outros, pelo movimento sutil das minhas ondas.
Eu me chamo de tantas coisas.
É nas idas e vindas silenciosas da minha correnteza que os peixes me escutam.
Feche os olhos e tente me ouvir também.
Ainda posso gritar, chorar.
Só não sei por mais quanto tempo.

Há algum tempo, eu sangrei.
Tudo ao meu redor virou fogo.
Um líquido espesso e opaco envenenou minhas correntes e transbordei de sofrimento.
Me vesti de cinzas, sufocando vidas ao meu redor.
Achei que iria me recuperar, mas, ainda hoje,
você pode encontrar em mim as cicatrizes dessa
e de tantas outras tragédias.
Quando as cinzas se misturaram ao meu fluxo,
meu lamento ecoou no silêncio da Natureza ferida.

Acham que, como os humanos, deslizo sozinho e silencioso pelas entranhas da Terra.
Mas, sou muito mais que uma mera corrente.
No fluxo das minhas águas, você encontrará não apenas a minha história,
mas o batimento cardíaco de milhares de vidas.”

Texto de Jacqueline Sordi,
“The Paraguay River versus the end of the world”

RESUMO

O Pantanal, considerado a maior planície alagável continental do mundo, apresenta dinâmicas hidrológicas e ecológicas intrinsecamente ligadas aos fluxos de água provenientes da região de planalto, chamada de cabeceiras do Pantanal. Embora os impactos de fenômenos climáticos de grande escala e das mudanças no uso da terra sobre variáveis hidrológicas dentro da Bacia do Alto Paraguai (BAP) sejam reconhecidos, seus efeitos combinados permanecem desconhecidos. Reduções recentes na precipitação e na vazão dos rios afetaram negativamente aspectos ambientais e socioeconômicos dos biomas Cerrado e Pantanal no Brasil, levantando preocupações sobre a sustentabilidade a longo prazo desses importantes ecossistemas. Este estudo analisa uma série temporal hidrológica de 37 anos (1986–2023) de precipitação, vazão e área inundada de três bacias contribuintes do Pantanal (Jauru – JB, Taquari – TB e Miranda – MB), revelando tendências hidrológicas distintas influenciadas por diferentes sistemas climáticos. Tendências significativas de redução na precipitação e na vazão foram observadas nas bacias setentrionais JB e TB, contrastando com tendências de aumento na bacia meridional MB. Consequentemente, identificou-se uma tendência de declínio nas áreas inundadas a jusante dentro da planície alagável do Pantanal. Processos de memória de longo prazo (fenômeno de Hurst) foram identificados nas séries temporais da área inundada do Pantanal e nos dados de nível do rio Paraguai. Esses achados indicam uma redução persistente e agregada nas variáveis hidrológicas do Pantanal, afetando negativamente sua ecologia e economia dependentes do pulso de inundação, como a pecuária, a pesca e a navegação. O estudo ressalta a necessidade de estratégias de gestão adaptativa para enfrentar os impactos da perda de superfície hídrica, aumento do risco de incêndios e variabilidade climática na BAP.

ABSTRACT

The Pantanal, considered the world's largest continental floodplain, exhibits hydrological and ecological dynamics that are intrinsically linked to water inflows from the surrounding highlands. While the impacts of large-scale climatic phenomena and land-use changes on hydrological variables within the Upper Paraguay River Basin (UPRB) are acknowledged, their combined effects remain unknown. Recent reductions in precipitation and river discharge have adversely affected both environmental and socioeconomic aspects of the Cerrado (Brazilian Savannah) and Pantanal biomes in Brazil, raising concerns about the long-term sustainability of these important ecosystems. This study analyzes a 37-year hydrological time series (1986-2023) of rainfall, streamflow, and flooded area of three contributing basins of the Pantanal (Jauru-JB, Taquari-TB and Miranda-MB), and reveals distinct hydrological trends influenced by different climate systems. Significant decreasing trends in rainfall and streamflow were observed in the northern JB and TB basins, contrasted by increasing trends in the southern MB basin. Consequently, a declining trend in downstream flooded areas within the Pantanal floodplain was identified. Long-term memory processes (Hurst phenomenon) were identified in the time series of the Pantanal flooded area and also in the Paraguay river stage data. These findings indicate a persistent and aggregated reduction in the Pantanal's hydrologic variables, adversely affecting its water-dependent ecology and economy, such as ranching, fishing, and navigation. The study underscores the necessity for adaptative management strategies to tackle the impacts of water surface loss, increased fire risk, and climate variability in the UPRB

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: CONTEXTUALIZAÇÃO	19
1.1. OBJETIVOS	25
<i>1.1.1. OBJETIVO GERAL</i>	25
<i>1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	25
<i>1.1.3. HIPÓTESES</i>	25
CAPÍTULO 2: ARTIGO CIENTÍFICO	26
1. Introdução	28
2. Materiais e Métodos	30
<i>2.1. Área de estudo</i>	30
<i>2.2. Dados hidrológicos e fonte de dados</i>	32
<i>2.3. Análises estatísticas e interpretação</i>	33
3. Resultados	34
<i>3.1. Bacia do rio Jauru (JB)</i>	34
<i>3.2. Bacia do rio Taquari (TB)</i>	35
<i>3.3. Bacia do rio Miranda (MB)</i>	37
4. Discussão	38
Referências	41
CAPÍTULO 3: CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
<i>3.1. Limitações metodológicas do estudo e perspectivas futuras</i>	33
3.1.1. Séries históricas	33
3.1.2. Estações hidrológicas	33
<i>3.2. Conclusão</i>	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ELEVAÇÃO DA BACIA DO ALTO RIO PARAGUAI COM SUB-BACIAS CORRESPONDENTES.	31
FIGURA 2 - BACIA DO ALTO RIO PARAGUAI, COM ZONAS CLIMÁTICAS DE KÖPPEN E SUB-BACIAS CORRESPONDENTES	32
FIGURA 3 - BACIA DO ALTO RIO PARAGUAI COM SUB-BACIAS CORRESPONDENTES, ÁREAS DE ESTUDO E LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E FLUVIOMÉTRICAS.....	33
FIGURA 4 - SÉRIE HISTÓRICA DE PRECIPITAÇÃO ANUAL (A) E VAZÃO (B) DA BACIA DO RIO JAURU, SUA CORRELAÇÃO (C), E SÉRIE HISTÓRICA DE ÁREA INUNDADA NA PLANÍCIE (D).	35
FIGURA 5 - CORRELAÇÃO ENTRE ÁREA INUNDADA ANUAL DA BACIA DO RIO JAURU E A VAZÃO MÉDIA ANUAL À MONTANTE (INFLOW)	35
FIGURA 6 - SÉRIE HISTÓRICA DE PRECIPITAÇÃO ANUAL (A) E VAZÃO (B) DA BACIA DO RIO TAQUARI, SUA CORRELAÇÃO (C), E SÉRIE HISTÓRICA DE ÁREA INUNDADA NA PLANÍCIE (D).	36
FIGURA 7 - CORRELAÇÃO ENTRE ÁREA INUNDADA ANUAL DA BACIA DO RIO JAURU E A VAZÃO MÉDIA ANUAL À MONTANTE (INFLOW) (A), E ENTRE A VAZÃO MÉDIA ANUAL À MONTANTE (Q) E A COTA DO RIO PARAGUAI (B).	36
FIGURA 8 - SÉRIE HISTÓRICA DE PRECIPITAÇÃO ANUAL (A) E VAZÃO (B) DA BACIA DO RIO MIRANDA, SUA CORRELAÇÃO (C), E SÉRIE HISTÓRICA DE ÁREA INUNDADA NA PLANÍCIE (D).	37
FIGURA 9 - CORRELAÇÃO ENTRE ÁREA INUNDADA ANUAL DA BACIA DO RIO MIRANDA E A COTA DO RIO PARAGUAY (A), E VAZÃO DO RIO À MONTANTE (B)	38
FIGURA 10 - SÉRIE HISTÓRICA DAS COTAS ANUAIS MÉDIAS DO RIO PARAGUAI DE 1986-2023 (A), E 1901- 2023 (B).	38
FIGURA 11 - ÁREAS DE INUNDAÇÃO E FREQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO, COM ÁREAS EM AZUL ESCURO INDICANDO MAIOR FREQUÊNCIA.	40

CAPÍTULO 1: CONTEXTUALIZAÇÃO

Aproximadamente 3,6 bilhões de pessoas vivem em localidades de alta vulnerabilidade às mudanças climáticas, que vem sendo notadas por todo o Globo com o aumento da ocorrência de eventos climáticos extremos, que causam devastação substancial e danos irreversíveis em ecossistemas terrestres, aquáticos e criosféricos (IPCC, 2012; IPCC, 2014; IPCC, 2023). Por vezes, após muitos desses eventos extremos, nota-se a pressão sobre a comunidade científica por parte do público e da mídia em atrelar o ocorrido às alterações climáticas antropogênicas ou, ainda, na falta de consenso científico, desacreditar os impactos e a existência das mudanças e variações do clima (STOTT et al., 2015). Porém, um dos relatórios do IPCC (2010) define essa avaliação como *‘o processo de examinar as contribuições relativas de múltiplos fatores causais para uma mudança ou evento a partir de uma atribuição de confiança estatística’* (HEGERL et al., 2010).

O termo “Mudanças Climáticas” é utilizado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para se referir às alterações no estado do clima que podem ser identificadas pelas variações nos parâmetros médios, e/ ou variabilidade de suas propriedades, que persistem por um longo período, normalmente décadas ou mais. As mudanças no clima podem ocorrer por eventos naturais ou antropogênicos, como erupções vulcânicas ou mudanças persistentes e em larga escala induzidas pelo ser-humano na composição da atmosfera, por exemplo.

Assim, as variações inter-decais de parâmetros climáticos, como temperatura, precipitação e evaporação, em sua maioria, são tidas como mudanças climáticas, e as variações interanuais são consideradas como variabilidades climáticas, predominantemente provocadas pelas oscilações das temperaturas do Oceano Pacífico e associados ao fenômeno Oscilação Sul (OS), tais como El Niño e La Niña (TRENBERTH, 2017; XIE, 2024). Há variações inter-decais cujo ciclo temporal pode ser maior que 30 anos, como a Oscilação Decadal do Pacífico, anomalia que modula a intensidade dos eventos de El Niño e La Niña (KAYANO & ANDREOLI, 2007; SILVA et al., 2011), e Oscilação Multidecadal do Atlântico (MARENGO et al., 2021), que são tidas como variabilidades climáticas.

No início dos anos 2000, Salinger (2005) salientou que o desafio do século 21 seria a adaptação à intensificação do aquecimento global, causado pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Diffenbaugh et al. (2017) verificaram que o aquecimento histórico da Terra aumentou a gravidade e a probabilidade do mês e dia mais quentes do ano em mais de 80% da área de estudo observada.

Diversas regiões da América do Sul têm registrado frequentes secas prolongadas, aumento nas temperaturas mínimas, máximas e médias, além de severos e frequentes incêndios (LEAL FILHO et al., 2021; IPCC, 2023; CHAGAS et al., 2022; FERON et al., 2024). A ocorrência dos fenômenos de alteração da circulação e pressão atmosférica do Pacífico, como o El Niño/Oscilação Sul (ENSO), modula a variabilidade interanual de sistemas climáticos no continente, sendo o El Niño um importante contribuinte do aumento de risco de incêndio na região Amazônica, e o La Niña o contribuinte mais influente na região do Gran Chaco e sudoeste do Brasil, onde resulta na redução da precipitação (ROPELEWSKI & HALPERT, 1989; GRIMM, 2004; FERON et al., 2024).

Eventos de El Niño (La Niña) geralmente ocasionam na redução (aumento) da precipitação no Cerrado (MARENGO et al., 2015), mas pode-se ter efeitos locais opostos caso haja alteração em uma combinação de elementos climáticos (como o aquecimento ou resfriamento de uma zona oceânica na costa oposta, ou interferência na circulação de massas de ar atmosféricas) (NA & WANG, 2000; RODRIGUES & MCPHADEN, 2014; CAI et al., 2020). Já na região da Bacia do Alto rio Paraguai (BAP), composta majoritariamente pelos biomas Cerrado (42%) e Pantanal (44%), foi observada uma correlação positiva entre o aquecimento da temperatura da superfície do mar-TSM dos oceanos do hemisfério sul (sinal de El Niño) e o aumento da precipitação na região (THIELEN et al., 2020). No caso da TSM dos oceanos do hemisfério norte, esta correlação é negativa. Esse fato corrobora com os monitoramentos de alagamento da planície pantaneira, que em 1982-1983 e 1997-1998 registrou extensas inundações em anos de El Niño (MARENGO et al., 2015; CORREIA-FILHO et al., 2021). Em contrapartida, o Pantanal registrou anos de seca extrema, com recorde em 2024 (WWF, 2024), também ano de El Niño (2023-2024).

Genta et al. (1998) mostraram que, entre 1960 e 1995, o aumento na média anual da TSM do Oceano Pacífico Equatorial acompanhou o aumento na média da vazão de quatro rios brasileiros, inclusive o rio Paraguai. O aumento da vazão dos rios, porém, não é somente indicativo de ausência dos impactos da mudança climática, tendo em vista sua relação com o desmatamento (TUCCI & CLARKE, 1997; BLÖSCHL et al., 2007).

Os regimes hídricos dos rios se relacionam com as taxas de precipitação e evapotranspiração de sua bacia hidrográfica, e mudanças nas séries históricas de chuva podem refletir posteriores alterações nos padrões das séries de vazão (MARENGO et al., 1998; COLLISCHONN et al., 2001). O fluxo superficial de água doce se relaciona diretamente com a distribuição geográfica das populações urbanas e rurais, e provê recursos para a maior parte das atividades humanas,

como abastecimento doméstico ou industrial, alimentação, irrigação ou geração de energia, além da sua importância ecológica (MALMQVIST & RUNDLE, 2002; IVORY et al., 2019).

No Pantanal brasileiro, por conta da dinâmica dos pulsos de inundação (JUNK, 1989) que caracterizam a planície (POFF et al., 1997; JUNK, 2005; JUNK et al., 2006), o fluxo superficial regula outras atividades características da região, como a navegação, o turismo e as práticas agropecuárias (BRAVO et al., 2013). Apesar de direta, a relação entre precipitação e vazão não é linear: o aumento da precipitação em regiões de solos secos (ou degradados), não necessariamente resultam em maiores vazões nos rios (HIRSCH et al., 2011).

Impactos antropogênicos são frequentemente responsáveis pela alteração estatística de séries temporais de vazão (DETZEL, FERANDES & MINE, 2016), principalmente em casos de desmatamento em larga escala (HOFMANN & JACKSON, 2000; COE et al., 2011; DEBORTOLI et al., 2015; DEBORTOLI et al., 2017; SALMONA et al., 2023), grandes retiradas de água para irrigação ou construção de barragens e reservatórios (HIRSCH et al., 2011; DETZEL et al., 2011). Em muitas das análises hidrológicas, parte-se da premissa de que as precipitações e as vazões anuais são estacionárias (sem variações significativas das médias ao longo do tempo).

Entretanto, em função das significativas variabilidades climáticas recentes nessas séries, é preciso quantificá-las e identificar aspectos e causas da não-estacionariedade. Isso permitiria um melhor planejamento e a correspondente adaptação aos impactos climáticos, através de estatísticas não clássicas das séries históricas (CHAVES & LORENA, 2019), bem como o uso de projeções climáticas (MILLY et al., 2008; DETZEL et al., 2011).

O desmatamento em larga escala altera o ciclo hidrológico e biogeoquímico da paisagem de biomas, através da diminuição da capacidade de infiltração de água no solo, da evapotranspiração e da precipitação, sendo observado redução do volume anual de chuva, atraso e redução da estação chuvosa (BRUIJNZEEL, 2004; OLIVEIRA et al., 2014; DEBORTOLI et al., 2017). Consequentemente, há o aumento do risco de incêndios florestais, que afeta a densidade da vegetação e estimula o processo de *feedback-positivo*, que acelera o ressecamento dos biomas tropicais (HOFFMANN & JACKSON, 2000).

Além disso, a conversão de áreas de vegetação nativa para lavouras e pastagens causa redução na capacidade de infiltração do solo e estimula processos de erosão, a partir do aumento do escoamento superficial de água (BRUIJNZEEL, 1990; COE et al., 2011; BORRELLI et al., 2017), inclusive em áreas úmidas (WOODWARD et al., 2014; COLMAN et al., 2019). O incremento no escoamento superficial, por sua vez, aumenta o risco de enchentes, diminui a

recarga de água subterrânea e reduz a vazão de base, que é responsável pela manutenção da vazão rios durante os períodos de estiagem (CHAGAS et al., 2022).

Existe um crescente e fundamental anseio por pesquisas que expliquem a relação entre a alteração de componentes hidrológicos com as mudanças climáticas, tanto decorrentes de eventos climáticos individuais (DIFFENBAUGH et al., 2017; DEY & MISHRA, 2017) como em projeções climáticas futuras (BRAVO et al., 2013; SPRACKLEN et al., 2012). Determinar a significância de tendências e sua magnitude numa série histórica, ou a probabilidade de ocorrência de determinados eventos, por exemplo, é crucial para detectar os impactos da mudança no clima e da mudança do uso da terra (MARENGO, 1995; MARENGO et al., 1998; CIGIZOGLU et al., 2005; WOODWARD et al., 2014; DEBORTOLI et al., 2015; SOUZA et al., 2015; DEBORTOLI et al., 2017; DIFFENBAUGH et al., 2017; COLMAN et al., 2019).

Campos e Chaves (2020) analisaram a tendência e a variabilidade da série histórica de precipitação no Cerrado de 1977 a 2010, e concluíram que 71% dos 125 postos pluviométricos estudados apresentaram tendência de redução. Entretanto, apenas 18 estações obtiveram redução estatisticamente significativa, sendo três delas no Mato Grosso e uma no Mato Grosso do Sul.

O sul da Amazônia também apresenta tendência de queda na precipitação e aumento da duração do período de estiagem, principalmente em zonas de maior concentração de desmatamento (DEBORTOLI et al., 2015; DEBORTOLI et al., 2017). Spracklen et al. (2012) projetaram para 2050 uma redução das chuvas na bacia amazônica entre 12 e 21% durante a estação chuvosa e seca, respectivamente.

Para a região da bacia do alto rio Paraguai (BAP), Feron et al. (2024) identificaram um aumento médio de 20 para 70 dias de estiagem, altas temperaturas e inflamabilidade, comparando os períodos de 1971 a 2000, e 2001 a 2022. Além disso, os autores registraram que o aumento dos períodos secos ocorreu, majoritariamente, durante as últimas duas décadas, com registros de aceleração da mudança no início dos anos 1990. Desde então, o Pantanal tem registrado meses e anos cada vez mais secos, com a estação chuvosa encurtada, atrasada e valores cada vez menores de áreas inundadas.

A precipitação é determinante para os pulsos de inundação no Pantanal, e é responsável por mais de 60% da variabilidade das áreas inundadas na planície (PEREIRA et al., 2021). Um estudo recente (WWF-BRASIL, 2024) mapeou a superfície mensal de água no Pantanal com uma resolução espacial de 4 metros, entre janeiro de 2021 a abril de 2024, e detalhou a situação de seca do bioma: não houve cheia entre outubro/2023 e abril /2024. Além disso, a seca de 2024 supera a seca extrema de 2021, que propiciou os grandes incêndios observados no período que

queimaram quase 40% do bioma. De acordo com os dados da Coleção 4 do projeto MapBiomias Água (MAPBIOMAS, 2025), a área de superfície de água mapeada no Pantanal em 2024 está 61% abaixo da média histórica do bioma.

A BAP é uma bacia majoritariamente sedimentar que possui duas áreas bem definidas: planície e planalto. A planície abriga toda a extensão do bioma Pantanal, a maior área úmida continental do Planeta, reconhecida como Patrimônio Nacional pela Constituição Brasileira de 1988 e, em 2000, pela Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO), como Patrimônio Natural da Humanidade e Reserva da Biosfera. A região de planalto, onde estão as cabeceiras dos principais rios da Bacia do Rio Paraguai (BAP), é fundamentalmente responsável pela contribuição hídrica (GONÇALVES et al., 2011) e pela contribuição de sedimentos que chegam ao Pantanal, que formam os leques aluviais e fluviais, como o megaleque aluvial do rio Taquari (ASSINE, 2015). A entrada de água no balanço hídrico do Pantanal pela precipitação local é igual ou menor que aquela perdida pelo processo de evapotranspiração (GONÇALVES et al., 2011; ALHO & SILVA, 2012), sendo o restante do balanço hídrico regional modulado às vazões afluentes do planalto.

O clima na bacia é classificado como Tropical Úmido, com temperaturas médias anuais variando de 22,5 a 26,5°C, precipitação média anual variando de 800 a 1.600mm e evapotranspiração média anual de 1.239mm. A distribuição da precipitação não é homogênea: há um aumento gradual nas médias anuais sentido oeste-leste e com maiores concentrações na porção norte, onde há influência amazônica (THIELEN et al., 2020), sendo que as menores médias anuais de precipitação são concentradas na região central do Pantanal (ASSINE et al., 2015).

A época chuvosa acontece entre os meses de outubro e abril, e a inundação na parte Central e Sul do Pantanal pode ocorrer até quatro meses depois do pico de chuva no Norte e levar até seis meses para que o fluxo de água chegue ao rio Paraná, uma vez que os processos de armazenamento e escoamento inerentes ao bioma desaceleram o transporte da água (ALHO & SILVA, 2012; MARENCO et al., 2015; IVORY et al., 2019).

Alterações no regime pluviométrico e no uso e cobertura da terra na região de planalto impactam a distribuição espacial, sazonalidade e persistência das áreas úmidas e demais formações fitofisionômicas na planície (ROQUE et al., 2016). Em média, durante o período de cheia, a área alagada cobre de 60 a 80% de toda a planície pantaneira (ALHO & SABINO, 2012; PEREIRA et al., 2021), sendo que cerca de 40% da planície não é alagável e cerca de 2,5% é permanentemente alagada (PADOVANI, 2010; PEREIRA et al., 2021).

Collischonn, Tucci e Clarke (2001) já haviam observado alterações consistentes na tendência de chuva em toda a BAP, com redução na duração das estações chuvosas. Recentemente, o estudo de tendência climática de Chagas et al. (2022) mostrou que a região da BAP está secando. Thielen et al. (2020) identificaram duas tendências futuras distintas para a BAP: na região de cabeceiras, uma maior frequência de eventos com altas taxas de precipitação e, para a planície pantaneira, prolongados e severos períodos de seca, não significando, necessariamente, um aumento do volume de chuva anual.

Suekame et al. (2021) previram uma redução de 12% na média da precipitação para a bacia do rio Taquari. Outros estudos, realizados em sub-bacias da BAP, também buscaram entender as alterações e tendências das séries históricas de precipitação e vazão de importantes rios contribuintes do rio Paraguai (COLLISCHONN, 2001; MARQUES & RODRIGUEZ, 2022; FERREIRA et al., 2024), inclusive aquelas decorrentes da construção de barragens hidrelétricas (ELY et al., 2020).

Entendendo a complexidade das mudanças e variabilidades climáticas da região de cabeceiras que atingem o Pantanal e seus efeitos na planície à jusante, este trabalho busca analisar as tendências e sinais de persistência das séries históricas de precipitação e vazão hidrológica da região de planalto de três sub-bacias da Bacia do Alto rio Paraguai (BAP) e suas correlações com a superfície de água da planície pantaneira nas respectivas bacias.

Esta dissertação conta com três capítulos: **1) Introdução**, **2) Artigo Científico** em Língua Inglesa: manuscrito submetido à revista *Water*, e **3) Considerações finais**, em que são destacados os principais resultados e pontos relevantes da discussão realizada no artigo, em Português.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a série histórica de 1986 a 2023 de precipitação e vazão da região de planalto de três sub-bacias representativas da BAP (Jauru – MT, Taquari – MT/MS e Miranda – MS), e sua correlação com a superfície de água mapeada nas respectivas regiões de planície.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Identificar tendências nas séries históricas de precipitação e vazão das 3 bacias;
- 2) Analisar a ocorrência de variabilidades ou mudanças nas séries de precipitação e vazão;
- 3) Correlacionar as séries históricas de precipitação e vazão das áreas de planalto com a superfície de água das áreas de planície das bacias estudadas

1.1.3. HIPÓTESES

Com base na revisão de literatura sobre os impactos das variabilidades e mudanças climáticas nas variáveis hidrológicas, e a partir de estudos anteriores realizados para a região do sul da Amazônia, Cerrado e Gran-Chaco, onde se insere a Bacia do Alto Paraguai, foram estipuladas as seguintes hipóteses a serem validadas:

H1.0: não há tendência ou mudança significativa nas séries de precipitação e vazão das bacias

H1.a: há tendência ou mudança significativa nas séries de precipitação e vazão

H2.0: as séries de precipitação e vazão das três sub-bacias não apresentam autocorrelação nem persistência

H2.a: as séries de precipitação e vazão das três sub-bacias apresentam autocorrelação e persistência

H3.0: não há correlação significativa entre as séries de vazão e de superfície de água das planícies das bacias

H3.a: há correlação significativa entre as séries de vazão e de superfície de água das planícies

CAPÍTULO 2: ARTIGO CIENTÍFICO



an Open Access Journal by MDPI



CERTIFICATE OF ACCEPTANCE

The certificate of acceptance for the manuscript (**water-3607002**) titled:
Trends, patterns, and persistence of rainfall, streamflow, and flooded area in the Upper Paraguay Basin
(Brazil)

Authored by:

Maria Eduarda Moraes Sarmiento Coelho; Henrique Marinho Leite Chaves; Maria Rita Souza Fonseca

was accepted in *Water* (ISSN 2073-4441) on 16 May 2025



Basel, May 2025

A handwritten signature in black ink that reads 'S. Tochev'.

Stefan Tochev
Chief Executive Officer

Trends, patterns, and persistence of rainfall, streamflow, and flooded area in the Upper Paraguay Basin (Brazil)

Maria Eduarda Moraes Sarmiento Coelho^{1*}, Henrique Marinho Leite Chaves², Maria Rita Fonseca²

¹ WWF-Brazil, Brasilia-DF, Brazil.

² Watershed Mgt. Laboratory, University of Brasilia, Brasilia-DF, Brazil.

* Correspondence: mariacoelho@wwf.org.br

Abstract: The Pantanal, considered the world's largest floodplain, exhibits hydrological and ecological dynamics that are intrinsically linked to water inflows from the surrounding highlands. While the impacts of large-scale climatic phenomena and land-use changes on hydrological variables within the Upper Paraguay River Basin (UPRB) are acknowledged, their combined effects remain unknown. Recent reductions in precipitation and river discharge have adversely affected both environmental and socioeconomic aspects of the Cerrado (Brazilian Savannah) and Pantanal biomes in Brazil, raising concerns about the long-term sustainability of these important ecosystems. This study analyzes a 37-year hydrological time series (1986-2023) of rainfall, streamflow, and flooded area of three contributing basins of the Pantanal (Jauru-JB, Taquari-TB and Miranda-MB), and reveals distinct hydrological trends influenced by different climate systems. Significant decreasing trends in rainfall and streamflow were observed in the northern JB and TB basins, contrasted by increasing trends in the southern MB basin. Consequently, a declining trend in downstream flooded areas within the Pantanal floodplain was identified. Long-term memory processes (Hurst phenomenon) were identified in the time series of the Pantanal flooded area and also in the Paraguay river stage data. These findings indicate a persistent and aggregated reduction in the Pantanal's hydrologic variables, adversely affecting its water dependent ecology and economy, such as ranching, fishing, and navigation. The study underscores the necessity for adaptative management strategies to tackle the impacts of water surface loss, increased fire risk, and climate variability in the UPRB.

Keywords: floodplain; hydrology; climate change; persistence;

1. Introduction

Several regions of South America have experienced frequent and prolonged droughts in recent decades [1], which were correlated with different global and regional climatic forcings, leading to important ecological and socioeconomic impacts, including widespread forest fires [2–6]. Extreme droughts in Brazil are often linked to the El-Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon, which modulates the precipitation patterns in the continent [4,7–9], becoming more severe when persistence of years with below-average precipitation occurs in a sequence [10].

In the Brazilian Pantanal, the world's largest floodplain located in the Upper Paraguay River Basin (UPRB) in Brazil, a positive correlation was observed between the sea surface temperature (SST) rise of the Southern

(Northern) Hemisphere oceans, and the increase (decrease) in the yearly precipitation [11] and streamflow [12]. Rainfall variability modulates the inter and intra-annual flooding dynamics [13–15] and the combination of various large-scale climate events that can occur simultaneously is a complex process.

It is recognized that the ecological dynamics of the UPRB are regulated by the hydrological relationship between the Pantanal headwaters (highlands) and its floodplains [16,17]. Since precipitation is less than potential evapotranspiration in the floodplain, the regional water balance is modulated by upstream inflows [18,19]. Additionally, the relationship between streamflow and rainfall is not always linear, especially in modified watersheds [20]. In addition to global climate drivers, such as greenhouse effect emissions (GEE) [21], regional forcings, such as large-scale land-use conversion, play an important role in precipitation and streamflow anomalies in the Cerrado biome [22–25], which spans 80% of the Pantanal headwaters [18].

Trends and variabilities were detected in the historical precipitation series of the Brazilian Cerrado between 1977 and 2010, where 71% of the rain gages showed a decreasing trend [26]. Between 1960 and 2021, significant negative trends were found for rainfall during the dry season and the beginning of wet season, with a 50% reduction in total rainfall and the number of rainy days [27]. Similarly, reductions between 6.7 and 8.7% of long-term streamflow in the region were projected for the biome until 2050, due to climate change and deforestation, respectively [24].

Land-use change in the Pantanal highlands leads to significant impacts in the downstream floodplain, including changes in water and sediment influxes [14,28–33]. Since agriculture and cattle ranching are the main economic activity in the Pantanal's upstream areas, they are also impacted by temperature rise and shortening of the rainy season, causing significant economic losses to farmers and municipalities [34]. Therefore, changes in the highland's rainfall and streamflow regimes can impact the size, spatial distribution, seasonality, and persistence in the downstream flooded area [35–37]. During the typical flood season (Dec-May), the average flooded area covers between 60 to 80% of the Pantanal's surface [30,38]. A recent remote sensing study mapped its monthly flooded surface [39] indicating that 2024 was the driest year in a 30-yr long record.

Furthermore, water surface reduction in the Pantanal floodplain has been recorded in the last decades [40] with severe environmental and socioeconomic impacts [14,41,42], encouraging deforestation, agriculture and cattle ranching in the dry areas [43,44], enhancing severe fire events [2–4,36,45], and hindering navigation, fishing and tourism activities [17,46].

Therefore, a better understanding is needed about the relationship between climate change/variability and the alteration of hydrological components of the Pantanal flood pulses, resulting from both climate variability [47–49] and land-use change [50–52]. Considering the variability and the different effects of large-scale climate events, further investigation about the trends, patterns, and persistence of hydrological time series of the Pantanal upstream basins is crucial to assess the impacts of climate and land-use change in the UPRP [33,49,52–56].

This research uses an innovative approach to assess the hydrology of the Upper Paraguay River Basin integrating four statistical analyses—Mann-Kendall trend test, Hurst exponent, Pearson correlation, and autocorrelation function (ACF)—to examine four critical hydrological

variables of a 37-yr long time series, to provide new insights about the upstream contribution of three of its main tributaries to the downstream flooded area.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The Paraguay river basin, which contains the Pantanal floodplain, extends over 1.2 million km² of Argentina, Bolivia, Paraguay and Brazil, being the second largest river basin in South America. Its headwaters are located in the states of Mato Grosso and Mato Grosso do Sul (Brazil) and its main channel extends for approximately 2,700 km until its confluence with the Paraná and La Plata rivers, which drains into the Atlantic Ocean. The Brazilian portion of the Paraguay is known as Upper Paraguay River Basin-UPRB, upstream of the Pantanal floodplain (42%), whose headwaters contain portions of the Amazon (9%) and Cerrado/Savannah (49%) biomes. These upstream basins are the main sources of water and sediment to the downstream Pantanal floodplain [18,32].

This research focused on three UPRB basins: i) The northern Jauru basin, in the southern Amazon region; ii) The central Taquari basin, in the Cerrado biome, and iii) The southern Miranda basin, also in Cerrado, with fragments of the Brazilian Atlantic Forest [Figure 1]. The Jauru basin (JB) spans 5,647 km² in its highland area and 2,202 km² in its floodplain. Its topography is comprised of gentle slopes, with a mean grade of 6.6%. The Taquari basin (TB) highlands span an area of 27,514 km², with its downstream floodplain covers 40,160 km². The basin has gentle topography, with a mean slope of 8.2%. Finally, the Miranda basin (MB) has an area of 15,125 km² in its highlands and of 6,638 km² in its floodplain, being the lowest of the three basins in elevation (300 m), with a mean basin slope of 6.5%. The three study basins are covered by oxidic soils (Orthox) with pastureland and dryland agriculture are the dominant land-uses.

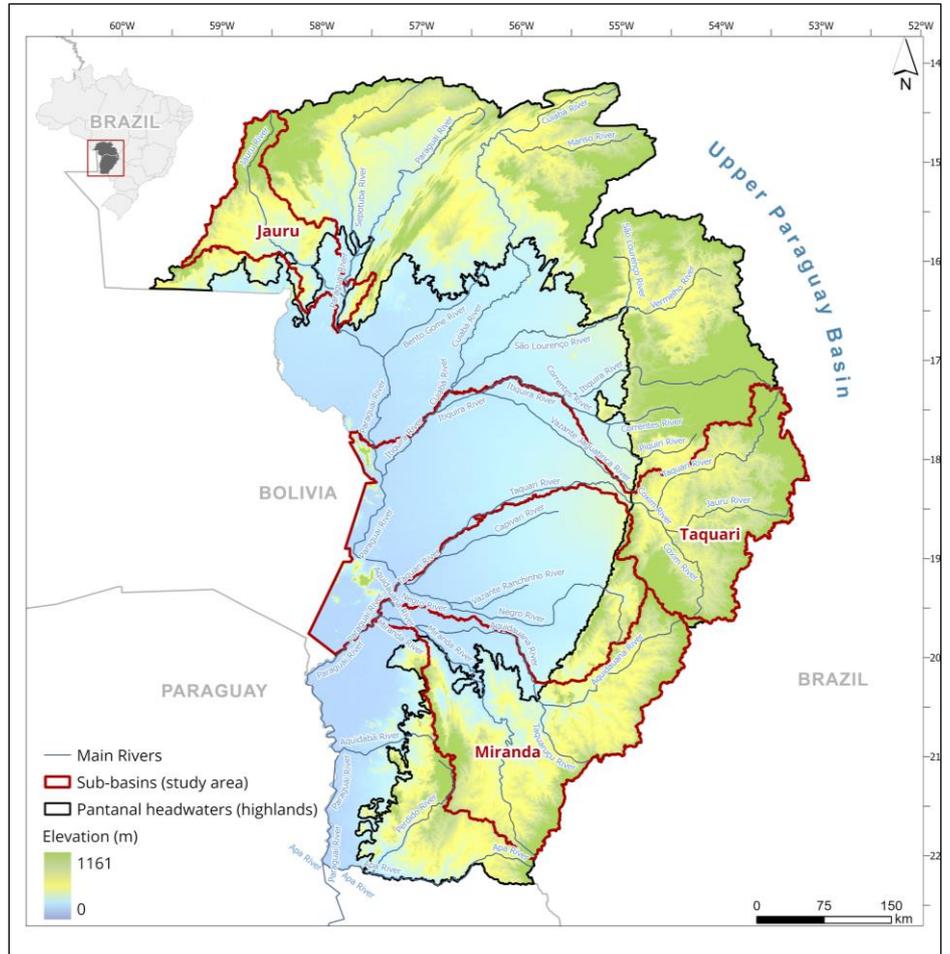


Figure 1 - Elevation of Upper Paraguay River Basin with corresponding sub-basins.

The three studied sub-basins span two different Köppen climate zones [Figure 2]. The Cerrado *Aw* climate is marked by a summer rainy season and dry winters, with annual rainfall ranging from 1,070 mm to 1,720 mm in Jauru basin, and from 1,472 mm to 2,067 mm in Taquari basin. The Miranda basin, with annual rainfall volume ranging between 970 mm and 1,480 mm, is located in the transition zone between the Köppen's *Aw*, *Af* and *Am* climates, the latter characterized by summer monsoons and warmer temperatures [57].

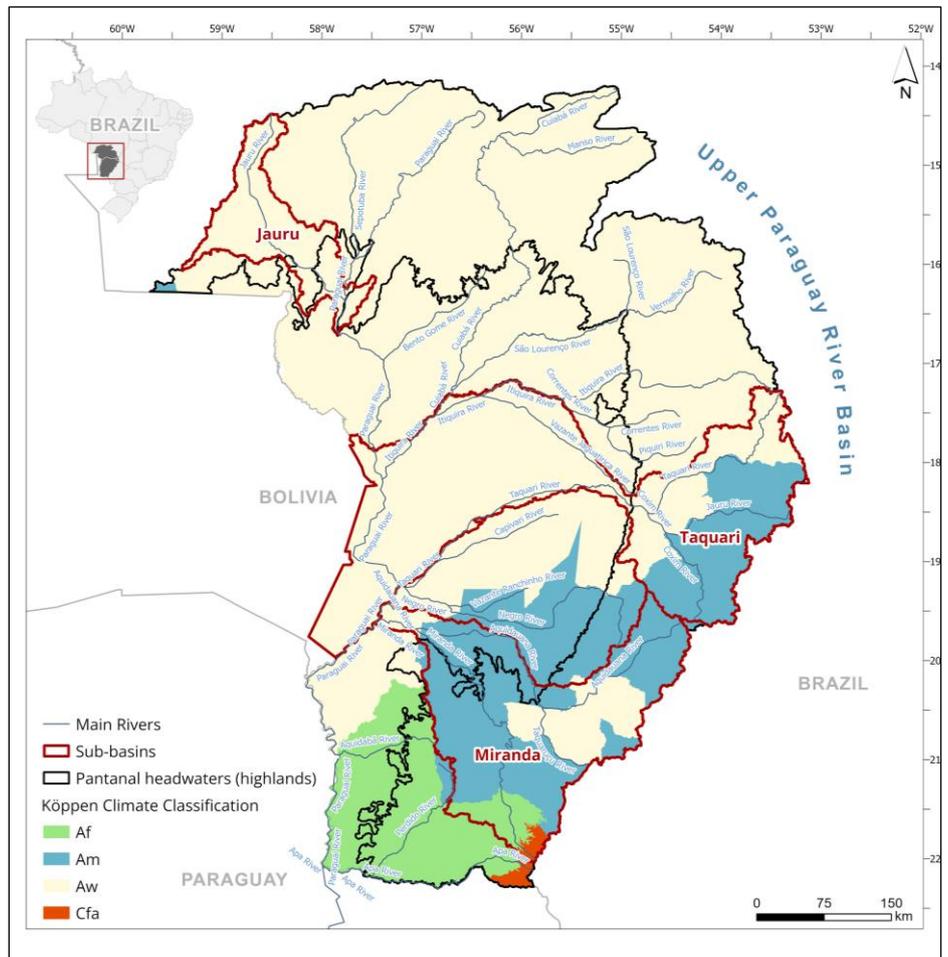


Figure 2 - Upper Paraguay River Basin, with Köppen climate zones and corresponding sub-basins

2.2. Hydrologic data and data sources

The spatial delineation of the three studied basins was obtained by GIS spatial analysis, with the basin outlets coinciding with the corresponding streamflow gaging stations, situated at the frontier between the basins' highlands and the downstream Pantanal floodplain [Figure 3]. The floodplain of each basin was that defined by the Brazilian National Water Agency (NWA).

Monthly streamflow data were obtained from three NWA's gaging stations: #66072000 (Porto Esperidiao), #66870000 (Coxim), and #66910000 (Miranda). Additionally, river stage data from the downstream Paraguay river gage #66825000 (Ladário station) was used to complement the analysis, and to evaluate the influence of eventual back-water effects in the flooded areas.

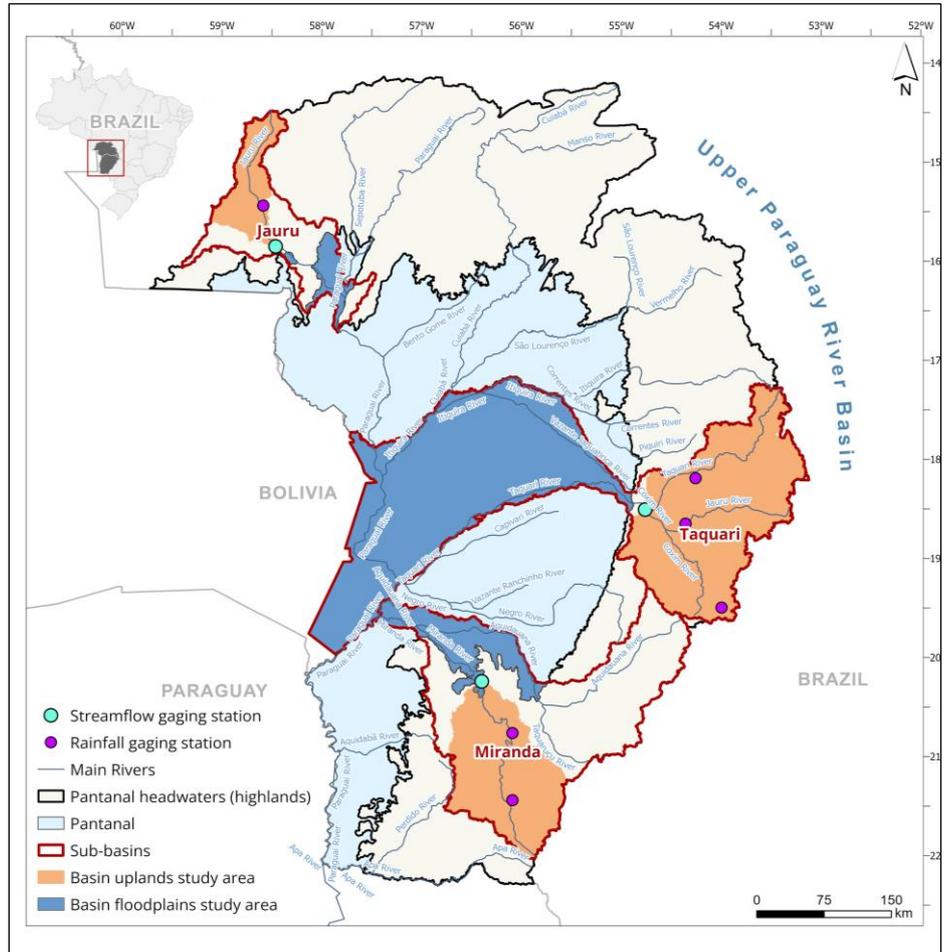


Figure 3 - Upper Paraguay River Basin, with corresponding sub-basins, study areas, and rainfall and streamflow gaging stations.

Data from six rainfall-gage stations, namely #1558004 (Alto Jauru), #1853002 (Cachoeira Pólvora), #1853003 (Jauru), #1954004 (Camapuã), #2156001 (Jardim), and #2056003 (Estrada MT-738) [Figure 3], were used to correct the bias of the gridded precipitation data, downloaded from the *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data-CHIRPS*, which are accurate for the studied area [58–60]. Rainfall bias correction was performed with parametric equations [58].

The monthly water surface (flooded) areas (A) of the Pantanal floodplain, located in the lower reaches of the three studied sub-basins, were obtained from the *MapBiomass Water Project* dataset (Collection #3), via Google Earth Engine® queries.

2.3. Statistical analysis and interpretation

To perform the statistical analysis of the hydrologic time-series, the data were organized into *monthly totals* (precipitation) and *monthly means* (streamflow & flooded area), comprising $N=37$ years, between 1986 and 2023, since at least 30 years of data are necessary to guarantee climatic stability [61]. All hydrologic time-series of the three sub-basins were organized in hydrologic years, starting in October and ending in September of the following year, to avoid the effect of baseflow carry-over between subsequent years [62].

The non-parametric Mann-Kendall (MK) statistic was used to assess the level of stationarity of the hydrologic time series, detecting trends or jumps [5,14,52,53,63,64]. Persistence (long-memory processes) in the hydrologic time series was detected with the Hurst coefficient-H [65], obtained from the rescaled-range (R/S_r) plot [66]. The R/S_r estimate was obtained by the following equations:

$$S_r(t, d) = \sqrt{\sum_{j=1}^{t+d-1} \frac{x_j^2}{d} - \{\bar{x}(t, d)\}^2} \quad (1)$$

$$R(t, d) = \max_{1 < u < d} \left\{ \sum_{j=1}^{t+u-1} x_j - u\bar{x}(t, d) \right\} - \min_{1 < u < d} \left\{ \sum_{j=1}^{t+u-1} x_j - u\bar{x}(t, d) \right\} \quad (2)$$

$$\text{where: } \bar{x}(t, d) = (x_1 + \dots + x_{t+d-1})/d \quad (3)$$

The ratio R (t,d)/Sr (t,d) is the rescaled range, consisting in averaging the values of R/Sr for a number of values of t, for a given time lag (d), and plotting the average results of the series of rainfall, streamflow, or flooded area, against log (d). The slope of the graph of x (d) versus log (d), found using ordinary linear regression, is the Hurst coefficient H [67]. Long-term memory (persistence) occurred in the time series when H > 0.5, whereas a value of H ≤ 0.5 indicated a white noise (randomness) in the time series [64–69].

Additionally, the auto-correlation function (ACF) was performed in the hydrological series of rainfall (P), streamflow (Q) and flooded area (A) to assess the degree of autocorrelation between the observed data, indicating whether the hydrologic behavior of subsequent years was explained by those of previous years. This occurred when the lag-1 and lag-2 ACF were statistically significant, and decreased monotonically [66]. The Mann-Kendall, Hurst, and ACF tests were performed in all hydrological time series using the ‘mannkendall’, ‘hurstexp’ and ‘acf’ scripts, available in the *R-Studio*® platform, respectively.

Finally, the streamflow (Q) time-series of the three basins were correlated with the corresponding flooded areas (A) downstream using the Spearman test [70], to assess the relationship between A & Q, *vis a vis* the back-water effect of the downstream Paraguay river, measured at the Ladário river gage.

3. Results

3.1. Jauru Basin (JB)

The rainfall and streamflow time-series, their correlation, and the dynamics of the flooded area of the Jauru Basin are presented in Figure 4. The decreasing trends observed in the rainfall (P) and streamflow (Q) series (MK = -0.04 and -0.11, respectively) were not statistically significant (p-value = 0.71 and 0.37, respectively). The Hurst coefficient for P and Q was H= 0.5, between white noise and long-memory domains. Annual P and Q in the basin were highly and positively correlated (r = 0.75) [Figure 4c].

On the other hand, there was a significant decreasing trend in the water surface in flooded region of the JB in the period analyzed (MK = -0.55, p-value <0.001) [Figure 4d]. Additionally, the Hurst coefficient (H = 0.69) indicated a strong persistence. Significant auto-correlation was also detected in the basin flooded area, given the significant magnitudes and monotonic decrease of of lags 1 & 2 [66] of the ACF.

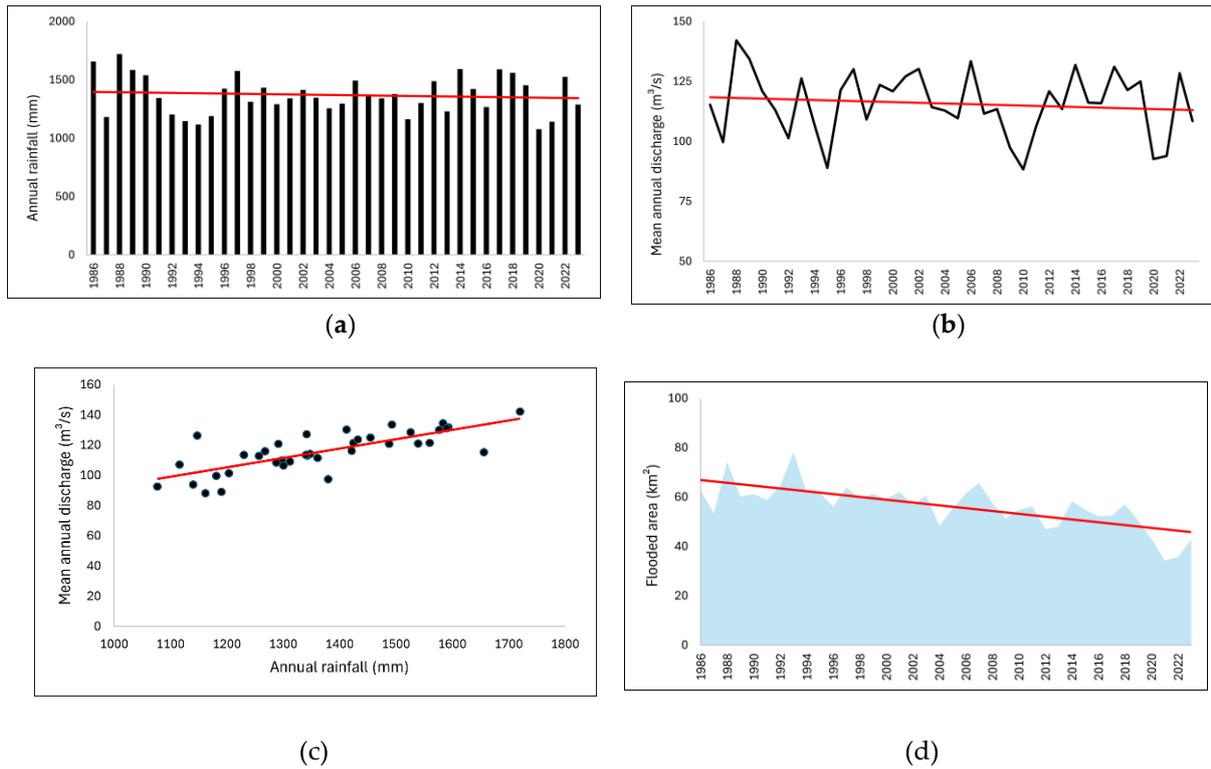


Figure 4 - Time series of annual rainfall (a) and discharge (b) of the Jauru basin, their correlation (c), and the time series of the downstream flooded area (d).

The low correlation found between the flooded area and upstream inflow in the Jauru river basin ($r = 0.06$) [Figure 5] indicates that the former was not influenced by the latter.

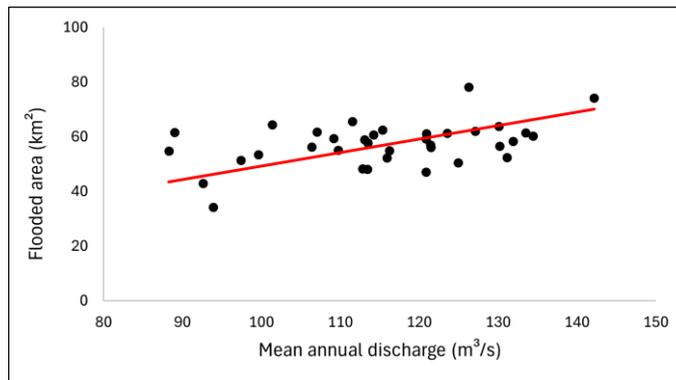


Figure 5 - Correlation between annual flooded area (A) of the Jauru basin and its mean annual discharge upstream (inflow)

3.2. Taquari Basin (TB)

The time-series of rainfall and streamflow, their correlation, and the time-series of the flooded area of the Taquari Basin (TB) are presented in Figures 6 a&b, respectively. Although the rainfall series showed a stationary behavior (MK= -0.12, $p = 0.3$), the streamflow series showed a significant decreasing trend (MK= -0.63, $p < 0.001$). The correlation between P & Q was $r = 0.43$ (Figure 5c), and the time-series of the flooded

area (Figure 6d) was non-stationary (MK = -0.54, $p < 0.001$), with a significant decreasing trend.

The Hurst (H) coefficient for the rainfall time-series was 0.49 (*white noise*), while the H for streamflow and flooded area were 0.68 and 0.69 (*long-memory process*), respectively. The latter was corroborated by the significant lag-1 & lag-2 of the ACF of the Q & A time-series [10,66].

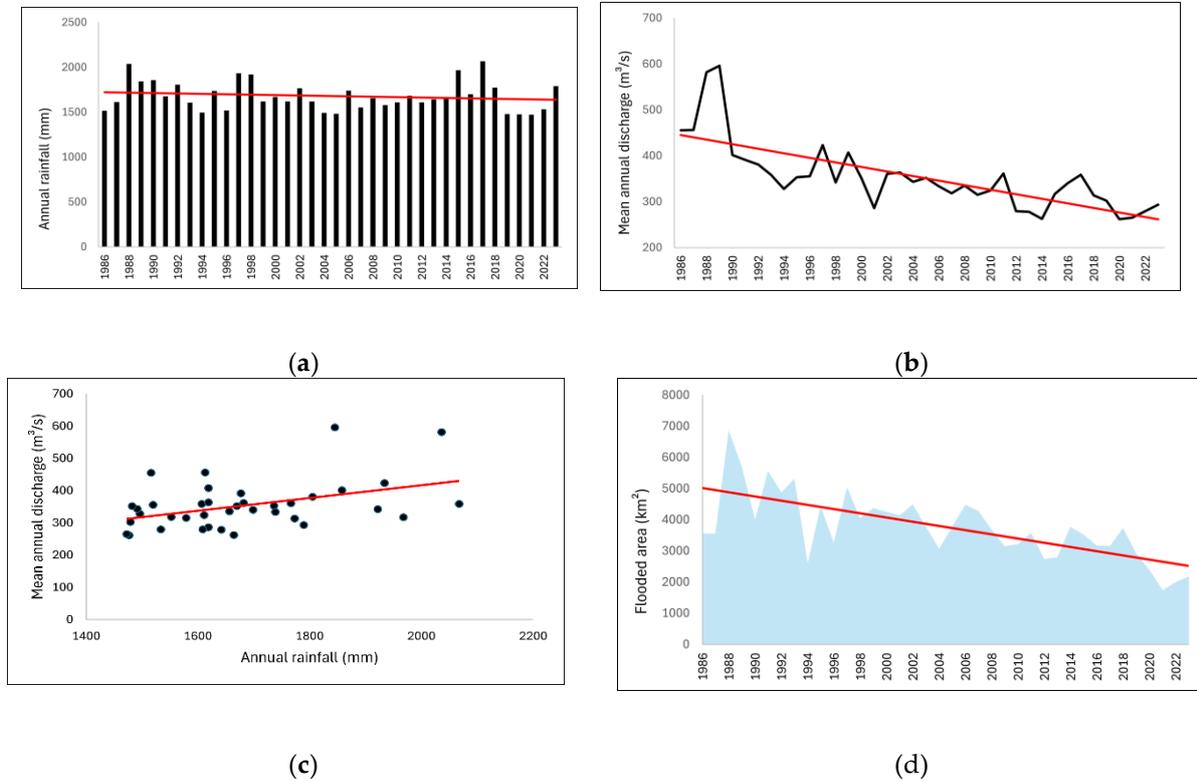


Figure 6 - Time series of annual rainfall (a) and discharge (b) of the Taquari basin, their correlation (c), and the time series of the downstream flooded area (d) between 1986 and 2023.

The positive correlation between TB annual streamflow and the basin's annual flooded area [Figure 7a] was high ($r = 0.72$), indicating that the latter was influenced by the former. Additionally, Figure 7b indicates that the flooded area of the TB was affected by the back-water effect of the Paraguay river [71] given by the significant positive correlation between them ($r = 0.78$).

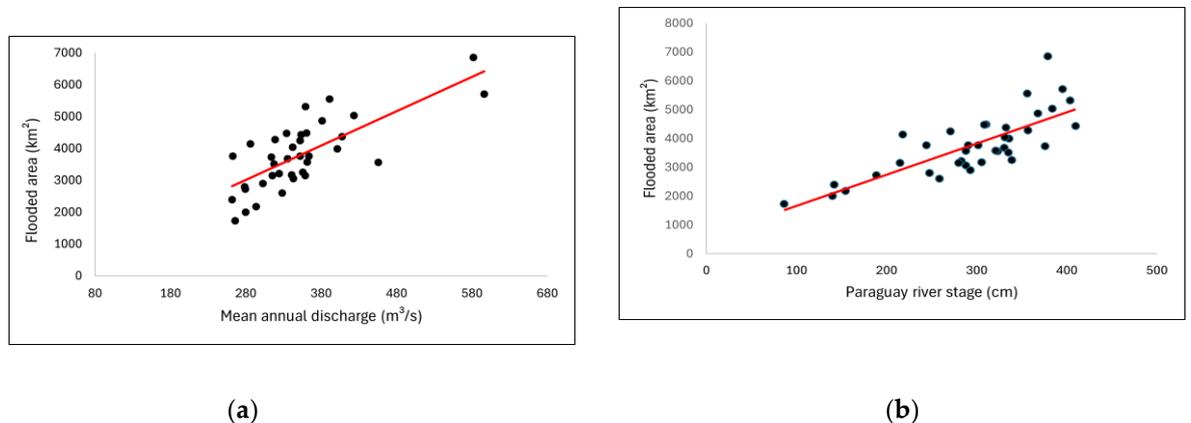


Figure 7 - Correlation between annual flooded area of the Taquari basin and its mean annual inflow (a), and between A and the mean annual river stage (Q) of the Paraguay river (b).

3.3. Miranda Basin (MB)

Figure 8 presents the rainfall (P) and streamflow (Q) time-series, their correlation, and the variation of the downstream flooded area of the Miranda Basin-MB in the studied period. As opposed to the Jauru and Taquari basins, where annual rainfall and streamflow decreased between 1986 and 2023, these hydrologic variables presented an increasing trend in the Miranda basin.

The MK coefficients for the time-series of P & Q were 0.12 and 0.31, and the corresponding p-values were 0.29 and 0.02, respectively. The Hurst coefficient for the P, Q, and A time-series were 0.64, 0.62, and 0.73 respectively, indicating the presence of persistence (long-memory process) in the three hydrologic series. However, only the ACF of the flooded area showed autocorrelation, given by the significant and monotonic decreasing values of lags 1 & 2 of the ACF.

Figure 8c presents the correlation between P & Q ($r = 0.5$), and Figure 8d shows the time-series of the Miranda downstream flooded area, with a significant decreasing trend (MK = -0.59, $p < 0.001$). The opposite trends observed in the series of streamflow and flooded area indicate that the latter was controlled by different processes.

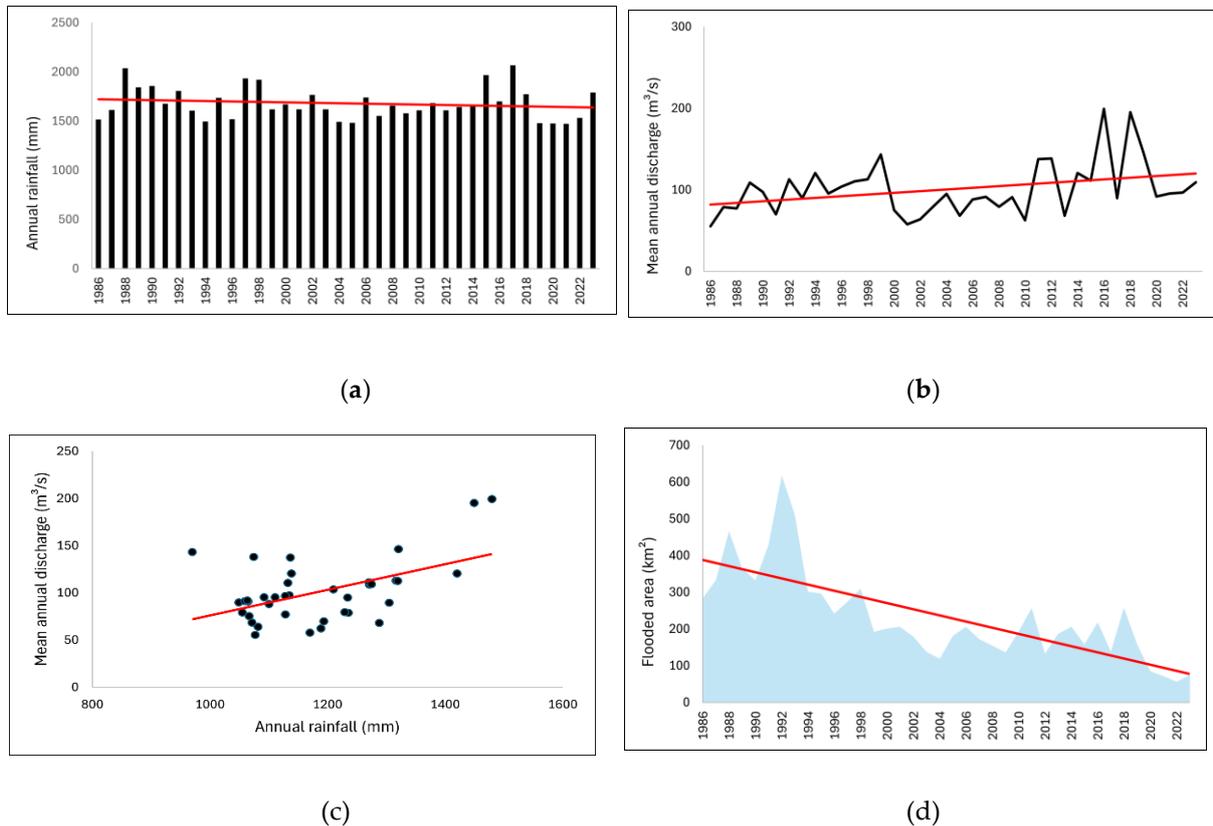
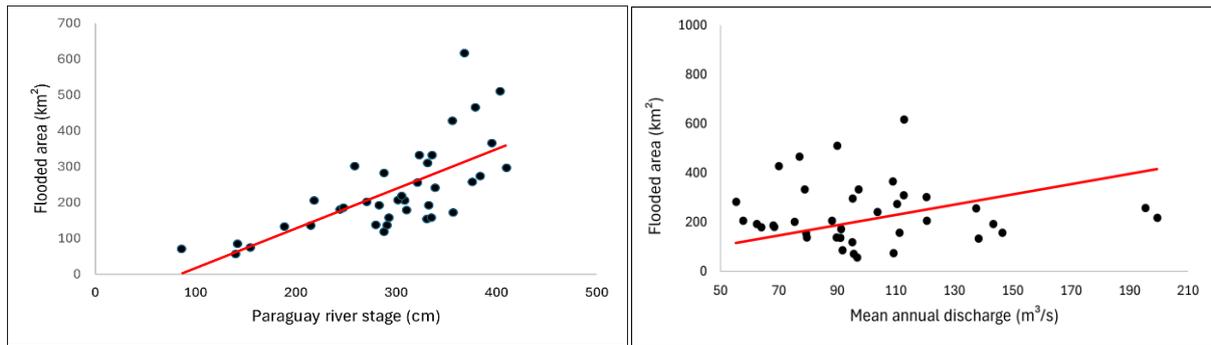


Figure 8 - Time series of annual precipitation (a) and streamflow (b) of the Taquari basin, their correlation (c), and the time series of the downstream flooded area (d), between 1986 and 2023.

The Paraguay river stage and the Miranda basin flooded area [Figure 9a] showed a strong positive correlation ($r = 0.70$), whereas no correlation existed between the Miranda River streamflow and the downstream flooded area ($r = 0.01$) [Figure 9b]. This indicates that the basin flooded area was controlled by the back-water effect of the Paraguay River [71]. Granted, the decreasing trend in Paraguay river stage [Figure 10a] corroborates this phenomenon.

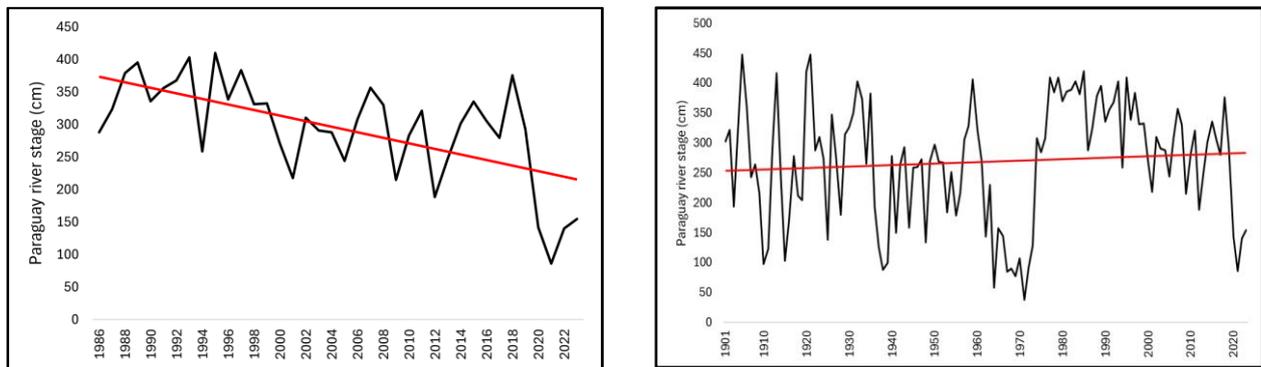


(a)

(b)

Figure 9 - Correlation between the Miranda Basin flooded area with the Paraguay river stage (a), and the upland streamflow (b).

Similarly to the flooded areas, the time series (1983-2023) of the Paraguay river stage showed a significant decreasing trend (MK= -0.41, $p < 0.001$) [Figure 10a] and long-memory, given by the Hurst coefficient of 0.64. As opposed to the recent decades, the extended time series of the Ladario river gage (1901-2023) showed an increasing but not statistically significant trend [Figure 10b] (MK of 0.06, $p = 0.3$), and an even higher Hurst coefficient ($H = 0.69$), indicating strong persistence.



(a)

(b)

Figure 10 - Time-series of the Paraguay river stage from 1986-2023 (a), and 1901-2023 (b).

4. Discussion

Decreasing trends in rainfall and in streamflow were detected in two of the three Pantanal basins analyzed (Jauru & Taquari), with the third (Miranda) presenting increasing trends in the 37 yr-long series, corroborating with the findings of other studies [11]. A possible explanation for this behavior is the different climate systems governing the Pantanal's hydrology [57]. In the case of the Jauru and Taquari basins, in the Cerrado biome, the dominant Köppen climate type is *Aw*, whereas in the southern Miranda basin, situated near the Tropic of Capricorn and to the Atlantic Forest continuum, the dominant climate is *Am*. Recent climate change, arising from increased GHG concentrations, is known to be unique in the septentrional and meridional zones of the southern

tropics, reducing yearly rainfall in the former and increasing it in the latter[72].

The observed hydrologic variability also had unique regional agents. In the Taquari Basin, a pronounced and statistically significant decline in streamflow (MK = -0,63, $p < 0.001$) contrasts with a comparatively modest and non-significant decrease in precipitation (MK = -0.12, $p = 0.3$), indicating a non-linear relationship between rainfall and runoff. Similar patterns have been observed in other Cerrado basins [10, 24], where land use and land cover (LULC) changes have been identified as primary drivers of hydrological alterations [24].

In tropical and subtropical regions, LULC modifications—such as deforestation and agricultural expansion—can significantly impact soil permeability, leading to increased surface runoff and reduced baseflow[73,74]. These effects are particularly pronounced in small-scale catchments, where the hydrological response is more sensitive to land cover changes [75,76]. Given that streamflow data in this study came from single gauging stations, it is plausible that LULC changes have contributed to the observed streamflow reductions in TB, resulting from a positive-feedback climatic process. Hoffmann & Jackson [22] found that that total deforestation of the Brazilian savannah would reduce yearly precipitation and streamflow in 10%.

Analysis of the Paraguay River stage time series from 1901 to 2023 reveals no statistically significant trend (MK = 0.06, $p = 0.3$). However, a decreasing trend is evident for the period from 1986 to 2023 (MK = -0.41, $p < 0,001$). Both periods exhibit long-term persistence, as indicated by Hurst coefficients of 0.69 and 0.64, respectively, suggesting that natural climate variability cycles influence fluctuations in the Paraguay river stage.

In the long duration series of the Paraguay river stage, the variability and persistence of both dry and wet years corroborate the findings in this research, where significant long-memory ($H > 0.5$) was detected in both streamflow of the TB and MB, and flooded areas of the three Upper Paraguay River basins analyzed [10,64,78],

Since 2018/19 the Pantanal floodplain has been in a spell of dry years, causing a record of low rainfall volumes and extreme fires events [45]. This rupture between wet and dry seasons was explained by a complex combination of various teleconnection indices, such as the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), which cycles from 60 to 90 years, Pacific Decadal Oscillation (PDO) and ENSO phenomena), but was mainly triggered by the anomalous warm of the tropical North Atlantic [11,46].

Despite the differences in the hydrology of the three studied basins, their flooded areas showed a systematically and significant decreasing trend in the studied period (MK(JB) = -0.55, MK(TB) = -0.54, MK(MB) = -0.59, $p < 0.001$). This can be observed in Figure 11, indicating the relative flood frequency in the Pantanal floodplain, in recent 10-year periods, the latter being much drier than the former [39,40,78].

In the case of the TB and MB, their flooded areas were positively correlated with the downstream Paraguay river stage, indicating that a back-water effect of the latter also contributed to the flooding of the lower reaches of the two basins [71,79]. The same correlation was found for JB, but there is not a cause-effect relationship in the latter, owing it to the reduced flow contribution of the Jauru river to the Paraguay river stage.

While the Miranda Basin-MB presented positive P and Q trends, basins located in the northern and central region of the UPRB (JB and TB)

had a major influence on the flow regime of the Pantanal floodplain, possibly to their large drainage areas and rainfall volumes [16, 17, 79].

Although it a positive relationship was expected between rainfall volumes and flooded areas in the Pantanal floodplain, this correlation was weaker than the one obtained between annual rainfall and the Paraguay river stage at Ladario. As reported previously [38], the annual rainfall in the floodplain's upland region is not capable of explaining the variability of the downstream flooded areas, the latter being better correlated with the rainfall volumes between December to April. Also, annual streamflow time series usually show weaker correlations than monthly series in the basin [80].

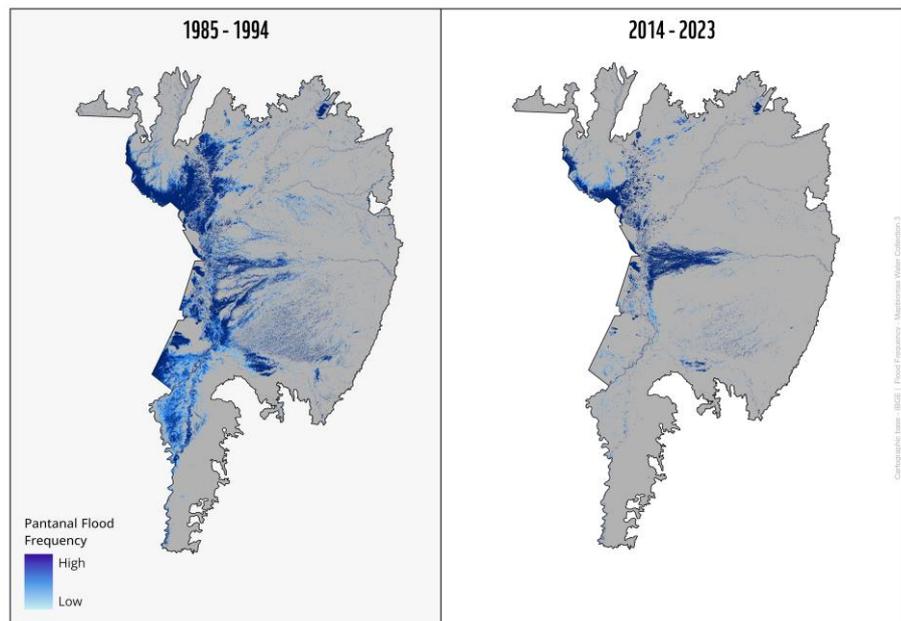


Figure 11 - Flooded areas and flood frequency in the Pantanal biome, with dark blue colors indicating permanent flooded areas.

There is evidence that the retraction of flooded areas in the Pantanal floodplain favors the expansion of cattle ranching [43,46] and agriculture [81], reduces navigability and transportation (notably soybeans and minerals), and tourism activities [38,46,79]. Reduced flooded areas also contribute to an increase in the number of extreme fire events [2-4, 39, 45], induce positive-feedback process [22], diminishes social and water resilience [44,82] and directly affects the survival of fauna and flora [39,45]. Additionally, since wetlands are among the most effective environments for carbon sequestration, the reduction of flooded areas contributes to a net carbon loss in the system [25,83-86].

Hence, the long-memory process and negative trends identified in the flooded area time-series of the Pantanal highlights the importance of precautionary and adaptation measures during the dry season [87,88], especially fire management programs [45,89], and efforts to improve the limited hydrological and meteorological monitoring stations [16,90].

5. Conclusions

Significant trends, correlations, and persistences were found in the 37 yr-long hydrologic time series of rainfall, streamflow, Paraguay river

stage (Ladário) and flooded areas of three contributing basins of the Pantanal floodplain, in Brazil. In the northern and central basins (Jauru and Taquari), decreasing trends of rainfall and streamflow were detected. These basins are major contributors to the Paraguay river flood compared to the southern Miranda basin. Therefore, the increase of rainfall and streamflow series found in the latter was not reflected in the increase of water surface in its floodplain, but rather a back-water effect of the Paraguay river itself.

The historical series of flooded areas in the three basins showed a strong persistence (long-memory) in the studied period, which indicates that anomalous years of droughts or floods occur in a sequence, and may last from a few years to decades, as confirmed by the 120 yr-long time-series of the Paraguay river stage.

As climate change exacerbates large-scale climate events and intensifies natural regional variability, it is strongly recommended that strategies of safeguarding the Pantanal floodplain be implemented, including the strengthening of fire control and water security based on adaptative management principles, all following the watershed management perspective, as established in the Brazilian Water Policy.

Author Contributions: Conceptualization, investigation and methodology, M.E.M.S.C. and H.M.L.C.; Data collection and writing – original draft preparation, M.E.M.S.C.; Writing – review and editing, M.E.M.S.C.; H.M.L.C. and M.R.F.; References review: M.R.F.; Supervision and final editing, H.M.L.C.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: River discharge, observed rainfall and Paraguay river stage (Ladário ruler) are available at <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>>. CHIRPS (<<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>>) and MapBiomias Water Project (<<https://plataforma.agua.mapbiomas.org/water/brazil>>) have open access to their datasets and were obtained using Google Earth Engine platform.

Acknowledgments: The authors thank the Forestry Engineering Department of the University of Brasília and WWF-Brazil for their technical and logistical support, also the two anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Hao, Z.; Hao, F.; Singh, V.P.; Zhang, X. Changes in the Severity of Compound Drought and Hot Extremes over Global Land Areas. *Environ. Res. Lett.* **2018**, *13*, doi:10.1088/1748-9326/aaee96.
2. Libonati, R.; DaCamara, C.C.; Peres, L.F.; Sander de Carvalho, L.A.; Garcia, L.C. Rescue Brazil's Burning Pantanal Wetlands. *Nature* **2020**, *588*, 217–219, doi:10.1038/d41586-020-03464-1.
3. Leal Filho, W.; Azeiteiro, U.M.; Salvia, A.L.; Fritzen, B.; Libonati, R. Fire in Paradise: Why the Pantanal Is Burning. *Environ. Sci. Policy* **2021**, *123*, 31–34, doi:10.1016/j.envsci.2021.05.005.
4. Chagas, V.B.P.; Chaffe, P.L.B.; Blöschl, G. Climate and Land Management Accelerate the Brazilian Water Cycle. *Nat. Commun.* **2022**, *13*, doi:10.1038/s41467-022-32580-x.
5. Feron, S.; Cordero, R.R.; Damiani, A.; MacDonell, S.; Pizarro, J.; Goubanova, K.; Valenzuela, R.; Wang, C.; Rester, L.; Beaulieu, A. South America Is Becoming Warmer, Drier, and More Flammable. *Commun. Earth Environ.* **2024**, *5*, 1–10, doi:10.1038/s43247-024-01654-7.
6. Vidal-Riveros, C.; Currey, B.; McWethy, D.B.; Bieng, M.A.N.; Souza-Alonso, P. Spatiotemporal Analysis of Wildfires and Their Relationship with Climate and Land Use in the Gran Chaco and Pantanal Ecoregions. *Sci. Total Environ.* **2024**, *955*, 176823, doi:10.1016/j.scitotenv.2024.176823.
7. Ropelewski, C.H.; Halpert, M.S. Precipitation Patterns Associated with the High Index Phase of the Southern Oscillation. *J. Clim.* **1989**, *2*, 268–284.
8. Grimm, A.M. How Do La Niña Events Disturb the Summer Monsoon System in Brazil? *Clim. Dyn.* **2004**, *22*, 123–138, doi:10.1007/s00382-003-0368-7.
9. Cai, W.; McPhaden, M.J.; Grimm, A.M.; Rodrigues, R.R.; Taschetto, A.S.; Garreaud, R.D.; Dewitte, B.; Poveda, G.; Ham, Y.G.; Santoso, A.; et al. Climate Impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nat. Rev. Earth Environ.* **2020**, *1*, 215–231, doi:10.1038/s43017-020-0040-3.

10. Chaves, H.M.L.; Lorena, D.R. Assessing Reservoir Reliability Using Classical and Long-Memory Statistics. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2019**, *26*, 100641, doi:10.1016/j.ejrh.2019.100641.
11. Thielen, D.; Schuchmann, K.L.; Ramoni-Perazzi, P.; Marquez, M.; Rojas, W.; Quintero, J.I.; Marques, M.I. Quo Vadis Pantanal? Expected Precipitation Extremes and Drought Dynamics from Changing Sea Surface Temperature. *PLoS One* **2020**, *15*, 1–25, doi:10.1371/journal.pone.0227437.
12. Genta, J.L.; Perez-Iribarren, G.; Mechoso, C.R. A Recent Increasing Trend in the Streamflow of Rivers in Southeastern South America. *J. Clim.* **1998**, *11*, 2858–2862, doi:10.1175/1520-0442(1998)011<2858:ARITIT>2.0.CO;2.
13. Krepper, C.M.; García, N.O.; Jones, P.D. Paraguay River Basin Response to Seasonal Rainfall. *Int. J. Climatol.* **2006**, *26*, 1267–1278, doi:10.1002/joc.1313.
14. Bergier, I. Effects of Highland Land-Use over Lowlands of the Brazilian Pantanal. *Sci. Total Environ.* **2013**, *463–464*, 1060–1066, doi:10.1016/j.scitotenv.2013.06.036.
15. Pobocikova, I.; de Souza, A.; Abreu, M.C.; de Oliveira-Júnior, J.F.; Dos Santos, C.M.; Lins, T.M.P.; Aristone, F.; Ramos, P.L. The Impacts of Climate Change on Rainfall Modeling in the Pantanal of Mato Grosso Do Sul. *Acta Sci. - Technol.* **2021**, *43*, doi:10.4025/ACTASCITECHNOL.V43I1.55112.
16. Collischonn, W.; Tucci, C.E.M.; Clarke, R.T. Further Evidence of Changes in the Hydrological Regime of the River Paraguay: Part of a Wider Phenomenon of Climate Change? *J. Hydrol.* **2001**, *245*, 218–238, doi:10.1016/S0022-1694(01)00348-1.
17. Wantzen, K.M.; Girard, P.; Roque, F.O.; Nunes da Cunha, C.; Chiaravallotti, R.M.; Nunes, A. V.; Bortolotto, I.M.; Guerra, A.; Pauliquevis, C.; Friedlander, M.; et al. The Pantanal: How Long Will There Be Life in the Rhythm of the Waters? In *River culture: life as a dance to the rhythm of the waters*; UNESCO, 2023; pp. 497–536.
18. Gonçalves, H.C.; Mercante, M.A.; Santos, E.T. Hydrological Cycle. *Dict. Phys. Geogr. Fourth Ed.* **2016**, *71*, 272–273.
19. Alho, C.J.R.; Silva, J.S.V. Effects of Severe Floods and Droughts on Wildlife of the Pantanal Wetland (Brazil)-a Review. *Animals* **2012**, *2*, 591–610, doi:10.3390/ani2040591.
20. Hirsch, R.M. A Perspective on Nonstationarity and Water Management. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **2011**, *47*, 436–446, doi:10.1111/j.1752-1688.2011.00539.x.
21. IPCC *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; 2023;
22. Hoffmann, W.A.; Jackson, R.B. Vegetation-Climate Feedbacks in the Conversion of Tropical Savanna to Grassland. *J. Clim.* **2000**, *13*, 1593–1602, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1593:VCFITC>2.0.CO;2.
23. Oliveira, P.T.; Nearing, M.A.; Moran, S.M.; Goodrich, D.C.; Wendland, E.; Gupta, H. V. Trends in Water Balance Components across the Brazilian Cerrado. **2014**, *20*, 7100–7114, doi:10.1002/2013WR015202.
24. Salmona, Y.B.; Matricardi, E.A.T.; Skole, D.L.; Silva, J.F.A.; Coelho Filho, O. de A.; Pedlowski, M.A.; Sampaio, J.M.; Castrillón, L.C.R.; Brandão, R.A.; Silva, A.L. da; et al. A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. *Sustain.* **2023**, *15*, doi:10.3390/su15054251.
25. Guerra, A.; Resende, F.; Bergier, I.; Fairbrass, A.; Bernardino, C.; Centurião, D.A.S.; Bolzan, F.; Marcel, G.; Rosa, I.M.D.; da Silva, J.C.S.; et al. Land Use and Regulating Ecosystem Services Scenarios for the Brazilian Pantanal and Its Surroundings under Different Storylines of Future Regional Development. *Conserv. Sci. Pract.* **2025**, doi:10.1111/csp2.70012.
26. Campos, J. de O.; Chaves, H.M.L. Trends and Variabilities in the Historical Series of Monthly and Annual Precipitation in Cerrado Biome in the Period 1977-2010. *Rev. Bras. Meteorol.* **2020**, *35*, 157–169, doi:10.1590/0102-7786351019.
27. Hofmann, G.S.; Silva, R.C.; Weber, E.J.; Barbosa, A.A.; Oliveira, L.F.B.; Alves, R.J.V.; Hasenack, H.; Schossler, V.; Aquino, F.E.; Cardoso, M.F. Changes in Atmospheric Circulation and Evapotranspiration Are Reducing Rainfall in the Brazilian Cerrado. *Sci. Rep.* **2023**, *13*, doi:10.1038/s41598-023-38174-x.
28. Hamilton, S.K. Human Impacts on Hydrology in the Pantanal Wetland of South America. *Water Sci. Technol.* **2002**, *45*, 35–44, doi:10.2166/wst.2002.0377.
29. Mercante, M.A.; Rodrigues, S.C.; Ross, J.L.S. Geomorphology and Habitat Diversity in the Pantanal. *Brazilian J. Biol.* **2011**, *71*, 233–240, doi:10.1590/s1519-69842011000200002.
30. Alho, C.J.R.; Sabino, J. Seasonal Pantanal Flood Pulse: Implications for Biodiversity Conservation – a Review. *Oecologia Aust.* **2012**, *16*, 958–978, doi:10.4257/oeco.2012.1604.17.
31. de Oliveira, M.D.; Calheiros, D.F.; Hamilton, S.K. Mass Balances of Major Solutes, Nutrients and Particulate Matter as Water Moves through the Floodplains of the Pantanal (Paraguay River, Brazil). *Rev. Bras. Recur. Hídricas* **2019**, *24*, doi:10.1590/2318-0331.231820170169.
32. Assine, M.L.; Macedo, H.A.; Stevaux, J.C.; Bergier, I.; Padovani, C.R.; Silva, A. Avulsive Rivers in the Hydrology of the Pantanal Wetland. *Handb. Environ. Chem.* **2016**, *37*, 83–110, doi:10.1007/698_2015_351.
33. Colman, C.B.; Oliveira, P.T.S.; Almagro, A.; Soares-Filho, B.S.; Rodrigues, D.B.B. Effects of Climate and Land-Cover Changes on Soil Erosion in Brazilian Pantanal. *Sustain.* **2019**, *11*, doi:10.3390/su11247053.
34. Leite-Filho, A.T.; Soares-Filho, B.S.; Oliveira, U.; Coe, M. Intensification of Climate Change Impacts on Agriculture in the Cerrado Due to Deforestation. *Nat. Sustain.* **2024**, doi:10.1038/s41893-024-01475-8.
35. Bravo, J.M.; Collischonn, W.; da Paz, A.R.; Allasia, D.; Domecq, F. Impact of Projected Climate Change on Hydrologic Regime of the Upper Paraguay River Basin. *Clim. Change* **2014**, *127*, 27–41, doi:10.1007/s10584-013-0816-2.
36. Roque, F.O.; Ochoa-Quintero, J.; Ribeiro, D.B.; Sugai, L.S.M.; Costa-Pereira, R.; Lourival, R.; Bino, G.

- Upland Habitat Loss as a Threat to Pantanal Wetlands. *Conserv. Biol.* **2016**, *30*, 1131–1134, doi:10.1111/cobi.12713.
37. Pinheiro Noveli, R.A.; Lima de Paula Silva, B.; Escalante Pereira, L. Dinâmica Espacial Das Inundações Do Pantanal Sul. *Rev. GeoPantanal* **2023**, *18*, 74–85, doi:10.55028/geop.v18i34.18778.
 38. Pereira, G.; Ramos, R. de C.; Rocha, L.C.; Brunsell, N.A.; Merino, E.R.; Mataveli, G.A.V.; Cardozo, F. da S. Rainfall Patterns and Geomorphological Controls Driving Inundation Frequency in Tropical Wetlands: How Does the Pantanal Flood? *Prog. Phys. Geogr.* **2021**, *45*, 669–686, doi:10.1177/0309133320987719.
 39. WWF Brazil Early Warning to Mitigate the Impacts of Drought in the Pantanal Available online: <https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/0107-nota-tecnica---crise-hidrica.pdf>.
 40. Moraes, E.C.; Pereira, G.; Da, F.; Cardozo, S. *EVALUATION OF REDUCTION OF PANTANAL WETLANDS IN 2012*;
 41. Junk, W.J. Flood Pulsing and the Linkages between Terrestrial, Aquatic, and Wetland Systems. In Proceedings of the SIL Proceedings; 2005; Vol. 29 (1), pp. 11–38.
 42. Ivory, S.J.; McGlue, M.M.; Spera, S.; Silva, A.; Bergier, I. Vegetation, Rainfall, and Pulsing Hydrology in the Pantanal, the World's Largest Tropical Wetland. *Environ. Res. Lett.* **2019**, *14*, doi:10.1088/1748-9326/ab4ffe.
 43. Araujo, A.G. de J.; Obregón, G.O.; Sampaio, G.; Monteiro, A.M. V.; da Silva, L.T.; Soriano, B.; Padovani, C.; Rodriguez, D.A.; Maksic, J.; Farias, J.F.S. Relationships between Variability in Precipitation, River Levels, and Beef Cattle Production in the Brazilian Pantanal. *Wetl. Ecol. Manag.* **2018**, *26*, 829–848, doi:10.1007/s11273-018-9612-0.
 44. Chiaravalloti, R.M.; Freitas, D.M.; de Souza, R.A.; Biswas, S.; Markos, A.; Manfroi, M.N.; Dyble, M. Resilience of Social-Ecological Systems: Drastic Seasonal Change Is Associated with Economic but Not Social Flexibility among Fishers in the Brazilian Pantanal. *Ecol. Soc.* **2021**, *26*, doi:10.5751/ES-12433-260230.
 45. Garcia, L.C.; Szabo, J.K.; de Oliveira Roque, F.; de Matos Martins Pereira, A.; Nunes da Cunha, C.; Damasceno-Júnior, G.A.; Morato, R.G.; Tomas, W.M.; Libonati, R.; Ribeiro, D.B. Record-Breaking Wildfires in the World's Largest Continuous Tropical Wetland: Integrative Fire Management Is Urgently Needed for Both Biodiversity and Humans. *J. Environ. Manage.* **2021**, *293*.
 46. Marengo, J.A.; Cunha, A.P.; Cuartas, L.A.; Deusdará Leal, K.R.; Broedel, E.; Seluchi, M.E.; Michelin, C.M.; De Praga Baião, C.F.; Chuchón Angulo, E.; Almeida, E.K.; et al. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Front. Water* **2021**, *3*, doi:10.3389/frwa.2021.639204.
 47. Spracklen, D. V.; Arnold, S.R.; Taylor, C.M. Observations of Increased Tropical Rainfall Preceded by Air Passage over Forests. *Nature* **2012**, *489*, 282–285, doi:10.1038/nature11390.
 48. Dey, P.; Mishra, A. Separating the Impacts of Climate Change and Human Activities on Streamflow: A Review of Methodologies and Critical Assumptions. *J. Hydrol.* **2017**, *548*, 278–290, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.03.014.
 49. Diffenbaugh, N.S.; Singh, D.; Mankin, J.S.; Horton, D.E.; Swain, D.L.; Touma, D.; Charland, A.; Liu, Y.; Haugen, M.; Tsiang, M.; et al. Quantifying the Influence of Global Warming on Unprecedented Extreme Climate Events. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2017**, *114*, 4881–4886, doi:10.1073/pnas.1618082114.
 50. Marengo, J.A. Variations and Change in South American Streamflow. *Clim. Change* **1995**, *31*, 99–117, doi:10.1007/BF01092983.
 51. Woodward, C.; Shulmeister, J.; Larsen, J.; Jacobsen, G.E.; Zawadzki, A. The Hydrological Legacy of Deforestation on Global Wetlands. *Science (80-.)*. **2014**, *346*, 844–847, doi:10.1126/science.1260510.
 52. Debortoli, N.S.; Dubreuil, V.; Hirota, M.; Filho, S.R.; Lindoso, D.P.; Nabucet, J. Detecting Deforestation Impacts in Southern Amazonia Rainfall Using Rain Gauges. *Int. J. Climatol.* **2017**, *37*, 2889–2900, doi:10.1002/joc.4886.
 53. Marengo, J.A.; Tomasella, J.; Uvo, C.R. Trends in Streamflow and Rainfall in Tropical South America: Amazonia, Eastern Brazil, and Northwestern Peru. *J. Geophys. Res. Atmos.* **1998**, *103*, 1775–1783, doi:10.1029/97JD02551.
 54. S. Debortoli, N.; Dubreuil, V.; Funatsu, B.; Delahaye, F.; de Oliveira, C.H.; Rodrigues-Filho, S.; Saito, C.H.; Fetter, R. Rainfall Patterns in the Southern Amazon: A Chronological Perspective (1971–2010). *Clim. Change* **2015**, *132*, 251–264, doi:10.1007/s10584-015-1415-1.
 55. Cigizoglu, H.K.; Bayazit, M.; Önöz, B. Trends in the Maximum, Mean, and Low Flows of Turkish Rivers. *J. Hydrometeorol.* **2005**, *6*, 280–290, doi:10.1175/JHM412.1.
 56. Souza, S.A. De; Matos, B.A.; Troger, F.H.; De, T.L.L. Stationarity Analysis of Streamflow Time Series at Paraguai Basin. In Proceedings of the XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos; 2015; pp. 1–8.
 57. Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; De Moraes Gonçalves, J.L.; Sparovek, G. Köppen's Climate Classification Map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* **2013**, *22*, 711–728, doi:10.1127/0941-2948/2013/0507.
 58. Gudmundsson, L.; Bremnes, J.B.; Haugen, J.E.; Engen-Skaugen, T. Technical Note: Downscaling RCM Precipitation to the Station Scale Using Statistical Transformations – A Comparison of Methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2012**, *16*, 3383–3390, doi:10.5194/hess-16-3383-2012.
 59. Cavalcante, R.B.L.; Ferreira, D.B. da S.; Pontes, P.R.M.; Tedeschi, R.G.; da Costa, C.P.W.; de Souza, E.B. Evaluation of Extreme Rainfall Indices from CHIRPS Precipitation Estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmos. Res.* **2020**, *238*, 104879, doi:10.1016/j.atmosres.2020.104879.
 60. Correia Filho, W.L.F.; de Oliveira-Júnior, J.F.; da Silva Junior, C.A.; Santiago, D. de B. Influence of the El Niño–Southern Oscillation and the Synoptic Systems on the Rainfall Variability over the Brazilian Cerrado

- via Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station Data. *Int. J. Climatol.* **2022**, *42*, 3308–3322, doi:10.1002/joc.7417.
61. WMO *Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals*; Ginebra, Switzerland, 1989;
 62. Dahmen, E.R.; Hall, M.J. *Screening of Hydrological Data: Tests for Stationarity and Relative Consistency*; International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI: Wageningen, 1990; ISBN 9070754231.
 63. Libiseller, C.; Grimvall, A. Performance of Partial Mann-Kendall Tests for Trend Detection in the Presence of Covariates. *Environmetrics* **2002**, *13*, 71–84, doi:10.1002/env.507.
 64. Chandrasekaran, S.; Poomalai, S.; Saminathan, B.; Suthanthiravel, S.; Sundaram, K.; Abdul Hakkim, F.F. An Investigation on the Relationship between the Hurst Exponent and the Predictability of a Rainfall Time Series. *Meteorol. Appl.* **2019**, *26*, 511–519, doi:10.1002/met.1784.
 65. Hurst, H.E.A. A Suggested Statistical Model of Some Time Series Which Occur in Nature 1956.
 66. Salas, J.D. Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series. In *Handbook of Hydrology*; Maidmend, D.R., Ed.; New York, 1992; pp. 19.1-19.72.
 67. Mandelbrot, B. & Wallis, J. Range R / S in the Measurement Long Run Statistical Dependence. *Water Resour. Res.* **1969**, *5*, 967–988.
 68. Mirza, M.Q.; Warrick, R.A.; Erickson, N.J.; Kenny, G.J. Tendances et Persistence Des Précipitations Des Bassins Des Fleuves Gange, Brahmapoutre et Meghna. *Hydrol. Sci. J.* **1998**, *43*, 845–858, doi:10.1080/02626669809492182.
 69. Tatli, H. Detecting Persistence of Meteorological Drought via the Hurst Exponent. *Meteorol. Appl.* **2015**, *22*, 763–769, doi:10.1002/met.1519.
 70. Yue, S.; Pilon, P.; Cavadias, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's Rho Tests for Detecting Monotonic Trends in Hydrological Series. *J. Hydrol.* **2002**, *259*, 254–271, doi:10.1016/S0022-1694(01)00594-7.
 71. Stevaux, J.C.; Macedo, H. de A.; Assine, M.L.; Silva, A. Changing Fluvial Styles and Backwater Flooding along the Upper Paraguay River Plains in the Brazilian Pantanal Wetland. *Geomorphology* **2020**, *350*, 106906, doi:10.1016/j.geomorph.2019.106906.
 72. Sandro F. Veiga, B.; Nobre, P.; Giarolla, E.; Capistrano, V.; da Silva Jr., M.; Casagrande, F.; Soares, H.; Kubota, P.; Figueroa, S.; Bottino, M.; et al. Climate Change over South America Simulated by the Brazilian Earth System Model under RCP4.5 and RCP8.5 Scenarios. *J. South Am. Earth Sci.* **2023**, *131*.
 73. Bruijnzeel, L.A. *Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review*; Paris, 1990;
 74. Tucci, C.E.M.; Clarke, R.T. Impact Og Changes in Vegetation Cover on Runoff: Review of Terrestrail Hydrological Cycle Processes. Global Cycle Description of Hydrological Processes in the Basin. **1997**, *2*, 135–152.
 75. Blöchl, G.; Ardoin-Bardin, S.; Bonell, M.; Dorninger, M.; Goodrich, D.; Gutknecht, D.; Matamoros, D.; Merz, B.; Shand, P.; Szolgay, J. At What Scales Do Climate Variability and Land Cover Change Impact on Flooding and Low Flows? *Hydrol. Process.* **2007**, *21*, 1241–1247.
 76. Chagas, V.B.P.; Chaffe, P.L.B. The Role of Land Cover in the Propagation of Rainfall Into Streamflow Trends. *Water Resour. Res.* **2018**, *54*, 5986–6004, doi:10.1029/2018WR022947.
 77. Marques, M.C.S.; Rodriguez, D.A. Impacts of the Landscape Changes in the Low Streamflows of Pantanal Headwaters—Brazil. *Hydrol. Process.* **2022**, *36*, doi:10.1002/hyp.14617.
 78. Lázaro, W.L.; Oliveira-Júnior, E.S.; da Silva, C.J.; Castrillon, S.K.I.; Muniz, C.C. Climate Change Reflected in One of the Largest Wetlands in the World: An Overview of the Northern Pantanal Water Regime. *Acta Limnol. Bras.* **2020**, *32*, 1–8, doi:10.1590/s2179-975x7619.
 79. Padovani, C.R.; Vettorazzi, C.A.; Shimabukuro, Y.E.; Adami, M.; Morais De Freitas, R. *Estudo Das Inundações Do Pantanal a Partir de Imagens MODIS*;
 80. Rao, A.R.; Bhattacharya, D. Effect of Short-Term Memory on Hurst Phenomenon. *J. Hydrol. Eng* **2001**, *125*–131.
 81. Silva, C.A.; Lima, M. Soy Moratorium in Mato Grosso: Deforestation Undermines the Agreement. *Land use policy* **2018**, *71*, 540–542, doi:10.1016/j.landusepol.2017.11.011.
 82. Chiaravalloti, R.; Bolzan, F.; Roque, F.; Biswas, S. Ecosystem Services in the Floodplains: Socio-Cultural Services Associated with Ecosystem Unpredictability in the Pantanal Wetland, Brazil. *Aquat. Ecosyst. Health Manag.* **2022**, *25* (1), 72–80.
 83. Were, D.; Kansime, F.; Fetahi, T.; Cooper, A.; Jjuuko, C. Carbon Sequestration by Wetlands: A Critical Review of Enhancement Measures for Climate Change Mitigation. *Earth Syst. Environ.* **2019**, *3*, 327–340.
 84. Lolu, A.J.; Ahluwalia, A.S.; Sidhu, M.C.; Reshi, Z.A.; Mandotra, S.K. Carbon Sequestration and Storage by Wetlands: Implications in the Climate Change Scenario. In *Restoration of Wetland Ecosystem: A Trajectory Towards a Sustainable Environment*; Springer Singapore, 2020; pp. 45–58.
 85. Wantzen, K.; Beer, F.; Jungkunst, H.; Glatzel, S. Carbon Dynamics in Wetlands. *Encycl. Inl. Waters (Second Ed.* **2022**, *3*, 169–181.
 86. Freitas, D.A.F. de; Silva, M.L.N.; Cardoso, E.L.; Oliveira, D.M. da S.; Moitinho, M.R.; Curi, N. Carbon and Nitrogen Stocks in Soil under Native Pastures in the Pantanal Wetland Biome, Brazil. *Agronomy* **2024**, *14*, 1994, doi:10.3390/agronomy14091994.
 87. ^ Onica Harris, M.B.; Tomas, W.; Mour, G.; Da Silva, C.J.; Guimar, E.; Sonoda, A.; Fachim, E. *Safeguarding the Pantanal Wetlands: Threats and Conservation Initiatives*; 2005; Vol. 19;.
 88. Tomas, W.M.; Andrade, M.H.; Berlinck, C.N.; Bolzan, F.; Camilo, A.R.; Catella, A.C.; Chiaravalloti, R.M.; da

- Cunha, C.N.; Damasceno Junior, G.A.; Fernando, A.M.E.; et al. Eight Basic Principles for the Elaboration of Public Policies and Development Projects for the Pantanal. *Conserv. Sci. Pract.* **2024**, doi:10.1111/csp2.13207.
89. Oliveira, M.R.; Ferreira, B.H.S.; Souza, E.B.; Lopes, A.A.; Bolzan, F.P.; Roque, F.O.; Pott, A.; Pereira, A.M.M.; Garcia, L.C.; Damasceno, G.A.; et al. Indigenous Brigades Change the Spatial Patterns of Wildfires, and the Influence of Climate on Fire Regimes. *J. Appl. Ecol.* **2022**, *59*, 1279–1290, doi:10.1111/1365-2664.14139.
90. Cristaldo, M.F.; de Souza, C.C.; de Jesus, L.; Padovani, C.R.; de Oliveira, P.T.S.; da Gama Viganó, H.H. Análise e Distribuição Da Rede de Monitoramento de Chuvas Na Região Do Pantanal Brasileiro. *Rev. Bras. Meteorol.* **2017**, *32*, 199–205, doi:10.1590/0102-77863220007.

CAPÍTULO 3: CONSIDERAÇÕES FINAIS

3.1. Limitações metodológicas do estudo e perspectivas futuras

3.1.1. Séries históricas

As séries históricas utilizadas neste estudo são compostas por valores médios ou totais anuais, o que impede uma análise mais detalhada sobre o comportamento das estações chuvosas ao longo do ano, como atrasos, encurtamentos e/ou intensificação das chuvas. Alguns estudos mostram que a correlação positiva entre a superfície de água na planície pantaneira e a cota do rio Paraguai (régua de Ladário) é maior se analisada com as demais variáveis hidrológicas dos meses chuvosos, uma vez que há uma defasagem temporal e espacial entre causa e efeito na dinâmica hídrica da Bacia do Alto Paraguai (PEREIRA et al., 2021). Portanto, é recomendado que, numa tentativa de buscar maior detalhamento da situação hidrológica da bacia do alto rio Paraguai (ou de suas sub-bacias), sejam utilizadas séries históricas mensais a depender da disponibilidade de base de dados.

3.1.2. Estações hidrológicas

Na região de estudo (Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) as estações hidrológicas (estações pluviométricas e fluviométricas) são escassas e falhas, tanto em cobertura geográfica (baixa densidade demográfica de estações), quanto em consistência de dados (CRISTALDO et al., 2017). Para a seleção das estações pluviométricas e estações fluviométricas, analisamos dados de diversas estações na área de estudo, porém muitas apresentaram falhas de mais de 4 meses ao ano, além de diversas falhas anuais por década, por vezes consecutivas. Neste sentido, a depender da sub-bacia ou área de estudo estudada, a falta de estações fluviométricas com dados consistentes se torna um gargalo científico.

3.2. Conclusão

Este estudo revelou tendências hidrológicas distintas para as três bacias contribuintes do Pantanal, com reduções significativas na precipitação e na vazão dos rios das bacias do Jauru (MT) e Taquari (MS). Na bacia do rio Miranda (MS), tais variáveis apresentaram tendência crescente. A redução da precipitação e vazão dos rios na região centro-norte da Bacia do Alto

rio Paraguai (BAP) impacta diretamente as áreas alagadas do Pantanal, que mostraram tendência significativa de diminuição para o período analisado (1986-2023).

A identificação de processos de memória de longo prazo (fenômeno de Hurst), nas séries temporais de áreas alagadas e no nível do rio Paraguai (régua de Ladário), indica uma redução persistente nas variáveis hidrológicas, em que anos secos tendem a ser sucedidos por mais anos secos. Fato que compromete a resiliência hídrica e ambiental do Pantanal frente às variações climáticas, e, conseqüentemente, gera impactos negativos ambientais e socioeconômicos, como diminuição da biodiversidade, aumento do risco de incêndios e perda de navegabilidade.

Diante dos resultados, destaca-se a urgência do planejamento e da implementação de estratégias de manejo adaptativo nas políticas públicas ambientais, que visam a adaptação e mitigação dos efeitos de variabilidades aos eventos extremos— como, por exemplo, a criação de Planos Estaduais de Recuperação Nativa que respondam ao Plano Nacional (PlanaVeg) e o fortalecimento dos Comitês de Bacias Hidrográficas regionais para a estruturação de governança hídrica de toda a BAP. Para isso, a colaboração entre pesquisadores, gestores e comunidades locais será crucial para desenvolver soluções eficazes e sustentáveis para a região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALHO, C. J. R.; SABINO, J. Seasonal Pantanal flood pulse: implications for biodiversity conservation – a review. **Oecologia Australis**, [S.l.], v. 16, n. 4, 2012. DOI: 10.4257/oeco.2012.1604.17.
- ALHO, C. J. R.; SILVA, J. Effects of severe floods and droughts on wildlife of the Pantanal wetland (Brazil)—a review. **Animals**, Basel, v. 2, n. 4, p. 591–610, 2012. DOI: 10.3390/ani2040591.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. HidroWeb. 2024. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 13 mai. 2024.
- ASSINE, M. L. et al. Avulsive rivers in the hydrology of the Pantanal wetland. In: BERGIER, I.; ASSINE, M. L. (eds.). *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America*. Cham: Springer, 2015. p. 83–110.
- BLÖSCHL, G. et al. At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? **Hydrological Processes**, [S.l.], v. 21, n. 9, p. 1241–1247, 2007. DOI: 10.1002/hyp.6669.
- BORRELLI, P. et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. **Nature Communications**, [S.l.], v. 8, n. 1, 2017. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.
- BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; PAZ, A. R.; ALLASIA, D.; DOMECCQ, F. Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 127, n. 1, p. 27–41, 2013. DOI: 10.1007/s10584-013-0816-2.
- BRUIJNZEEL, L. A. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. Paris: UNESCO, 1990.
- BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.l.], v. 104, p. 185–228, 2004.
- CAMPOS, J. O.; CHAVES, H. M. L. Tendências e variabilidades nas séries históricas de precipitação mensal e anual no bioma Cerrado no período 1977–2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 35, n. 1, p. 1–14, 2020. DOI: 10.1590/0102-7786351019.
- CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. **Nature Communications**, [S.l.], v. 13, p. 5136, 2022. DOI: 10.1038/s41467-022-32580-x.
- CHAVES, H. M. L.; LORENA, D. R. Assessing reservoir reliability using classical and long-memory statistics. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S.l.], v. 26, 2019. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100641.

CIGIZOGLU, H. K.; BAYAZIT, M.; ÖNÖZ, B. Trends in the maximum, mean, and low flows of Turkish rivers. **Journal of Hydrometeorology**, [S.l.], v. 6, n. 3, p. 280–290, 2005. DOI: 10.1175/jhm412.1.

COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 105, n. 1–3, p. 119–131, 2011. DOI: 10.1007/s10533-011-9582-2.

COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica de grandes bacias. 2001. 270 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? **Journal of Hydrology**, [S.l.], v. 245, n. 1–4, p. 218–238, 2001. DOI: 10.1016/s0022-1694(01)00348-1.

COLMAN, C. B. et al. Effects of climate and land-cover changes on soil erosion in Brazilian Pantanal. **Sustainability**, Basel, v. 11, 7053, 2019. DOI: 10.3390/su11247053.

DEBORTOLI, N. S. et al. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). **Climatic Change**, Dordrecht, v. 132, p. 251–264, 2015. DOI: 10.1007/s10584-015-1415-1.

DEBORTOLI, N.; DUBREUIL, V.; HIROTA, M.; RODRIGUES FILHO, S.; LINDOSO, D.; NABUCET, J. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. **International Journal of Climatology**, [S.l.], v. 37, n. 6, p. 2889–2900, 2017. DOI: 10.1002/joc.4886.

DETZEL, D. H. M. et al. Estacionariedade das aflúncias às usinas hidrelétricas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 5–111, 2011.

DETZEL, D. H. M.; FERNANDES, C. V. S.; MINE, M. R. M. Não estacionariedade na construção de curvas de permanência com vistas à outorga de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 80–87, 2016. DOI: 10.21168/rbrh.v21n1.p80-87.

DEY, P.; MISHRA, A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: a review of methodologies and critical assumptions. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v. 548, p. 278–290, 2017. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.014.

DIFFENBAUGH, N. S. et al. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 114, n. 19, p. 4881–4886, 2017. DOI: 10.1073/pnas.1618082114.

ELY, P. et al. Dam-induced hydrologic alterations in the rivers feeding the Pantanal. **Frontiers in Environmental Science**, [S.l.], v. 8, 2020. DOI: 10.3389/fenvs.2020.579031.

FERON, S. et al. South America is becoming warmer, drier, and more flammable. **Communications Earth & Environment**, [S.l.], v. 5, p. 501, 2024. DOI: 10.1038/s43247-024-01654-7.

FERREIRA, F. H. M. et al. Climate change in the Upper Paraguay Basin and hydrological impacts on the Pantanal. **Journal of Water and Climate Change**, [S.l.], v. 15, n. 7, p. 3210–3321, 2024.

GENTA, J.; PEREZ-IRIBARREN, G.; MECHOSO, C. R. A recent increasing trend in the streamflow of rivers in Southeastern South America. **Journal of Climate**, Boston, v. 11, n. 11, p. 2858–2862, 1998. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<2858:ARITIT>2.0.CO;2.

GONÇALVES, H.; MERCANTE, M.; SANTOS, E. Hydrological cycle. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 71, n. 1 suppl. 1, p. 241–253, 2011. DOI: 10.1590/s1519-69842011000200003.

GRIMM, A. M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? **Climate Dynamics**, Heidelberg, v. 22, n. 2-3, p. 123–138, 2004. DOI: 10.1007/s00382-003-0368-7.

HEGERL, G. C. et al. Good practice guidance paper on detection and attribution related to anthropogenic climate change. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Detection and Attribution of Anthropogenic Climate Change. STOCKER, T. F. et al. (eds.). Bern: IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, 2010.

HIRSCH, R. M. A perspective on nonstationarity and water management. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, [S.l.], v. 47, n. 3, p. 436–446, 2011. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2011.00539.x.

HOFFMANN, W. A.; JACKSON, R. B. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. **Journal of Climate**, Boston, v. 13, n. 9, p. 1593–1602, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Detection and Attribution Related to Anthropogenic Climate Change. STOCKER, T. F. et al. (eds.). Bern: IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, 2010. 55 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. FIELD, C. B. et al. (orgs.). Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (orgs.). Geneva: IPCC, 2014. 151 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report

of the Intergovernmental Panel on Climate Change. CORE WRITING TEAM; LEE, H.; ROMERO, J. (eds.). Geneva: IPCC, 2023. 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. IVORY, S. J. et al. Vegetation, rainfall, and pulsing hydrology in the Pantanal, the world's largest tropical wetland. **Environmental Research Letters**, [S.l.], v. 14, 124017, 2019.

JUNK, W. J. The flood pulse concept in river-floodplain systems. In: Proceedings of the International Large River Symposium. [S.l.: s.n.], 1989. p. 110–127.

JUNK, W. J. Flood pulsing and the linkages between terrestrial, aquatic, and wetland systems. **SIL Proceedings, 1922–2010**, [S.l.], v. 29, n. 1, p. 11–38, 2005. DOI: 10.1080/03680770.2005.11901972.

JUNK, W. J. et al. Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Aquatic Sciences**, Basel, v. 68, n. 3, p. 278–309, 2006. DOI: 10.1007/s00027-006-0851-4.

LEAL FILHO, W. et al. Fire in Paradise: why the Pantanal is burning. **Environmental Science & Policy**, [S.l.], v. 123, p. 31–34, 2021. DOI: 10.1016/j.envsci.2021.05.005.

KAYANO, M. T., & ANDREOLI, R. V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology**, 27(4), 531–540, 2007. doi:10.1002/joc.1417

MALMQVIST, B.; RUNDLE, S. Threats to the running water ecosystems of the world. **Environmental Conservation**, [S.l.], v. 29, n. 2, p. 134–153, 2002. DOI: 10.1017/S0376892902000097.

MAPBIOMAS – Mapeamento da Superfície de Água do Brasil, Coleção 4, acessado em 10 de abril de 2025 através do link: <https://plataforma.agua.mapbiomas.org>.

MARENGO, J. A. Variations and change in South American streamflow. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 31, n. 1, p. 99–117, 1995. DOI: 10.1007/bf01092983.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; UVO, C. R. Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [S.l.], v. 103, n. D2, p. 1775–1783, 1998. DOI: 10.1029/97jd02551.

MARENGO, J. A., OLIVEIRA, G. S., & ALVES, L. M. Climate change scenarios in the Pantanal. In: BERGIER, I.; ASSINE, M. L. (eds.). Dynamics of the Pantanal Wetland in South America. Cham: **Springer**, 2015. p. 227–238. DOI: 10.1007/698_2015_357.

MARENGO, J. A., et al. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. **Frontiers in Water**, v. 3. 2021. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>

MARQUES, M. C. S.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of the landscape changes in the low streamflows of the Pantanal headwaters – Brazil. **Hydrological Processes**, [S.l.], 2022. DOI: 10.1002/hyp.14617.

MILLY, P. C. D. et al. Stationarity is dead: whither water management? **Science**, Washington, v. 319, n. 5863, p. 573–574, 2008. DOI: 10.1126/science.1151915.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, [S.l.], v. 50, p. 7100–7114, 2014. DOI: 10.1002/2013WR015202.

PADOVANI, C. R. Spatio-temporal dynamics of floods in the Pantanal. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-14022011-170515/ptbr.php>.

PEREIRA, G. et al. Rainfall patterns and geomorphological controls driving inundation frequency in tropical wetlands: how does the Pantanal flood? **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, [S.l.], 030913332098771, 2021. DOI: 10.1177/0309133320987719.

POFF, N. L. et al. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. **BioScience**, [S.l.], v. 47, n. 11, p. 769–784, 1997.

ROPELEWSKI, C. H.; HALPERT, M. S. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, Boston, v. 2, p. 268–284, 1989.

ROQUE, F. O. et al. Upland habitat loss as a threat to Pantanal wetlands. **Conservation Biology**, [S.l.], v. 30, n. 5, p. 1131–1134, 2016. DOI: 10.1111/cobi.12713.

SALINGER, M. J. Climate variability and change: past, present and future – an overview. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 70, p. 9–29, 2005.

SILVA, G. A. M. da, DRUMOND, A., & AMBRIZZI, T. The impact of El Niño on South American summer climate during different phases of the Pacific Decadal Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, 106(3-4), 307–319, 2011. doi:10.1007/s00704-011-0427-7

SOUZA, S. A. et al. Análise de estacionariedade de séries de vazões da bacia hidrográfica do rio Paraguai. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. Anais... Porto Alegre: ABRHidro, 2015.

STOTT, P. A. et al. Attribution of extreme weather and climate-related events. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, Hoboken, v. 7, n. 1, p. 23–41, 2015. DOI: 10.1002/wcc.380.

SPRACKLEN, D.; ARNOLD, S.; TAYLOR, C. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, London, v. 489, p. 282–285, 2012. DOI: 10.1038/nature11390.

SUEKAME, H. R. et al. Modelagem hidrológica combinado à mudança climática, uso e ocupação do solo. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 44, e35407, 2021. DOI: 10.11137/1982-3908_2021_44_35407.

THIELEN, D. et al. Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature. **PLoS ONE**, [S.l.], v. 15, n. 1, e0227437, 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0227437.

TRENBERTH, K. E. El Niño Southern Oscillation (ENSO). **In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. [S.l.]: Elsevier, 2017. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.04082-3.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 135–152, 1997.

XIE, S-P. El Niño, the Southern Oscillation, and the global influence. In: ____ (org.). *Coupled Atmosphere-Ocean Dynamics*. [S.l.]: Elsevier, 2024. cap. 9, p. 211–249. DOI: 10.1016/B978-0-323-95490-7.00009-6.

WOODWARD, C.; SHULMEISTER, J.; LARSEN, J.; JACOBSEN, G. E.; ZAWADZKI, A. The hydrological legacy of deforestation on global wetlands. **Science**, Washington, v. 346, n. 6211, p. 844–847, 2014. DOI: 10.1126/science.1260510.

WWF-BRASIL. Alerta precoce para mitigar impactos da seca no Pantanal: nota técnica. Brasília, 2024. Disponível em: <https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/0107-nota-tecnica---crise-hidrica.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2025.