



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP
REPOSITÓRIO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E INTELLECTUAL DA UNICAMP

Versão do arquivo anexado / Version of attached file:

Versão do Editor / Published Version

Mais informações no site da editora / Further information on publisher's website:

<https://www.scielo.br/j/esa/a/rZDTxMTmcBNf8Dx8VjwYbYb/>

DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220210270>

Direitos autorais / Publisher's copyright statement:

©2022 by Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. All rights reserved.

DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo

CEP 13083-970 – Campinas SP

Fone: (19) 3521-6493

<http://www.repositorio.unicamp.br>

Interdependências bilaterais entre usos da água e do solo e a disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Grande

Bilateral interdependencies between water and land uses and water availability in the Rio Grande watershed

Marcelo Santana^{1*} , José Anderson do Nascimento Batista¹ 

RESUMO

As modificações no uso-ocupação do solo e as demandas hídricas no Brasil têm sido acompanhadas com bastante atenção em virtude das consequências para o sistema água-energia-alimento, afetando especificamente a disponibilidade hídrica para esse sistema. O objetivo deste estudo foi buscar evidências de interdependências bilaterais entre demandas hídricas, usos e ocupações do solo e disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Grande. Por meio do modelo hidrológico *soil and water assesment tool* (SWAT), o uso e ocupação do solo e o uso da água foram espacializados sobre 102 sub-bacias na área de estudo, para estimar seus impactos nas séries históricas de postos fluviométricos disponíveis. As correlações entre os usos e disponibilidade da água e uso do solo, denominados sistema água-energia-alimento, foram obtidas por meio do coeficiente de correlação de Pearson e do seu limiar de significância. Observou-se que as mudanças no uso e ocupação do solo, ao longo das últimas décadas, provocaram redução de 40% do escoamento superficial simulado, enquanto o uso da água aumentou cerca de 30 m³/s. O antagonismo entre pastagens e cana-de-açúcar e os usos da água relativos a essas atividades, associado à diminuição da oferta hídrica, evidencia que a substituição das culturas teve papel relevante na variação do escoamento superficial na bacia do Rio Grande. Potenciais conflitos pelo uso da água podem advir, tanto de maneira localizada como de forma geral na bacia hidrográfica, podendo afetar até mesmo bacias hidrográficas a jusante.

Palavras-chave: interdependências hídricas; sistema água-energia-alimento; modelo *soil and water assesment tool*; mudanças no uso e ocupação do solo; bacia do Rio Grande.

ABSTRACT

Changes in land use-occupation and water demands in Brazil have been closely monitored due to the consequences for the water-energy-food system, specifically affecting the water availability for this system. The objective of this study was to seek evidence of bilateral interdependencies between water demands, land uses and occupations, and water availability in the Rio Grande watershed. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model, land use and occupation and water use were spatialized over 102 sub-basins in the study area, in order to estimate their impacts within the historical series of available fluviometric stations. The correlations between uses and availability of water and land use, called the water-energy-food system, were obtained through Pearson's correlation coefficient and its significance threshold. It was observed, over the last few decades, that changes in land use and occupation led to a 40% reduction in the simulated surface runoff, while water use increased by around 30 m³/s. The antagonism between pastures and sugarcane and the uses of water related to these activities, associated with the decrease in water supply, shows that crop substitution played a significant role in the variation of surface runoff in the Rio Grande basin. Potential conflicts over water use may arise, both locally and generally in the watershed, and may even affect downstream watersheds.

Keywords: water interdependencies; water-energy-food system; soil and water assessment tool model; land use and land changes; Rio Grande basin.

¹Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Campinas (SP), Brasil.

*Autor correspondente: m192961@dac.unicamp.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior (CAPES).

Recebido: 02/08/2021 - Aceito: 18/10/2022 - Reg. ABES: 20210270

INTRODUÇÃO

As modificações no uso e ocupação do solo e nas demandas por recursos hídricos têm sido demonstradas na literatura como fatores decisivos para o comportamento dos recursos hídricos no Brasil. As modificações na cobertura do solo têm se dado tanto pela expansão das fronteiras agrícolas brasileiras sobre vegetação natural (LEVY *et al.*, 2018) como pela substituição de uma pastagem agrícola por outra (CALDARELLI; GILIO, 2018). Essas atividades, associadas à necessidade de produção de energia hidroelétrica, têm potencial para a geração de conflitos entre os atores demandantes (MARQUES; GUNKEL; SOBRAL, 2019).

A área de drenagem do Rio Grande pertence à bacia hidrográfica do Rio Paraná, e sua capacidade instalada corresponde a 1,2% da capacidade instalada hidroelétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). A área tem passado por um aumento na frequência dos eventos de seca (GEIRINHAS *et al.*, 2021), o que eleva a chance de conflitos pelo uso da água. O mapeamento desses conflitos pode ser efetuado mediante entendimento de variáveis que afetam o sistema água-energia-alimento. O sistema água-energia-alimento visa modelar as interdependências entre as variáveis citadas e as dimensões dessas relações (DAI *et al.*, 2018).

Por tratar-se de uma análise em bacia hidrográfica de proporções continentais, o modelo *soil and water assesment tool* (SWAT) é candidato a ser aplicado em subdivisões de uma área de maiores proporções. Em território brasileiro, Serrão *et al.* (2020) analisaram os impactos de mudanças no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica Araguaia-Tocantins na geração de energia hidroelétrica da ótica das relações água-energia-alimento. Nesse estudo, os autores identificaram aumento da ordem de 15% no escoamento superficial e queda na produção energética após a remoção de formações florestais. Na região sul da Amazônia brasileira, Lamparter *et al.* (2018) lançaram mão do modelo SWAT para observar os impactos no escoamento superficial para diferentes cenários de uso e ocupação do solo constantes ao longo do tempo. Os autores verificaram que, na fronteira entre floresta amazônica e cerrado, a remoção de 13% de cerrado aumentou em 24% no escoamento superficial. Ambos os estudos citados avaliaram mudanças de uso e ocupação do solo pela perspectiva da substituição de cobertura natural por uma atividade econômica, sem considerar a substituição de uma atividade econômica por outra, contudo os autores avaliaram

as mudanças mediante cenários fixos, não levando em conta as mudanças das atividades econômicas ao longo do tempo nas bacias hidrográficas.

De acordo com Urbinatti *et al.* (2020), a avaliação descentralizada e abrangente do sistema água-energia-alimento permite considerar as várias camadas de conhecimento, adequando-se à escala dos problemas a serem resolvidos. Tais contribuições são necessárias para a continuidade da construção do conhecimento sobre interdependências nos sistemas água-energia-alimento, bem como para o aumento do desempenho da gestão desses sistemas. Keskinen *et al.* (2016), no entanto, analisaram o sistema água-energia-alimento na região do Rio Mekong em escala nacional sem avaliar as regionalidades pertencentes a cada país. Os autores apontaram que a análise institucional do sistema água-energia-alimento não deve recair sobre uma única organização setorial, mas ser implementada de maneira multissetorial a fim de estimular o interesse de setores de alimentos e energia pelo tema.

Nesse sentido, o presente estudo buscou explorar quantitativamente as interdependências do sistema água-energia-alimento entre os dados espacializados em toda a bacia do Rio Grande, localizada na cabeceira da bacia do Rio Paraná, mais importante bacia do SIN. Logo, o presente estudo teve como objetivos evidenciar impactos do uso do solo distribuídos ao longo do tempo sobre o comportamento dos recursos hídricos, por intermédio do modelo hidrológico SWAT considerando-se uso-ocupação do solo dinâmicas ao longo do tempo; e estabelecer interdependências bilaterais entre atividades integrantes do sistema água-energia-alimento, pela correlações entre vazão nos cursos d'água, uso-ocupação do solo e uso da água na bacia do Rio Grande.

METODOLOGIA

Área de estudo

A delimitação da bacia hidrográfica (Figura 1) corresponde à área de drenagem da Usina Hidrelétrica de Água Vermelha, por ser o posto fluviométrico mais próximo da foz do Rio Grande. A área de drenagem para o posto citado é de aproximadamente 140.000 km² e abriga 352 municípios com população de cerca de 8.075.000 habitantes. Com auxílio do modelo hidrológico SWAT, a

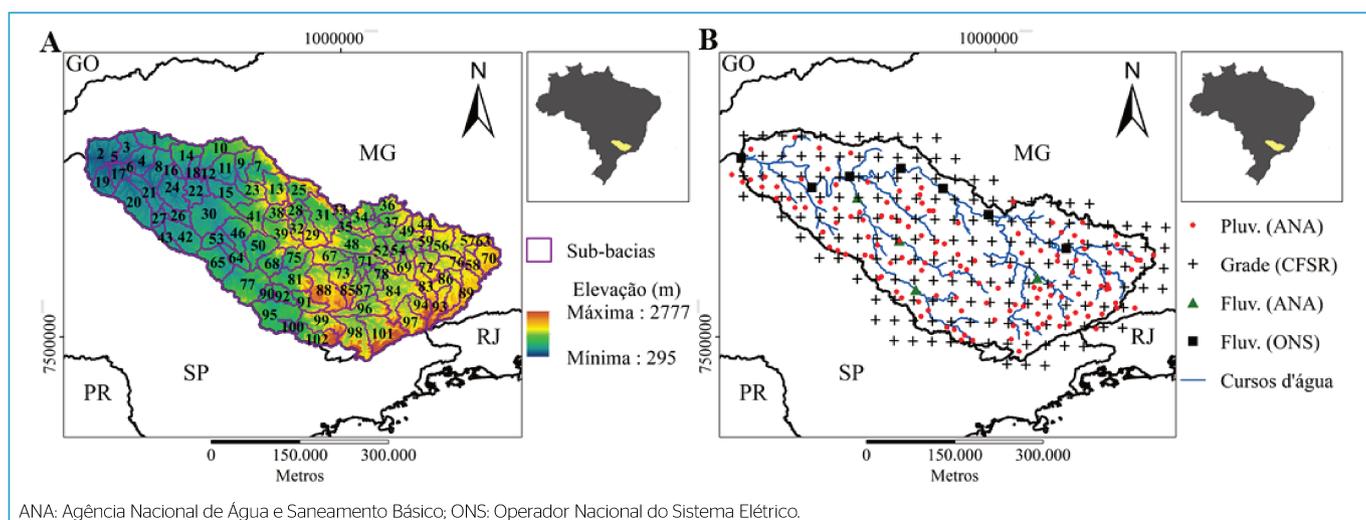


Figura 1 - (A) Subdivisão da área de estudo; (B) estações pluviométricas (ANA), fluviométricas (ANA e ONS) e pontos de grade de dados meteorológicos do Climate Forecast System Reanalysis.

bacia hidrográfica foi espacializada em 102 sub-bacias, as quais estão dispostas na Figura 1A. As 11 estações fluviométricas, as 138 estações pluviométricas e os pontos de grade com dados meteorológicos sintéticos utilizados no presente estudo estão representados na Figura 1B.

Levantamento de dados

Para o desenvolvimento da modelagem hidrológica e avaliação das interdependências, foram necessárias séries históricas de dados meteorológicos, fluviométricos, de uso e ocupação do solo e de uso da água. O levantamento de dados meteorológicos diários de velocidade média do vento (m/s), temperatura mínima e máxima diária (°C), umidade relativa do ar (%) e radiação solar (MJ/m²) empregou dados da grade global de dados atmosféricos sintéticos do modelo do Climate Forecast System Reanalysis, o qual é mantido pelo National Center for Environmental Prediction (disponível em <https://swat.tamu.edu/data/cfsr>). Dados de consumo de água anuais foram fornecidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), sendo classificados em:

- abastecimento humano (urbano e rural);
- indústria de transformação;
- agricultura (irrigação);
- dessedentação animal;
- mineração.

Para dados de uso e ocupação do solo anuais, lançou-se mão da Coleção 5 da Plataforma MapBiomias (disponível em <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>), enquanto se utilizaram dados pedológicos provenientes da base de dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Os dados de vazões mensais naturais das usina hidrelétrica são fornecidos pelo ONS, os quais estão disponíveis na *deck* de preços da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Os dados diários de precipitação e de vazões mensais observadas foram obtidos da ANA.

Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica

A modelagem hidrológica foi realizada para simulação de vazões na bacia do Rio Grande com a calibração e validação baseando-se nos 11 postos fluviométricos apresentados na Figura 1B. Foram considerados os primeiros oito anos da série (1985–1992) como período de aquecimento, 15 anos como período de calibração (1993–2007), e destacou-se um período de seis anos para validação, indo de 2008 a 2013. Calibração e validação ocorreram simultaneamente nos postos fluviométricos (LETA; VAN GRIENSVEN; BAUWENS, 2017). Na modelagem, as simulações levaram em consideração atualizações quinquenais (1985, 1990, 1995, 2000, 2005 e 2010) no uso e ocupação do solo, caracterizando um cenário de uso dinâmico. Os parâmetros para calibração do modelo foram definidos após revisão bibliográfica (ABBASPOUR; VAGHEFI; SRINIVASAN, 2018; YONABA *et al.*, 2021). Depois da calibração/validação de parâmetros para o cenário de uso dinâmico, estes foram aplicados ao cenário de uso e ocupação do solo de 1985 fixo, a fim de se obter um cenário constante. A comparação de vazões simuladas em ambos os cenários possibilitou a mensuração dos impactos de uso e ocupação do solo no escoamento superficial.

Os impactos do uso da água nas vazões simuladas foram avaliados mediante comparação entre o cenário inicial (1985) e final (2013) da série histórica. As métricas de avaliação da calibração/validação escolhidas foram coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), *percent bias* (PBIAS) e eficiência de

Kling-Gupta (KGE) (MORIASI *et al.*, 2015; YONABA *et al.*, 2021). De acordo com os autores citados, o modelo apresenta calibração/validação insatisfatória se $NSE \leq 0,5$, $PBIAS \geq \pm 25$ e $KGE \leq 0,5$.

Interdependências do sistema água-energia-alimento na bacia hidrográfica

A avaliação das interdependências no sistema água-energia-alimento, bem como a identificação de potenciais conflitos pelo uso da água na bacia hidrográfica, se deu por meio de correlações entre usos do solo, usos da água e disponibilidade hídrica. Essas correlações indicaram a aderência entre as variáveis e, assim, os impactos de uma variável sobre a outra, com base em seus coeficientes de correlações. As correlações entre uso do solo e uso da água foram calculadas para cada uma das 102 sub-bacias. As correlações entre o uso do solo e disponibilidade hídrica, bem como entre uso da água e disponibilidade hídrica, foram calculadas entre as 102 sub-bacias e as séries históricas observadas dos postos fluviométricos. Tais correlações foram estabelecidas pelo coeficiente de correlação de Pearson, o qual presume distribuição normal de duas amostras e linearidade das relações entre as variáveis estudadas.

Para representação da disponibilidade hídrica, os dados fluviométricos mensais foram padronizados para a escala anual pelo *standardized streamflow index* (SSI) (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2012). Tal padronização ocorreu para o mês de setembro, visto que outubro é o mês inicial do ano hidrológico brasileiro. A identificação de tendências para postos participantes da análise de interdependências se deu mediante o teste modificado de Mann-Kendall (HAMED; RAMACHANDRA RAO, 1998). Caso tendências fossem detectadas, estas seriam removidas antes da aplicação das correlações.

Correlações positivas evidenciam imposição entre as variáveis, enquanto correlações negativas indicam oposição entre as variáveis. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações acima de 0,37 são determinadas como correlações positivas significantes, enquanto correlações abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações entre -0,37 e 0,37 são vistas como correlações não significantes. Coeficientes iguais a zero indicam ausência de uma das variáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelagem hidrológica e separação de séries históricas

A identificação dos postos fluviométricos e o desempenho dos índices estatísticos utilizados para avaliar o modelo hidrológico estão dispostos para cada posto fluviométrico na Tabela 1. Os índices que não estiveram conforme as expectativas estão sombreados.

Os impactos das modificações de uso e ocupação no solo estão representados na Figura 2A. Como pode ser visto na Tabela 1, o modelo hidrológico mostrou resultados amplamente satisfatórios para o posto da UHE Água Vermelha (2), o qual corresponde ao exutório da área de estudo. O nível de satisfação para com calibração e validação dos resultados cai conforme a distância geográfica do posto fluviométrico ao exutório aumenta, tendo os postos fluviométricos da UHE Funil (60) e UHE Marimbondão Porto Ferreira (90) apresentado índices estatísticos insatisfatórios.

Em seu modelo hidrológico, com comprimento de série histórica oito anos maior que o do presente estudo (1979-2015), Abou Rafee *et al.* (2019)

avaliaram a área de estudo a montante da usina hidrelétrica de Itaipu (logo, englobou a bacia do Rio Grande), bem como diversos postos também aplicados neste estudo. Os autores obtiveram índices estatísticos satisfatórios em toda a bacia do Rio Grande, fato que difere do presente estudo com relação a postos próximos à cabeceira dos cursos d'água. É possível que tal diferença se dê em virtude de o modelo hidrológico dos citados autores ter levado em consideração uso e ocupação do solo constante, enquanto as simulações efetuadas no presente estudo observaram atualizações quinquenais no uso e ocupação do solo para calibração e validação de seus parâmetros. Tanto a usina hidrelétrica (UHE) Igarapava quanto a de Funil foram inseridas em meio à série histórica

estudada (1998 e 2002, respectivamente), modificando abruptamente o uso do solo ao substituir cobertura vegetal por áreas de espelho d'água, no entanto é possível que a maior intensidade do impacto para a UHE Funil tenha se dado em virtude de ela estar localizada na cabeceira do Rio Grande, local em que as vazões são menores.

Como o posto da UHE Água Vermelha mostrou o melhor desempenho e por ter sido o exutório da área de estudo, ele foi escolhido para analisar os impactos de uso e ocupação do solo e do uso de água no escoamento superficial.

A Figura 2A aponta a série de vazões simuladas de uso e ocupação do solo dinâmico e constante, bem como a diferença percentual entre ambas. A

Tabela 1 - Identificação dos postos e desempenho do modelo hidrológico

Sub-bacias correspondentes aos postos fluviométricos	Calibração			Validação		
	NSE	PBIAS	KGE	NSE	PBIAS	KGE
2 UHE Água Vermelha	0,94	-2,40	0,93	0,96	0,40	0,94
7 UHE Igarapava	0,93	7,80	0,84	0,88	10,10	0,77
12 UHE Porto Colômbia	0,92	9,20	0,82	0,86	12,40	0,75
24 UHE Marimondo	0,94	0,60	0,97	0,96	-0,50	0,93
25 UHE Mascarenhas de Moraes	0,87	14,00	0,74	0,84	13,30	0,71
30 Ponte Joaquim Justino	0,68	-6,70	0,58	0,68	-13,50	0,66
33 UHE Furnas	0,78	21,10	0,64	0,71	22,90	0,59
50 Clube de Regatas	0,83	7,30	0,89	0,57	6,30	0,68
60 UHE Funil	-0,30	62,10	0,14	-0,42	62,30	0,11
84 UHE Furnas, Rio Verde	0,80	21,60	0,75	0,69	28,30	0,64
90 UHE Marimondo, Porto Ferreira	0,48	-23,40	0,49	0,59	-27,30	0,69

UHE: usina hidrelétrica; NSE: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; PBIAS: percent bias; KGE: eficiência de Kling-Gupta.

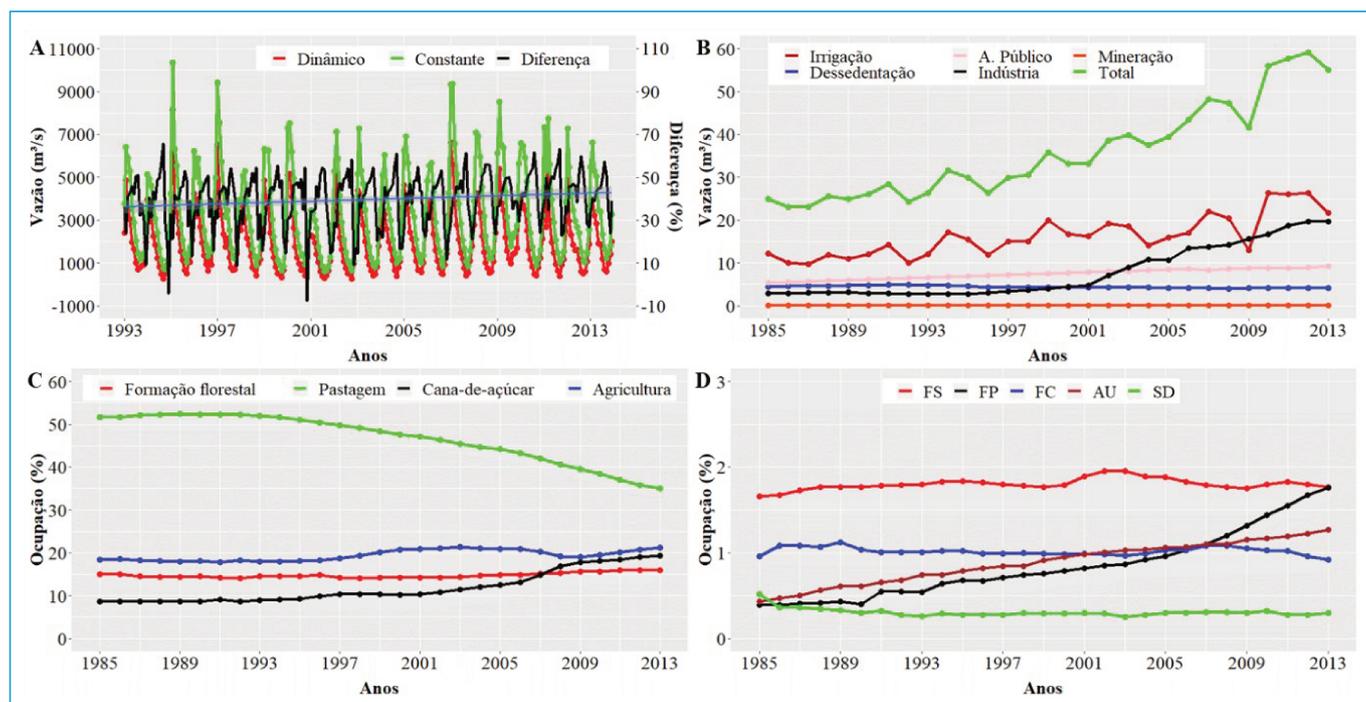


Figura 2 - (A) Escoamento superficial para o posto da usina hidrelétrica Água Vermelha para uso e ocupação do solo constante e dinâmico; (B) usos da água na bacia; (C) série histórica dos usos do solo $\geq 5\%$; (D) série histórica dos usos do solo $\leq 5\%$: formação savânica (FS), floresta plantada (FP) formação campestre (FC), área urbana (AU) e solo descoberto (SD).

Figura 2B mostra a série histórica de usos da água, enquanto as Figuras 2C e 2D trazem as séries históricas de utilização do solo acima de 5% e abaixo de 5%. A avaliação da Figura 2A permite inferir que as mudanças no uso e ocupação do solo promoveram redução nas vazões simuladas da ordem de 40% na bacia do Rio Grande.

Da Figura 2C, é possível identificar redução nas áreas de pastagens simultaneamente ao crescimento das áreas de cana-de-açúcar, enquanto os outros usos se mantiveram constantes em termos de área de ocupação. Tais observações evidenciam que a substituição de culturas pode ter contribuído para o decréscimo no escoamento superficial na bacia do Rio Grande. Essas evidências também foram apontadas por Hernandez, Scarpore e Seabra (2018) ao avaliar a influência do uso e ocupação do solo dinâmico na Região Centro-Oeste brasileira, mostrando ser possível identificar os mecanismos que tornam a substituição pastagem por cana-de-açúcar influente no escoamento superficial. Bellezoni *et al.* (2018) projetaram que a expansão da cana-de-açúcar na bacia do Paranaíba teria pouco impacto no sistema água-energia-alimento por conta da ampla disponibilidade de pastagens a serem substituídas e pela significativa oferta hídrica, no entanto os resultados apresentados pelo modelo hidrológico deste estudo também evidenciam a possibilidade de perturbações no sistema água-energia-alimento em razão da substituição de pastagens pela cultura da cana-de-açúcar. Essas potenciais perturbações apresentam-se na forma de pressão sobre a demanda hídrica pela produção de alimento (açúcar) e de energia (álcool), mostrando que a substituição das pastagens também pode afetar o sistema água-energia-alimento.

A Figura 2B mostra que tanto o uso da água para irrigação como para a indústria tiveram incremento na série histórica, enquanto os outros usos da água mantiveram constância. Nesse sentido, a série histórica cumulativa de usos da água (linha verde da Figura 2B) mostra que o consumo de água passou de 25 m³/s em 1985 para 55 m³/s em 2013, com pico de 60 m³/s em 2012 e com média histórica de 30 m³/s. Observou-se na Figura 2B abrupta queda no uso da água por irrigação entre 2008 e 2009. De acordo com Canova e Hickey (2012), a crise econômica global ocorrida em 2008 teve por consequência redução no preço e na demanda por *commodities*, provocando decréscimo da atividade agrícola no Brasil e, por consequência, do uso da água para irrigação.

Correlações e impactos do uso-ocupação do solo na disponibilidade hídrica

Para avaliar as correlações entre impactos do uso e ocupação do solo, usos da água e disponibilidade hídrica, foram empregados seis dos 11 postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo hidrológico. As correlações foram realizadas mediante a padronização da vazão natural incremental observada nos cursos d'água de cada posto fluviométrico usado pelo SSI (Figura 3). O termo vazão natural incremental refere-se às vazões originadas nas áreas de drenagem entre as estações fluviométricas. O teste modificado de Mann-Kendall não identificou tendências significantes em séries históricas da Figura 3.

As correlações de cada uso-ocupação com a vazão natural incremental observada em cada posto fluviométrico empregado estão representadas na Figura 4. A média das correlações significantes positivas somada à média das correlações significantes negativas, ponderadas pelas suas áreas de abrangência na bacia, revela os usos mais impactantes para a disponibilidade hídrica ao longo da bacia. Em ordem decrescente, portanto, tem-se o aumento da cana-de-açúcar (Figura 4F), redução de formações savânicas (Figura 4B), de pastagens (Figura 4E), incremento na formação campestre (Figura 4C) e silvicultura (Figura 4D), seguido de agricultura (Figura 4G), solo descoberto (Figura 4I), áreas urbanas (Figura 4H) e florestas nativas (Figura 4A).

As formações florestais, as áreas urbanas e as áreas de solo descoberto, representadas na Figura 4A, Figura 4H e Figura 4I, de maneira geral, apresentaram correlações inferiores ao intervalo de significância ($-0,37 \leq r \leq 0,37$). Nesses mapas, as correlações significantes são pontuais e possuem representatividade espacial inferior a 5% entre as sub-bacias, sendo, portanto, especialmente insignificantes. De acordo com Oliveira-Filho *et al.* (2009), as formações savânicas e as formações campestres, apresentadas nas Figuras 4B e 4C, compõem o cerrado. A correlação negativa de forma generalizada na área central da bacia hidrográfica entre vazão natural incremental observada em cada posto fluviométrico empregado e área de formação savânica indica que essas áreas de cerrado, excepcionalmente, sofreram acréscimo de área. Logo, incrementaram a evapotranspiração ao longo do tempo, em parte por causa dos efeitos da Lei nº 13.550/2009 (SÃO PAULO, 2009), a qual dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do bioma cerrado no estado e dá providências correlatas.

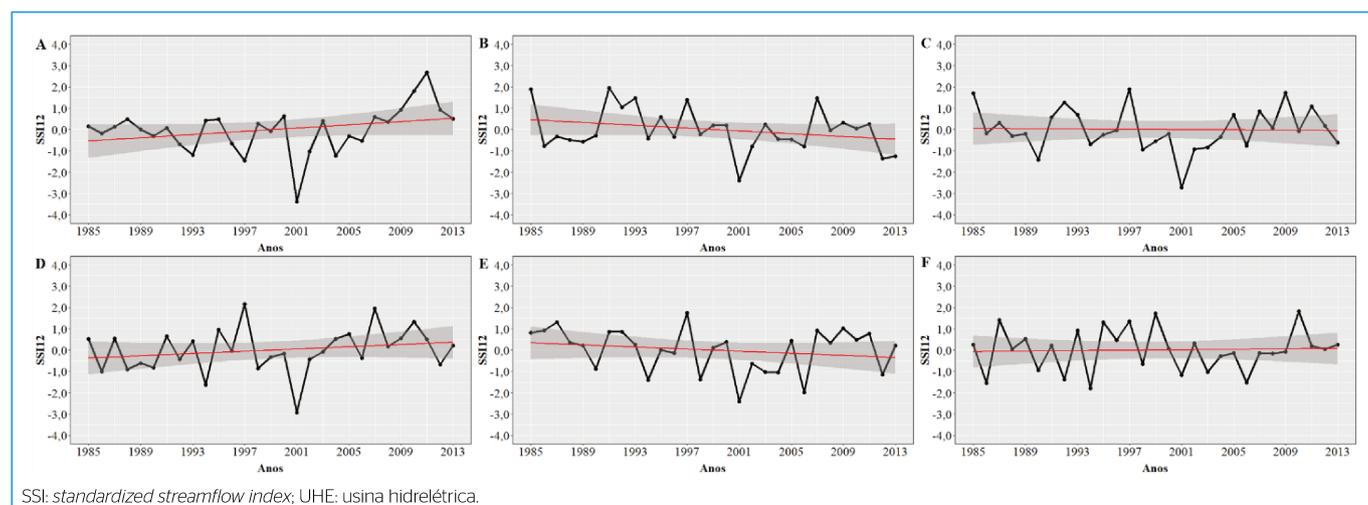


Figura 3 – Vazões naturais incrementais padronizadas para a escala anual (SSI12) para os postos fluviométricos de: (A) UHE Água Vermelha, (B) UHE Marimbondo, (C) UHE Mascarenhas de Moraes, (D) Clube de Regatas, (E) UHE Furnas - Rio Verde, (F) UHE Marimbondo - Porto Ferreira.

As formações campestres têm correlação positiva na área próxima ao exutório da bacia, o que pode ser explicado pela menor capacidade evapotranspirativa e aumento de recarga do escoamento de base na formação campestre em relação a formações savânicas.

A relação entre a vazão natural incremental observada em cada posto fluviométrico empregado e floresta plantada (eucalipto) foi evidenciada na Figura 4D. A floresta plantada apresenta maior evapotranspiração potencial em relação aos demais uso-ocupações (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007), característica da sua fase de crescimento, frequente nas fazendas por causa da idade produtiva dessa cultura. Identificou-se correlação positiva significativa entre floresta plantada e a vazão natural incremental constatada em cada posto fluviométrico empregado na região baixa da bacia. O resultado da correlação positiva desse cultivo permite inferir menor extrativismo da área de cultivo no trecho, reduzindo a taxa de evapotranspiração real em relação à potencial e acarretando maior conservação hídrica.

A significativa correlação negativa das pastagens, também na área baixa da bacia hidrográfica, apresentada na Figura 4E, indica a complementaridade entre este os demais cultivos com correlação positiva, revelando substituição dessa cultura pelas que apresentam correlação positiva no trecho. O persistente crescimento do cultivo sucroalcooleiro, numa relação de substituição para com áreas de pastagens, foi identificado por Adami *et al.* (2012) para a região centro-sul

brasileira, na qual a área de estudo está inserida. Também foi notado crescimento da silvicultura e de áreas de conservação na bacia hidrográfica, o que está de acordo com Attia *et al.* (2019) e Farinaci e Batistella (2012), respectivamente. Conforme Reichert *et al.* (2021), o crescimento da silvicultura reduz a taxa de recarga das águas subterrâneas mesmo com elevadas precipitações em solos com grande infiltração e baixa declividade, provocando alterações no sistema água-energia-alimento por conta da redução na disponibilidade hídrica. Nesse sentido, tanto os demandantes por água provenientes tanto de escoamento superficial como de subterrâneo podem ser prejudicados pela substituição de cultura, o que poderia gerar conflitos pelo uso da água.

Portanto, a correlação positiva apresentada na Figura 4D para florestas plantadas, na Figura 4F para cana-de-açúcar e na Figura 4G para agricultura geral nas sub-bacias do trecho baixo da bacia corrobora a sucessão entre essas atividades econômicas e as pastagens. Também é possível inferir que a agricultura implantada não é usuária de irrigação, visto que a concentração de pivôs ocorre na porção central da área de estudo, onde o terreno apresenta declividades baixas. De acordo com Landau e Guimarães (2014), terrenos com declividade acima de 13% representam limitações para a mecanização da agricultura. Conforme estudo de Guidolini *et al.* (2020), a bacia do Rio Grande caracteriza-se pelo relevo ondulado (declividade de 8 a 20%), com declividade média de 11,03 m, valor próximo ao limiar que limita a agricultura irrigada.

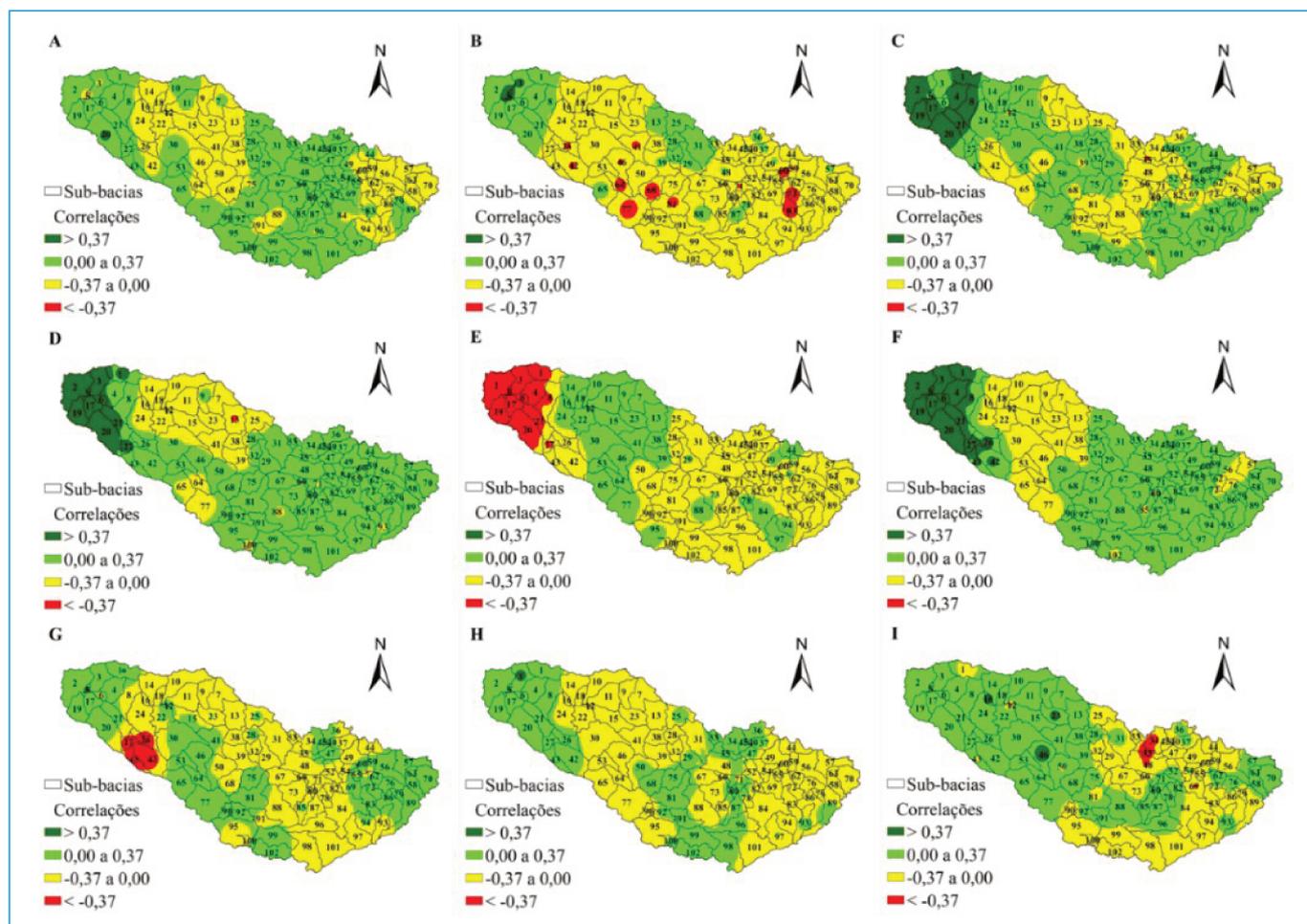


Figura 4 – Correlação entre uso-ocupação do solo e standardized streamflow index para (A) formação florestal; (B) formação savânica; (C) formação campestre; (D) floresta plantada; (E) pastagens; (F) cana-de-açúcar; (G) agricultura; (H) área urbana; (I) solo descoberto.

Correlação entre usos da água e a vazão natural incremental observada

Com base nas vazões padronizadas da Figura 3, buscou-se identificar correlações entre o comportamento histórico das demandas hídricas na bacia e as séries históricas em cada posto fluviométrico. Na Figura 5, as correlações significativas foram observadas com valores positivos para o uso em irrigação e negativos para o uso em dessedentação, ambos concentrados no trecho baixo da bacia. A significância deu-se em pontos isolados, sendo estes desprezados em função da sua representatividade espacial reduzida em relação à área. De forma geral, a aplicação da média de tais correlações significativas de cada uso, ponderada com suas respectivas áreas de cobertura, revelou os dois usos mais impactantes como dessedentação animal e irrigação agrícola, sendo os menos impactantes o uso industrial, o abastecimento humano e a mineração.

Correlação entre usos da água e usos-ocupações do solo

Foram investigadas as interdependências entre as duas demandas hídricas e os dois usos produtivos do solo mais impactantes sobre a disponibilidade hídrica. Para tanto, optou-se por estabelecer correlações entre variáveis restritas. As variáveis restritas a serem correlacionadas na Figura 6 foram: dessedentação animal contra cana-de-açúcar, dessedentação animal contra pastagem, irrigação agrícola contra cana-de-açúcar e irrigação agrícola contra pastagens.

Na Figura 6A, é possível identificar correlações não significantes entre dessedentação animal e cana-de-açúcar na parte mineira de leste da bacia, correlação positiva significativa em toda a faixa norte-sul da bacia, iniciada no seu extremo sul, e correlação negativa significativa em todo o lado oeste, trecho médio e baixo da bacia hidrográfica. A correlação negativa na bacia se dá pelo crescimento da cana-de-açúcar em detrimento da atividade pecuária, o que pode ser explicado pela redução na área de pastagens em todo o lado paulista da bacia. As correlações positivas significantes na faixa vertical central da

figura evidenciam que, embora possa ter ocorrido aumento da área de plantio de cana-de-açúcar, seguido de redução na área de pastagens, a dessedentação animal teve incremento. A relação entre áreas de pastagem e dessedentação animal no extremo sul da bacia está analisada adequadamente com os resultados da Figura 6B. O extremo leste da bacia sistematicamente não apresenta correlações significativas entre os fatores até aqui correlacionados (usos-ocupações e disponibilidade hídrica e demandas hídricas *versus* disponibilidade hídrica, além das correlações com o setor sucroalcooleiro). Por outro lado, essa porção da bacia apresentou relações claramente evidentes quanto aos fatores da urbanização e da irrigação, conforme resultados a seguir.

A Figura 6B permite inferir que a série histórica do uso-ocupação do solo para pastagens e a série histórica de demandas hídricas para dessedentação animal mostram significativa correlação na quase totalidade das sub-bacias. Correlação negativa encontra-se limitada à região sul da bacia hidrográfica, enquanto a esperada correlação positiva pôde ser atribuída para o restante da área de estudo. Nas áreas de correlação positiva, é possível inferir, conforme o esperado, tanto o aumento do pasto seguido do aumento do rebanho e da dessedentação quanto a possível redução do pasto acompanhada também da redução do rebanho. Segundo a base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os municípios mineiros da bacia do Rio Grande (213) apresentam 12% do rebanho como leiteiro (770 mil cabeças) e os paulistas (159) 1,9% (123 mil cabeças). Nos municípios da região sul da bacia (19 paulistas e 37 mineiros), a produção de gado para abate em ambos os rebanhos se configura abaixo das médias estaduais na bacia (52% abaixo de 6,9 mil R\$/município da porção de SP, com 12 dos seus 19 municípios abaixo da mediana, e 73% abaixo de 8,8 mil R\$/município da porção de MG, com 22 dos seus 37 municípios abaixo da mediana mineira da bacia). Por outro lado, segundo o IBGE, embora a produção leiteira paulista na região sul da bacia seja 41% acima da média na bacia (2,5 m³/município-ano), com 11 desses 19

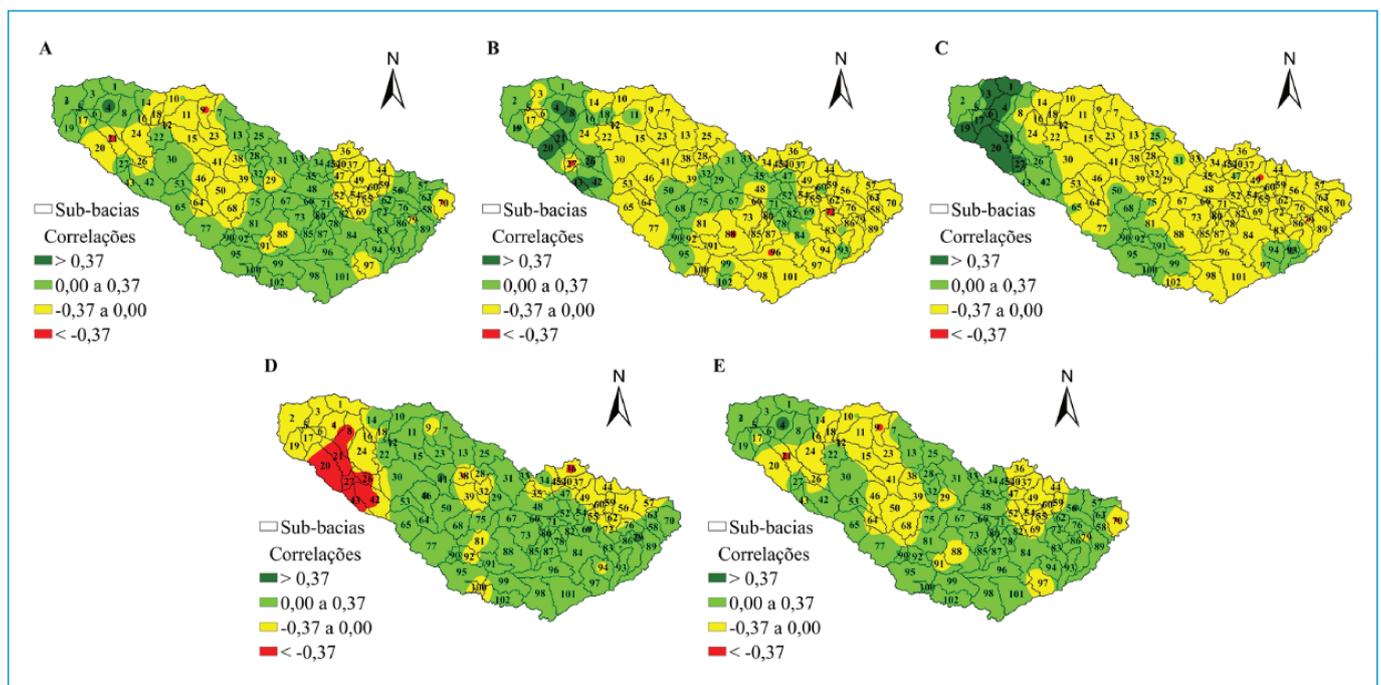


Figura 5 – Correlação entre uso da água e standardized streamflow index para (A) abastecimento humano; (B) industrial; (C) irrigação agrícola; (D) dessedentação animal; (E) mineração.

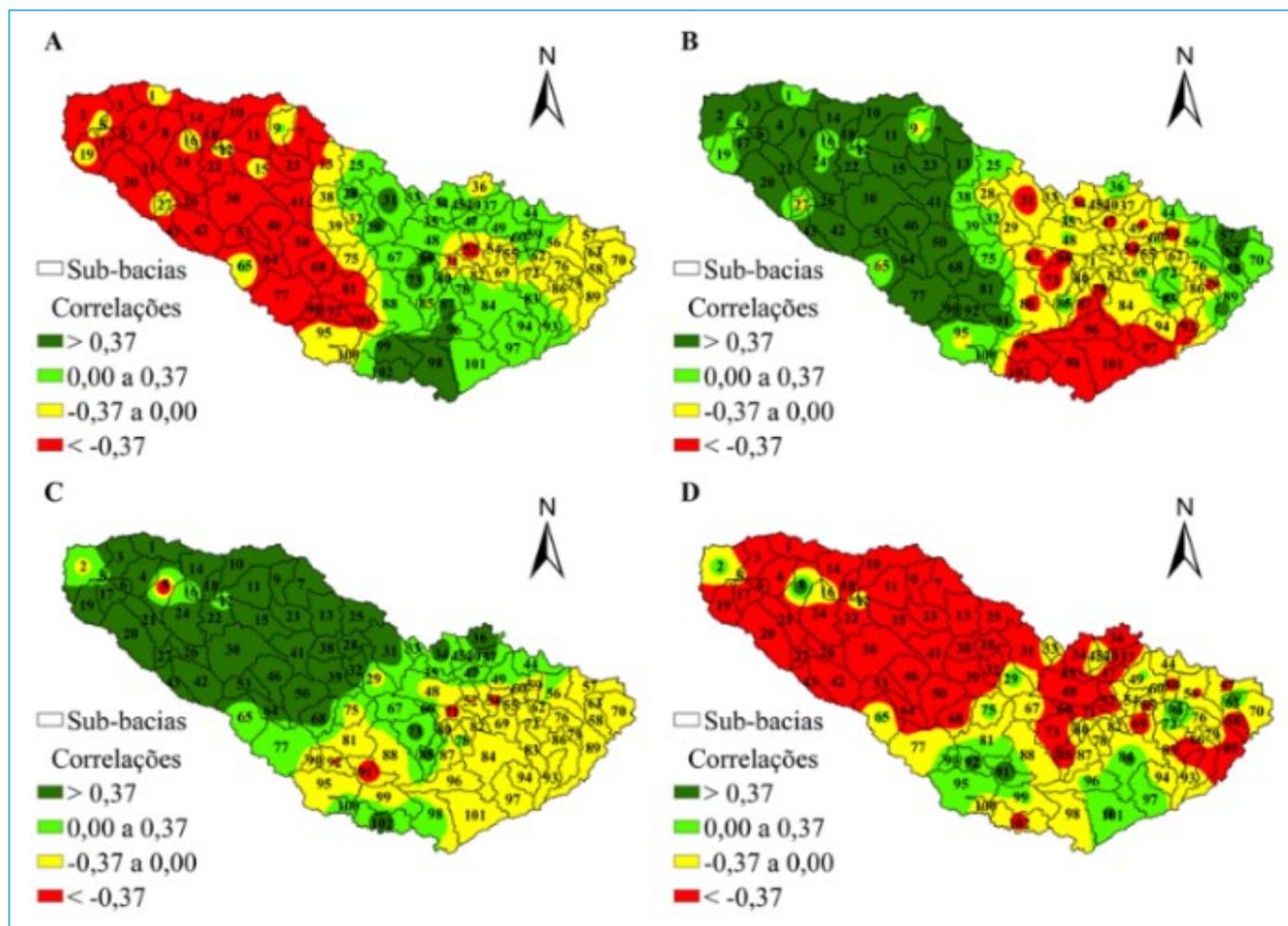


Figura 6 - (A) Dessedentação animal contra cana-de-açúcar; (B) dessedentação animal contra pastagem; (C) irrigação agrícola contra cana-de-açúcar; (D) irrigação agrícola contra pastagens.

municípios acima da mediana paulista da bacia, a produção da porção mineira inverte a tendência paulista na região sul da bacia de forma acentuada (44% abaixo da média na porção, com 10 desses 37 municípios acima da mediana mineira da bacia). Tal circunstância dá-se por causa do montante expressivamente mais elevado em toda a porção mineira da bacia (12,1 contra 2,5 m³/município-ano paulistas). Assim, o fato de a correlação entre pasto e dessedentação ser significativamente negativa no setor sul da bacia e o da produção bovina aquém do restante da bacia sugerem condições para a conversão das pastagens em lavouras, eventualmente com aumento da produtividade do rebanho e demanda de dessedentação mesmo em níveis inferiores ao do restante da bacia. Isso pode ser ilustrado pelo uso de confinamento de rebanho e pelo crescimento de outros produtos animais.

Observa-se correlação positiva entre cana-de-açúcar e irrigação na Figura 6C na parcela central e na parcela final da área de estudo, em virtude do crescimento de 145% da atividade sucroalcooleira no centro-sul brasileiro entre 2000 e 2015 (ANA, 2017). O surgimento dessa cana-de-açúcar dá-se paralelamente ao aparecimento de outras atividades agrícolas em substituição às pastagens, como apontado na Figura 2 e na Figura 4. Logo, há evidências de que tanto a cana-de-açúcar como outras atividades agrícolas apresentaram áreas irrigadas. As significantes correlações negativas entre irrigação agrícola e pastagens (Figura 5D) mostram que na parte central e na parte oeste (baixa) e extremo

leste (alta) da bacia a queda na área de pastagens ocorreu também acompanhada de incremento de demandas de irrigação. Na parte sul da bacia, as correlações não foram significativas, demonstrando independência entre esses fatores. Esse fato é exemplificado com o incremento na área de cana-de-açúcar, em detrimento das pastagens, sem que estas fossem irrigadas. As variações regionais em termos de análise de correlações entre uso do solo e uso da água indicam que a dinâmica do sistema água-energia-alimento pode ser diferente para cada setor da bacia hidrográfica. A depender de como essas dinâmicas se desenvolvem, potenciais conflitos pelo uso da água podem advir, tanto de maneira localizada como de forma geral na bacia hidrográfica, podendo afetar até mesmo bacias hidrográficas a jusante do Rio Grande.

CONCLUSÕES

Neste estudo foram demonstradas evidências das interdependências entre uso e ocupação do solo, demandas de água e disponibilidade hídrica. Essas interdependências foram caracterizadas de forma espacial e temporal na bacia do Rio Grande como bacia estratégica para o planejamento de recursos hídricos e energéticos nacionais. A investigação dessas interdependências deu-se por modelagem hidrológica para avaliação de mudanças no uso e ocupação do solo dinâmicas quinquenais, bem como pelo estabelecimento de séries históricas de

uso da água. Também foram estabelecidas correlações entre as séries históricas de usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica para cada sub-bacia, em relação às séries históricas de postos fluviométricos disponíveis.

A modelagem hidrológica deu-se por intermédio do modelo SWAT, o qual identificou que as mudanças no uso e ocupação do solo provocaram redução de 40% no escoamento superficial simulado da bacia hidrográfica. Para os usos da água, a avaliação de suas séries históricas revelou incremento de 30 m³/s desde 1985. Este estudo não levou em consideração possíveis modificações nas condições climáticas, tampouco modificações dinâmicas quinquenais no uso da água. Um modelo hidrológico que possa apontar o comportamento do escoamento superficial com relação a mudanças no uso do solo e nas condições climáticas simultaneamente tem grande potencial de acrescentar soluções a um planejamento de recursos hídricos. O modelo também não levou em conta a operação de reservatórios, e tal inserção pode contribuir significativamente para gerenciar as demandas hídricas no Rio Grande.

Na avaliação das correlações, observou-se que, entre os dois usos-ocupações mais impactantes para os recursos hídricos na bacia, a cana-de-açúcar mostrou-se mais impactante, seguida pelas pastagens. Ambas apresentaram comportamento

antagônico entre si, resultando em impacto negativo na disponibilidade hídrica ao longo da bacia. Entre os usos da água, a dessedentação animal mostrou-se mais impactante no escoamento superficial, seguida da irrigação, mantendo entre ambos os usos relação contrastante. O fato de tais usos mostrarem significativa correlação com pastagens e cana-de-açúcar, respectivamente, explica o mecanismo pelo qual a substituição de culturas promoveu a redução da oferta hídrica. A análise de correlações efetuada neste estudo destaca modificações na área de estudo e aponta regiões com potenciais conflitos pelo uso da água.

Este estudo auxilia a entender mecanismos que regem o sistema água-energia-alimento, bem como destaca informações para o planejamento dos recursos hídricos na bacia do Rio Grande.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Santana, M.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Validação, Visualização, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. Nascimento Batista, J. A.: Supervisão, Visualização, Escrita — Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R. A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: a review of papers from the 2016 International SWAT Conference. *Water*, v. 10, n. 1, p. 6, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- ABOU RAFFEE, S.A.; UVO, C.B.; MARTINS, J.A.; DOMINGUES, L.M.; RUDKE, A.P.; FUJITA, T.; FREITAS, E.D. Large-scale hydrological modelling of the upper paraná river basin. *Water*, v. 11, n. 5, p. 882, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11050882>
- ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M.; MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. *Sustainability*, v. 4, n. 4, p. 574-585, 2012. <https://doi.org/10.3390/su4040574>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Levantamento da Cana-de-Açúcar Irrigada na Região Centro-Sul do Brasil*. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/_LevantamentoCanalIrrigada_posCE_CEDOC_SemISBN2.pdf. Acesso em: 10 jul. 2021.
- ATTIA, A.; NOUVELLON, Y.; CUADRA, S.; CABRAL, O.; LACLAU, J.-P.; GUILLEMOT, J.; CAMPOE, O.; STAPE, J.-L.; GALDOS, M.; LAMPARELLI, R.; LE MAIRE, G. Modelling carbon and water balance of eucalyptus plantations at regional scale: effect of climate, soil and genotypes. *Forest Ecology and Management*, v. 449, 117460, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117460>
- BELLEZONI, R.A.; SHARMA, D.; VILLELA, A.A.; PEREIRA JUNIOR, A.O. Water-Energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: an analysis with regional input-output matrix. *Biomass and Bioenergy*, v. 115, p. 108-119, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.017>
- CALDARELLI, C.E.; GILIO, L. Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: analysis from 2000 through 2015. *Land Use Policy*, v. 76, p. 264-274, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.008>
- CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). *Acervo Técnico*. CCEE. Disponível em <https://www.ccee.org.br/acervo-ccee>. Acesso em: 2 maio 2021.
- CANOVA, N.P.; HICKEY, G.M. Understanding the impacts of the 2007-08 global financial crisis on sustainable forest management in the Brazilian Amazon: A Case Study. *Ecological Economics*, v. 83, p. 19-31, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.07.019>
- CLIMATE FORECAST SYSTEM REANALYSIS. *Global weather data for SWAT*. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/data/cfsr>. Acesso em: 7 jul. 2021.
- DAI, J.; WU, S.; HAN, G.; WEINBERG, J.; XIE, X.; WU, X.; SONG, X.; JIA, B.; XUE, W.; YANG, Q. Water-energy nexus: a review of methods and tools for macro-assessment. *Applied Energy*, v. 210, p. 393-408, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.243>
- FARINACI, J.S.; BATISTELLA, M. Variação na cobertura vegetal nativa em São Paulo: um panorama do conhecimento atual. *Revista Árvore*, v. 36, n. 4, p. 695-705, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000400011>
- GEIRINHAS, J.L.; RUSSO, A.; LIBONATI, R.; SOUSA, P.M.; MIRALLES, D.G.; TRIGO, R.M. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 3, 034036, 2021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe0eb>
- GUIDOLINI, J.F.; OMETTO, J.P.H.B.; NERY, T.D.; ARCOVERDE, G.F.B.; GIAROLLA, A. Hydro-geomorphological characterization of the Rio Grande Basin, Brazil, using geospatial approach. *Sustainable Water Resources Management*, v. 6, n. 5, p. 93, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00454-z>

- HAMED, K.H.; RAMACHANDRA RAO, A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, v. 204, n. 1-4, p. 182-196, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- HERNANDES, T.A.D.; SCARPARE, F.V.; SEABRA, J.E.A. Assessment of the recent land use change dynamics related to sugarcane expansion and the associated effects on water resources availability. *Journal of Cleaner Production*, v. 197, parte 2, p. 1328-1341, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.297>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Agropecuário 2017*. Tabela 6912. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca15/brasil>. Acesso em: 21 maio 2021.
- KESKINEN, M.; GUILLAUME, J.; KATTELUS, M.; PORKKA, M.; RÄSÄNEN, T.; VARIS, O. The water-energy-food nexus and the transboundary context: insights from large Asian rivers. *Water*, v. 8, n. 5, p. 193, 2016. <https://doi.org/10.3390/w8050193>
- LAMPARTER, G.; NOBREGA, R.L.B.; KOVACS, K.; AMORIM, R.S.; GEROLD, G. Modelling hydrological impacts of agricultural expansion in two macro-catchments in Southern Amazonia, Brazil. *Regional Environmental Change*, v. 18, n. 1, p. 91-103, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1015-2>
- LANDAU, E.C.; GUIMARÃES, D.P. Concentração de áreas irrigadas por pivôs centrais no estado de São Paulo - Brasil. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, n. 100, p. 38, 2014.
- LETA, O.T.; VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W. Effect of single and multisite calibration techniques on the parameter estimation, performance, and output of a SWAT model of a spatially heterogeneous catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 22, n. 3, 05016036, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001471](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001471)
- LEVY, M.C.; LOPES, A.V.; COHN, A.; LARSEN, L.G.; THOMPSON, S.E. Land use change increases streamflow across the arc of deforestation in Brazil. *Geophysical Research Letters*, v. 45, n. 8, p. 3520-3530, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017GL076526>
- MARQUES, É.T.; GUNKEL, G.; SOBRAL, M.C. Management of tropical river basins and reservoirs under water stress: experiences from northeast Brazil. *Environments*, v. 6, n. 6, p. 62, 2019. <https://doi.org/10.3390/environments6060062>
- MORIASI, D.N.; GITAU, M.W.; PAI, N.; DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 2015. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- OLIVEIRA-FILHO, E.C.; SILVA, F.A.M.; VIEIRA, E.A.; JÚNIOR, G.B.M.; CARVALHO, A.M.; SOUSA E SILVA, J.C. *II Mostra de Resultados de Pesquisa dos Projetos Finalizados em 2006 e 2007*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009.
- PROJETO MAPBIOMAS. *Coleção 5 da Série Anual de Mapas da Cobertura do Uso do Solo do Brasil*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1>. Acesso em: 1º jul. 2021.
- REICHERT, J.M.; PREVEDELLO, J.; GUBIANI, P.I.; VOGELMANN, E.S.; REINERT, D.J.; CONSENSA, C.O.B.; SOARES, J.C.W.; SRINIVASAN, R. Eucalyptus tree stockings effect on water balance and use efficiency in subtropical sandy soil. *Forest Ecology and Management*, v. 497, 119473, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119473>
- SÃO PAULO. Lei nº 13.550, de 2 de junho de 2009. São Paulo, 2009.
- SERRÃO, E.A.O.; SILVA, M.T.; FERREIRA, T.R.; PAULO RODRIGUES DA SILVA, V.; SALVIANO DE SOUSA, F.; LIMA, A.M.M.; ATAIDE, L.C.P.; WANZELER, R.T.S. Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon. *Science of the Total Environment*, v. 744, 140981, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140981>
- URBINATTI, A.M.; DALLA FONTANA, M.; STIRLING, A.; GIATTI, L.L. 'Opening up' the governance of water-energy-food nexus: towards a science-policy-society interface based on hybridity and humility. *Science of the Total Environment*, v. 744, 140945, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140945>
- VICENTE-SERRANO, S.M.; LÓPEZ-MORENO, J.I.; BEGUERÍA, S.; LORENZO-LACRUZ, J.; AZORIN-MOLINA, C.; MORÁN-TEJEDA, E. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17, n. 2, p. 318-332, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)
- WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L.H. Water balance in the guarani aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. *Journal of Hydrology*, v. 342, n. 3-4, p. 261-269, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.033>
- YONABA, R.; BIAOU, A.C.; KOÏTA, M.; TAZEN, F.; MOUNIROU, L.A.; ZOURÉ, C.O.; QUELOZ, P.; KARAMBIRI, H.; YACOUBA, H. A dynamic land use/land cover input helps in picturing the Sahelian paradox: assessing variability and attribution of changes in surface runoff in a Sahelian watershed. *Science of the Total Environment*, v. 757, 143792, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143792>