
Universidade de São Paulo – USP
Instituto de Biociências
Programa de Pós-graduação em Ecologia

Uso do solo e regimes de precipitação como determinantes para a
qualidade da água

Land use and rainfall regime as drivers of water quality

Eduarda Romanini

São Paulo

2023

Eduarda Romanini

Uso do solo e regimes de precipitação como determinantes para a
qualidade da água

Land use and rainfall regime as drivers of water quality

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Ecologia da Universidade
de São Paulo, para a obtenção de Título
de Doutora em Ecologia.

Orientador: Leandro Reverberi Tambosi

São Paulo

2023

Ficha catalográfica

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca do Instituto de Biociências da USP,
com os dados fornecidos pelo (a) autor (a) no formulário:
'<https://biblioteca.ib.usp.br/ficha-catalografica/src/ficha.php>'

Romanini, Eduarda
 Uso do solo e regimes de precipitação como
determinantes para a qualidade da água / Romanini
Eduarda ; orientador Reverberi Tambosi Leandro --
São Paulo, 2023.
 146 p.

 Tese (Doutorado) -- Instituto de Biociências da
Universidade de São Paulo. Ciências Biológicas
(Ecologia).

 1. Qualidade da água. 2. Usos do solo. 3. Bacias
hidrográficas agrícolas. 4. Seleção de modelos. 5.
Ecologia de paisagem. I. Reverberi Tambosi,
Leandro, orient. Título.

Bibliotecária responsável pela catalogação:
Elisabete da Cruz Neves - CRB - 8/6228

Comissão Julgadora:

Prof(a). Dr(a). _____ Prof(a). Dr(a). _____

Prof(a). Dr(a). _____ Prof(a). Dr(a). _____

Prof. Dr. Leandro Reverberi Tambosi
Orientador

Dedicatória

Dedico esta tese à minha amada vózinha Amélia (*in memoriam*) por ser inspiração para o meu caminho nos estudos e por ter sido o colo e o carinho certos em todos os momentos da minha vida.

Epígrafe

The joy of life comes from our encounters with new experiences, and hence there is no greater joy than to have an endlessly changing horizon, for each day to have a new and different sun.

Christopher McCandless (Alexander Supertramp)

Into the wild.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à minha mãe, Guga, por acreditar e apoiar minhas escolhas, pelo seu cuidado e por seu olhar atento ao meu bem-estar psicológico, sendo força e carinho para meus momentos mais difíceis. Agradeço também por ser minha inspiração de mulher guerreira, mas também amorosa e presente. Que bom que tenho você ao meu lado. Agradeço à minha vózinha Amélia, por ter sido puro amor de vó por todas e ter sempre sido minha inspiração nos estudos. Não tenho a jabuticabeira e os pés na água, mas tenho você sempre nos meus pensamentos quando preciso de uma energia extra para seguir nos estudos. Obrigada por todos os conselhos, vó. Que bom que pude viver 31 anos ao seu lado! Agradeço também ao meu companheiro da vida, Leandro, por ser a segurança na minha vida caótica, por entender meu momento de trabalho + doutorado + MBA e o impacto disso nas nossas vidas. Mas, principalmente, por ser paz e tranquilidade no mar agitado da minha ansiedade e inseguranças, por sempre me lembrar das coisas boas em mim e por torcer e estimular que eu alcance cada um dos meus sonhos.

Agradeço ao meu orientador Leandro Tambosi, que topou essa jornada e foi crucial durante todo caminho. Le, obrigada por entender o meu tempo e as minhas dificuldades, por me ensinar tanto e ter se mantido sempre positivo em relação ao nosso trabalho. Quando minha energia estava lá embaixo e eu me sentia frustrada, eu fazia questão de marcar uma reunião com você porque eu sabia que sairia dela com a confiança renovada em relação ao nosso trabalho e às próximas etapas. Você é um pesquisador/professor/orientador sem igual e eu realmente sou grata você ter sido meu mentor durante este caminho. Obrigada por há seis anos ter me aceitado como sua primeira aluna de doutorado. Agradeço também aos membros do meu comitê de acompanhamento e aos coautores dos capítulos por todas as sugestões e por enriquecerem todas as etapas deste trabalho. Agradeço também aos membros do meu comitê de acompanhamento Roze, Jean e Sílvio, pelas excelentes discussões e suporte ao longo dessa jornada. Vocês são uma referência para mim, enriqueceram este trabalho e aprendi muito com cada um de vocês.

Agradeço a todas e todos do Laboratório de Ecologia de Paisagem e Conservação (Lepac) pela receptividade na minha chegada e por terem compartilhado comigo muito dos seus conhecimentos. Agradeço aos amigos das comissões que pude participar, mas especialmente aos queridos amigos da comissão PROEX e café existencial. Nossas reuniões eram repletas de boas trocas e muito aprendizado, com um nível de companheirismo único. Em especial agradeço à Luane, Joice, Pamela, Mila, Soly e Natcho pela amizade e fonte infinita de boas conversas. Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Ecologia – USP pelo ambiente estimulador e acolhedor. Aqui em especial agradeço ao Paulo Inácio Prado, ao Glauco Machado e ao Alexandre Adalardo pela dedicação constante em fazer do programa um espaço de igual oportunidade para todos e por manterem um espaço democrático que muito valoriza a voz dos discentes. Também

aproveito este momento para agradecer à Melina pelos momentos de ensino e pela paciência com meu processo de aprendizado. Você é excepcional no que faz e sua ajuda foi fundamental dentro desta tese. E não poderia faltar aqui também um agradecimento extra especial para minha querida Vera Lima. Verinha é tudo dentro desse programa, é “chefia”, mas é mãezona, amiga, atenta e peça chave dentro do PPG-Eco. Obrigada pelas muitas conversas e pela sua paciência! Agradeço ao professor Pablo Inchausti (Universidad de la República, Uruguay) pelo curso de estatística incrível que pude fazer e que mudou o rumo da minha tese e fez com que eu entendesse muito melhor e com muito mais detalhes todas as análises usadas nesse trabalho.

Agradeço às minhas companheiras de apartamento Julia e Dani, pelas muitas conversas. Foi muito enriquecedor ter compartilhado esse período com vocês. Aos meus amigos de São Paulo, que foram minha fonte de amor e alegria nesse período. Dentre estes, primeiro agradeço ao meu amigo de muitos anos, Lucas, por ter me hospedado durante os processos seletivos para o doc e o primeiro mês em SP enquanto eu procurava meu lugar para morar. Gato, obrigada por cada conversa nesse período, por todos os Häagen-dazs compartilhados e por ter aguentado ouvir Harry Styles no repeat. Agradeço à Mila, minha grande amiga da pós para a vida toda, que esteve ao meu lado desde os estudos para a prova e todos os dias desse caminho. Obrigada Mila, pela amizade, por ter tornado o período de RD tão bom, pelos nossos dias incríveis no Uruguai, por tantas boas conversas e por ter me apresentado Two-han, a melhor doguinha que existe, rs. E queria deixar um agradecimento especial aos pimbórdias que me acolheram de braços abertos e foram fundamentais para esse momento da minha vida ser mais leve e menos solitário. Eu sou muito grata por cada momento, vocês são incríveis e eu amo muito vocês.

Também agradeço aos meus amigos da vida, Johnny, Cis, Ju e Sptz. Se não fossem vocês lá no longínquo 2009, nem bióloga eu seria, então essa minha conquista é de vocês também. Obrigada por serem tão presentes quanto à distância torna possível. Vocês são os amigos que eu sei que posso contar não importa quanto tempo tenha se passado. Admiro vocês e torço todos os dias para que vocês alcancem seus sonhos. Um agradecimento mais que especial também para as pessoas que entraram na minha vida nesse período de doutorado e ressignificaram o quão poderosa pode ser uma amizade: Livi, Totinhas e Jarbas vocês são tudo para mim, obrigada por cada momento que vivemos, cada conversa que compartilhamos e por me ensinarem tanto sobre a vida. Os nossos encontros sempre recarregam minha energia e eu volto sempre mais disposta e animada a fazer o meu melhor, nessa e em todas as fases da minha vida. À minha grande amiga Nani, detentora dos melhores conselhos sempre, importante em todas as minhas grandes escolhas e que mesmo com a distância segue sendo presente e inspiração como mulher, amiga e profissional. Agradeço também à Bah, Ila, Lika, Carol, Ju e Rafa, meus primos-irmãos, por estarem incondicionalmente ao meu lado desde o dia zero da vida.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) (Código de Financiamento 001, bolsa 88882.327893/2019-01), sem a qual essa tese não poderia ter sido realizada e à Universidade de São Paulo por fornecer toda estrutura necessária.

Resumo geral

Fatores antrópicos e naturais possuem impacto direto na provisão de serviços ecossistêmicos hídricos. Dentre estes, mudanças de uso do solo, as características pluviométricas e a interação entre esses fatores, são muitas vezes responsáveis pela piora da qualidade da água nos rios. Portanto, para garantir a provisão destes serviços, é fundamental quantificar e compreender essa intrínseca relação. Neste trabalho buscamos ampliar o conhecimento a respeito de como os usos da terra e a intensificação dos usos afetam a qualidade da água em bacias hidrográficas rurais. Mais especificamente, buscamos compreender e quantificar o efeito da variação sazonal de cobertura vegetal do solo, da precipitação e da mudança de uso do solo na qualidade da água. Para atingir estes objetivos, primeiramente utilizamos uma abordagem de seleção de modelos e focamos em bacias de primeira ordem. Incluímos como nossas variáveis preditoras de interesse a cobertura vegetal (nativa e agrícola), a porcentagem de vegetação nativa, a quantidade de chuva e o número de dias sem chuva. Em seguida, ainda sob a ótica de seleção de modelos e focando em um uso continuamente predominante do solo, mas trabalhando com bacias hidrográficas relativamente maiores, incluímos em nossas análises características intrínsecas das bacias: seu tamanho e declividade média. No geral, encontramos que a chuva e a erosão são os principais fatores que influenciam a qualidade da água e que tanto a vegetação nativa quanto a cobertura vegetal do solo possuem uma limitada capacidade de proteção dos recursos hídricos. Porém, nos casos de baixa cobertura vegetal do solo e chuvas intensas, o poder protetivo da cobertura vegetal mostrou-se altamente relevante. Observamos ainda que características individuais das bacias hidrográficas podem modular os efeitos de cada uso da terra, sendo estas características particularmente relevantes para bacias predominantemente ocupadas por cana-de-açúcar. Evidenciamos também que o efeito direto da declividade no fósforo é ligeiramente mais forte para bacias de pastagens bem como identificamos potencial presença de pastagens degradadas em nossas áreas de estudo. Após aprofundar o conhecimento sobre os efeitos dos usos da terra predominantes nas bacias hidrográficas, incluímos em nosso terceiro e último capítulo um estudo sobre o efeito da intensificação dos usos sobre a qualidade da água. Sendo assim, analisamos e comparamos dois grupos de bacias hidrográficas: as que possuem uso estável ao longo do tempo e as que passaram por uma transição em direção à maior intensificação. Neste capítulo, aumentamos o período histórico estudado e focamos no entendimento das tendências da qualidade da água utilizando modelos lineares com e sem presença de limiares. Não identificamos tendências de mudanças para diversos parâmetros de qualidade da água e para diferentes bacias hidrográficas. Entretanto, encontramos maior degradação dos recursos hídricos em bacias predominantemente cobertas com pastagens. Encontramos, em alguns casos analisados, tendências de piora em bacias hidrográficas com intensificação de seus usos, mas este não foi o resultado mais frequentemente encontrado. Nossos resultados nos permitem concluir que a precipitação e a erosão são os principais *drivers* modulando a qualidade da água, tanto em bacias hidrográficas de primeira ordem quanto em bacias relativamente maiores. Demonstramos possível risco ambiental associado à intensificação de usos da terra, mas

trouxemos evidências também para potenciais impactos negativos na qualidade da água decorrentes do manejo inadequado de áreas de baixa intensidade de uso, como as pastagens de manejo extensivo. Nossos resultados, ao apontarem as variáveis que potencialmente impactam a qualidade da água, tem fundamental importância nas tomadas de decisão que visam a manutenção da segurança hídrica. Ao revelar o significativo efeito das chuvas na qualidade da água, o limitado porém relevante efeito protetor da cobertura vegetal (agrícola ou natural) e diferenças entre usos e intensidade de manejos do solo distintos, fica evidente a importância de se considerar a manutenção e recuperação da vegetação nativa combinada com o manejo adequado dos usos agrícolas, bem como as atuais mudanças no cenário climático global, a fim de reduzir o potencial impacto da interferência antrópica nas bacias hidrográficas.

Palavras-chave: cobertura vegetal do solo, índice de vegetação, intensificação dos usos do solo, erosão, usos extensivos do solo, seleção de modelos.

Abstract

Anthropogenic and natural factors have a direct influence on the provision of water ecosystem services. Within these factors, changes in land use, rainfall characteristics, and the complex interaction between these factors are frequently responsible for worsening water quality in rivers. Therefore, to ensure the provision of these services, it is essential to quantify and understand this intrinsic relationship. In this work, we seek to expand knowledge regarding how land uses and land use intensification affect water quality in rural watersheds. More specifically, we aim to understand and quantify the effect of seasonal soil vegetation cover variations, precipitation quantity, and land use changes on water quality. To achieve these objectives, we initially employed a model selection approach and focused on first-order watersheds. We included as our predictor variables the amount of vegetation cover (native and agricultural), the percentage of native vegetation, the amount of rainfall, and the number of days without rain. Subsequently, still under a model selection perspective and focusing on watersheds characterized by continuously predominant land uses, we extended our analysis to encompass relatively larger watersheds. In this context, we incorporated intrinsic watershed characteristics into our investigations, including their size and average slope. Overall, we found that rainfall and erosion are the main factors influencing water quality and that both native vegetation and soil vegetation cover have a limited capacity to protect water resources. Nevertheless, in instances characterized by low soil vegetation cover juxtaposed with heavy rainfall events, the protective role of vegetation cover proved to be highly relevant. Furthermore, our observations revealed that individual characteristics of each watershed can modulate the effects of each land use. This phenomenon is particularly relevant for watersheds predominantly occupied by sugarcane. Additionally, our findings revealed that the direct influence of slope on phosphorus levels is slightly stronger for pasture-dominated watersheds, and we identified the potential presence of pasture degradation within our study areas. After deepening our understanding of the influence of continuously predominant land uses, we included in our third and final chapter an investigation of the impact of land use intensification on water quality. Therefore, we analyzed and compared two groups of watersheds: those characterized by stable land use practices over time and those that underwent a transition towards greater intensification. In this chapter, we extended the historical period studied and focused on understanding trends in water quality using linear models with and without thresholds. We observed non-significant trends across a spectrum of water quality parameters and various watersheds, with greater degradation of water resources in watersheds predominantly covered with pasturelands. While certain cases within our analysis revealed a trend towards deteriorating water quality in response to increased land use intensity, this was not the prevailing result. Our findings allow us to conclude that precipitation and erosion are the main drivers modulating water quality, both in first-order watersheds and in relatively larger watersheds. Our study not only demonstrates the potential environmental risks associated with land use intensification but also provides evidence for potential negative impacts on water quality resulting from inadequate management of low-intensity land uses, such as

extensive pasture management. Our results are of fundamental importance in the context of water security decision-making by pointing out the variables that potentially impact water quality. Particularly, our findings reveal the significant effect of rainfall on water quality, the low protective effect of vegetation cover (agricultural or natural), and differences between different land uses and soil management intensities. Therefore, our study underscores the imperative need to integrate proper management of agricultural land uses and account for the ongoing changes in the global climate scenario to effectively mitigate the potential consequences of human interference in watersheds.

Keywords: soil vegetation cover, vegetation index, land use intensification, erosion, extensive land uses, model selection.

Introdução Geral

O crescimento da população mundial observado nas últimas décadas (Roberts, 2011) e subsequente aumento exponencial da demanda por recursos naturais, causando a substituição da vegetação nativa por usos antrópicos cada vez mais intensivos, têm levado à degradação dos ecossistemas naturais. Por conta deste crescente processo de deterioração, estes ecossistemas apresentam redução em sua capacidade de prover benefícios para os seres humanos, resultando em riscos para o bem-estar humano (Boesing et al., 2020).

Estes benefícios provenientes dos ecossistemas são conhecidos como “Serviços ecossistêmicos” (SE) (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), dentre os quais podemos destacar a provisão de água, incluindo tanto qualidade quanto quantidade de água (Piffer et al., 2021). A utilização do termo “qualidade da água” refere-se às características físicas, químicas e biológicas de um corpo d’água (Wang, 2001) e pode variar de acordo com o local, o clima e a presença de diferentes contaminantes (Likens & Buso, 2006; McKee et al., 2001; Ometo et al., 2000). Quando estas características estruturais e funcionais de um ecossistema aquático são negativamente alteradas, seja por aumento de nutrientes, temperatura ou sedimentos, entende-se que há uma degradação do recurso hídrico (Gücker et al., 2009; Rodriguez-Lloveras et al., 2015; Worrall & Burt, 1999).

Dentre as características naturais que afetam a qualidade da água estão inclusas as propriedades do solo, topografia, deposições atmosféricas, clima e hidrologia das bacias hidrográficas (Likens & Buso, 2006; McKee et al., 2001; Ometo et al., 2000; Wayland et al., 2002). Por outro lado, mudanças do uso da terra, especialmente de uma vegetação natural pristina para usos antrópicos (Giri & Qiu, 2016), são críticas para a determinação da qualidade da água, podendo levar a alterações nos níveis de contaminação do corpo d’água (Tong & Chen, 2002). A relação entre usos da terra e qualidade da água é complexa e difusa, podendo ser específica para cada região (Baker, 2005; Seeboonruang, 2012). As diferentes formas de uso da terra têm um efeito diferencial sobre os parâmetros que determinam a qualidade dos recursos hídricos (Uriarte et al., 2011), sendo que até mesmo práticas agrícolas diferentes em características ou localização, bem como a proporção, configuração e contexto de cada uso do solo, podem ter efeitos negativos

diferenciados (Baker, 2005; Lee et al., 2009; Yu et al., 2013).

Além das conversões de usos da terra, por via de regra, espera-se que sistemas produtivos com manejos mais intensivos, porém sem o foco na conservação de solos e recursos hídricos, possuam menor capacidade de manter funções hidrológicas (Ferraz et al., 2013). Neste contexto, torna-se crucial o entendimento dos impactos dessas atividades na qualidade da água em países com conhecida dominância de atividades agropastoris, como é o caso do Brasil. As áreas destinadas a atividades agropecuárias do Brasil possuem uma predominância histórica de características extensivas, com grandes áreas de pastagens que tem perdido espaço para outros cultivos, como a cana-de-açúcar, conseqüentemente tornando-se progressivamente um país de produções agrícolas com características predominantemente intensivas (Dias et al., 2016), o que pode resultar em relevante impacto na qualidade dos recursos hídricos.

Se por um lado as florestas são consideradas o tipo de cobertura da terra mais importante para manter a qualidade de riachos (Mello, Valente, Randhir, & Vettorazzi, 2018; Weill et al., 2001), as atividades agropecuárias são potenciais contribuintes para a degradação da qualidade da água (Maillard & Santos, 2008; Mello, Valente, Randhir, & Vettorazzi, 2018). No cultivo de cana-de-açúcar, por exemplo, caracterizado como um uso mais intensivo do solo quando comparado às pastagens, há utilização de fertilizantes (pouco aplicados em pastagens no território brasileiro), bem como de diferentes maquinários, o que pode resultar em maior aporte de nutrientes e concentração de sedimentos nos cursos d'água (Simpson et al., 2009; Taniwaki et al., 2017). Em locais onde há o predomínio da cana-de-açúcar outra potencial fonte de poluentes, específica do Brasil, é a aplicação da vinhaça como fertilizante. Positivamente vista como uma reciclagem de nutrientes (Donzelli, 2007), a vinhaça possui elevado valor fertilizante, com elevada turbidez, elevados índices de demanda bioquímica de oxigênio e rica em componentes orgânicos e íons, em especial nitrogênio, fósforo e potássio, sendo este último o principal elemento mineral que justifica a utilização deste resíduo (Martinelli et al., 2013; Ortegón et al., 2016; Prado et al., 2013; Silva et al., 2007; Simpson et al., 2009). Por ser altamente poluente, sua utilização deve estar de acordo com o tipo do solo do local, a distância às nascentes e os volumes adequados à região (Souza, 2007), a fim de prevenir o uso excessivo e a contaminação de corpos hídricos (Martinelli et al., 2013; Prado et al., 2013). Dessa forma, apesar de biocombustíveis como a cana-de-açúcar serem vistos como alternativas energéticas mais sustentáveis, é preciso um estudo mais amplo e

completo para se entender de fato o impacto dessa fonte energética no meio ambiente (Oliveira et al., 2019). Nesse sentido, sabe-se, por exemplo, que a conversão de áreas de pastagem para o cultivo de cana-de-açúcar, assim como a intensificação de áreas de pastagem com aumento da densidade na criação de gado decorrente da perda de áreas para outros cultivos (Freitas et al., 2023), podem resultar em acréscimos significativos nas perdas de N e P do solo e aumento da descarga nos corpos hídricos (Simpson et al., 2009). No entanto, são raros os estudos que procuram entender os efeitos dessas transições e, apesar de abordarem questões relevantes, eles frequentemente se baseiam em mesocosmos (Freitas et al., 2023) ou em pequenas sub-bacias de uma mesma bacia hidrográfica (Taniwaki et al., 2017). Entre esses estudos, são ainda mais escassos aqueles que consideram longos períodos de monitoramento da qualidade da água (Julian et al., 2017).

Adicionalmente, mudanças de uso da terra que envolvem a substituição da vegetação, seja esta nativa ou cultivada, tendem a ter consequências mais severas em regiões tropicais. Tais consequências estão associadas à maior liberação de nutrientes nos corpos hídricos devido à capacidade de seu solo de acumular grandes estoques de biomassa, especialmente após ocorrência de eventos intensos de precipitação (Tanaka et al., 2021). Isso ocorre porque a chuva influencia a erosão do solo, bem como o escoamento superficial, transportando consigo partículas do solo, o que se configura como uma significativa fonte de poluentes antrópicos em uma determinada bacia hidrográfica (Fang et al., 2012; Wayland et al., 2002; Wei et al., 2007). Em contrapartida, a poluição advinda de fontes difusas e não pontuais, como a agricultura, diminui dramaticamente em períodos de seca (Oliveira et al., 2016; Zhang et al., 2012). Portanto, a quantidade de precipitação tem um impacto na qualidade da água complementar aos efeitos dos usos da terra.

Extremos climáticos são cada vez mais esperados em uma realidade de mudanças climáticas globais, relacionadas a atividades humanas (Easterling et al., 2000), com aumento das chances de tempestades mais frequentes e intensas e períodos de seca mais longos nas regiões tropicais (IPCC, 2013). Por exemplo, as causas da crise hídrica sem precedentes que atingiu a região Sudeste do Brasil, entre os anos de 2013 e 2014, decorrente de um grande período de seca estão relacionadas com um sistema anômalo de alta pressão que persistiu por dois anos seguidos e que pode guardar relação com crescimento populacional, ampliação do consumo e até mesmo com mudanças climáticas

(Escobar, 2015). Dessa forma, considerar o regime de chuvas de um local e sua possível relação com os efeitos dos tipos de uso da terra, especialmente em um cenário de mudanças climáticas, é de extrema importância para o manejo de bacias hidrográficas e o planejamento dos usos da terra. Entretanto, apesar de diversos estudos mostrarem os diferentes efeitos dos usos do solo e da precipitação, essa intrínseca relação não foi ainda completamente compreendida, especialmente ao se considerar variações anuais para um mesmo tipo de uso do solo.

Adicionalmente, não foi possível encontrar um mesmo estudo que quantificasse e comparasse grupos de bacias hidrográficas quanto aos efeitos na qualidade da água decorrentes da intensificação ou manutenção de um mesmo tipo de uso do solo. Os estudos que buscam compreender essa relação habitualmente se concentram nas características de um ou mais tipos de uso do solo, de forma independente (Fernandes et al., 2014; Li et al., 2020; Mello et al., 2017; Tanaka et al., 2016), frequentemente focando em uma única bacia hidrográfica (Fernandes et al., 2014; L. M. de Oliveira et al., 2016; Shi et al., 2017). Além disso, estudos que examinam a influência de cultivos anuais, como a cana-de-açúcar, não consideram a variação na biomassa e os períodos de solo exposto após a colheita. Esses estudos comumente analisam o efeito da proporção dos diferentes usos do solo na qualidade da água (Mello, Valente, Randhir, dos Santos, et al., 2018; Uriarte et al., 2011) e/ou configuração desses usos na paisagem (Lee et al., 2009; Yu et al., 2013) e tendem a desconsiderar a variação anual existente (Nadaleti et al., 2020). Nesse mesmo sentido, apesar da sazonalidade ser incluída em alguns dos trabalhos encontrados (Cunha et al., 2016), essa variável vem apenas relacionada com fatores climáticos e variações sazonais de biomassa diretamente relacionadas com precipitação e quantidade de luz do sol (Bretas et al., 2021; Lintern, Webb, Ryu, Liu, Bende-Michl, et al., 2018), características das coberturas vegetais do solo, são frequentemente desconsideradas, sendo esta variável encontrada apenas nos estudos de Guo et al., 2019; Lintern, Webb, Ryu, Liu, Waters, et al., 2018.

Nesse contexto, a fim de contribuir para a gestão adequada dos recursos hídricos e assegurar a continuidade de oferta desse importante serviço ecossistêmico à população, especialmente considerando que a atual realidade de insegurança hídrica global já atinge 80% das pessoas (Vörösmarty et al., 2010), torna-se essencial compreender o impacto na qualidade da água decorrente das variações sazonais na biomassa, das suas interações com o regime de chuvas e da intensificação dos usos do solo, por meio de um estudo

comparativo de bacias de pequeno e médio porte monitoradas ao longo de um extenso período de análise.

Baseado no acima exposto, essa tese teve como objetivo geral entender como dinâmicas do uso da terra e características naturais de bacias hidrográficas estão afetando a qualidade da água em bacias hidrográficas do estado de São Paulo. Para isso, a tese foi dividida em três capítulos:

1. O primeiro capítulo contribui para o entendimento de como variações sazonais da cobertura vegetal, tanto nativa quanto antrópica, e variações na quantidade de chuva se relacionam com a qualidade da água em bacias hidrográficas de primeira ordem. Nesse capítulo pudemos focar nas variáveis sazonais, uma vez que as bacias estudadas possuem características de solo, configuração de canal, topografia e declividade média semelhantes, portanto, controlando-as para possíveis efeitos de suas características intrínsecas.
2. Já o segundo capítulo parte para uma análise mais ampla, com bacias de até terceira ordem, mas ainda com uso da terra predominante que se manteve durante o período estudado. Estas análises permitem entender diferenças e semelhanças entre bacias hidrográficas ocupadas por diferentes usos da terra (vegetação nativa, cana-de-açúcar e pastagem), efeitos da cobertura vegetal e precipitação, bem como inclui um estudo das influências das características intrínsecas de cada uma das bacias, uma vez que agora elas estão inseridas em ambientes naturais com um espectro mais amplo de diferenças.
3. O terceiro capítulo avança mais um pouco nas análises e abrange um período histórico maior para permitir um entendimento dos efeitos da transição entre usos durante o processo de intensificação, comparando com as bacias que não passam por esse processo, tendo em vista as principais mudanças ocorridas no estado de São Paulo.
4. Por fim, apresentamos considerações finais a respeito do conhecimento gerado em cada um dos capítulos desenvolvidos.

Referências Bibliográficas

- Baker, A. (2005). Land use and water quality. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, 2501(May), 6. <https://doi.org/10.1002/0470848944>
- Boesing, A. L., Prist, P. R., Barreto, J., Hohlenwerger, C., Maron, M., Rhodes, J. R., et al. (2020). Ecosystem services at risk: integrating spatiotemporal dynamics of supply and demand to promote long-term provision. *One Earth*, 3(6), 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.11.003>
- Bretas, I. L., Valente, D. S. M., Silva, F. F., Chizzotti, M. L., Paulino, M. F., D'Áurea, A. P., et al. (2021). Prediction of aboveground biomass and dry-matter content in brachiaria pastures by combining meteorological data and satellite imagery. *Grass and Forage Science*, 76(3), 340–352. <https://doi.org/10.1111/gfs.12517>
- Cunha, D. G. F., Calijuri, M. do C., Lamparelli, M. C., & Menegon Jr, N. (2013). Resolução CONAMA 357 / 2005 : análise espacial e temporal de não conformidades em rios e reservatórios do estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos (2005 – 2009) CONAMA Framework Resolution 357 / 2005 : spatial and temporal analysis of water. *Eng Sanit Ambient*, 18(2), 159–168.
- Cunha, D. G. F., Sabogal-Paz, L. P., & Dodds, W. K. (2016). Land use influence on raw surface water quality and treatment costs for drinking supply in São Paulo State (Brazil). *Ecological Engineering*, 94, 516–524. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.063>
- Dias, L. C. P., Pimenta, F. M., Santos, A. B., Costa, M. H., & Ladle, R. J. (2016). Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Global Change Biology*, 22(8), 2887–2903. <https://doi.org/10.1111/gcb.13314>
- Donzelli, J.L. (2007). Uso de fertilizantes na produção de cana-de-açúcar no Brasil. In: Macedo, I.C. (org). *A Energia da Cana-de-Açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. 2 ed. São Paulo : Berlendis & Vertecchia : UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo. Chapter 9.2, 166-171.
- Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R., & Mearns, L. O. (2000). Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 289(5487), 2068–2074. <https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2068>

- Escobar, H. (2015). Drought triggers alarms in Brazil's biggest metropolis. *Science*, 347(6224), 812.
- Fang, N. F., Shi, Z. H., Li, L., Guo, Z. L., Liu, Q. J., & Ai, L. (2012). The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed. *Catena*, 99, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.07.004>
- Fernandes, J. de F., de Souza, A. L. T., & Tanaka, M. O. (2014). Can the structure of a riparian forest remnant influence stream water quality? A tropical case study. *Hydrobiologia*, 724(1), 175–185. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1732-1>
- Ferraz, S. F. B., Lima, W. de P., & Rodrigues, C. B. (2013). Managing forest plantation landscapes for water conservation. *Forest Ecology and Management*, 301, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.015>
- Freitas, I. B. F., Neto, P. J. D., Lopes, L. F. de P., Yoshii, M. P. C., Giroto, L., Gabriel, G. V. de M., et al. (2023). Soil management effects of extensive pastures, intensive pastures and sugarcane crops on the availability of metals and nutrients in freshwater: A realistic mesocosm approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 350(February), 108473. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108473>
- Giri, S., & Qiu, Z. (2016). Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review. *Journal of Environmental Management*, 173, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.029>
- Gücker, B., BoËchat, I. G., & Giani, A. (2009). Impacts of agricultural land use on ecosystem structure and whole-stream metabolism of tropical Cerrado streams. *Freshwater Biology*, 54(10), 2069–2085. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02069.x>
- Guo, D., Lintern, A., Webb, J. A., Ryu, D., Liu, S., Bende-Michl, U., et al. (2019). Key Factors Affecting Temporal Variability in Stream Water Quality. *Water Resources Research*, 55(1), 112–129. <https://doi.org/10.1029/2018WR023370>
- IPCC (2013). Climate change 2013: the physical science basis. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds), Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, 1535 pp
- Julian, J. P., De Beurs, K. M., Owsley, B., Davies-Colley, R. J., & Ausseil, A. G. E. (2017). River water quality changes in New Zealand over 26 years: Response to land use intensity.

Hydrology and Earth System Sciences, 21(2), 1149–1171. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1149-2017>

Lee, S. W., Hwang, S. J., Lee, S. B., Hwang, H. S., & Sung, H. C. (2009). Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning*, 92(2), 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.02.008>

Li, Y., Are, K. S., Huang, Z., Guo, H., Wei, L., Abegunrin, T. P., et al. (2020). Particulate N and P exports from sugarcane growing watershed are more influenced by surface runoff than fertilization. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 302(July), 107087. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107087>

Likens, G. E., & Buso, D. C. (2006). Variation in streamwater chemistry throughout the Hubbard Brook Valley. *Biogeochemistry*, 78(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-2024-2>

Lintern, A., Webb, J. A., Ryu, D., Liu, S., Bende-Michl, U., Waters, D., et al. (2018). Key factors influencing differences in stream water quality across space. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(1), e1260. <https://doi.org/10.1002/wat2.1260>

Lintern, A., Webb, J. A., Ryu, D., Liu, S., Waters, D., Leahy, P., et al. (2018). What Are the Key Catchment Characteristics Affecting Spatial Differences in Riverine Water Quality? *Water Resources Research*, 54(10), 7252–7272. <https://doi.org/10.1029/2017WR022172>

Maillard, P., & Santos, N. A. P. (2008). A spatial-statistical approach for modeling the effect of non-point source pollution on different water quality parameters in the Velhas river watershed - Brazil. *Journal of Environmental Management*, 86, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.009>

Martinelli, L. a, Filoso, S., Aranha, C. D. B., Ferraz, S. F. B., Andrade, T. M. B., Ravagnani, E. D. C., & Coletta, L. Della. (2013). Water Use in Sugar and Ethanol Industry in the State of São Paulo (Southeast Brazil). *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 3(January), 135–142. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2013.32019>

McKee, L., Eyre, B., Hossain, S., & Pepperell, P. (2001). Marine Freshwater geochemistry in the subtropical Richmond River catchment , Australia. *Marine and Freshwater Research*, 52, 235–248.

Mello, K. de, Randhir, T. O., Valente, R. A., & Vettorazzi, C. A. (2017). Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds. *Ecological Engineering*, 108,

514–524. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.049>

Mello, K. de, Valente, R. A., Randhir, T. O., dos Santos, A. C. A., & Vettorazzi, C. A. (2018). Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone. *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.027>

Mello, K. de, Valente, R. A., Randhir, T. O., & Vettorazzi, C. A. (2018). Impacts of tropical forest cover on water quality in agricultural watersheds in southeastern Brazil. *Ecological Indicators*, 93(April), 1293–1301. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.030>

Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human WellBeing: Synthesis* (Island Press). Retrieved from <http://www.millenniumassessment.org/en/Synthesis.aspx>.

Nadaleti, W. C., Lourenço, V. A., Filho, P. B., Santos, G. B. Dos, & Przybyla, G. (2020). National potential production of methane and electrical energy from sugarcane vinasse in Brazil: A thermo-economic analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103422. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103422>

Oliveira, D. M. S., Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Santos, A. S., Gelain, J. G., Dias, N. M. S., et al. (2019). Is the expansion of sugarcane over pasturelands a sustainable strategy for Brazil's bioenergy industry? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102(April 2018), 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.012>

Oliveira, L. M. de, Maillard, P., & Pinto, É. J. de A. (2016). Modeling the effect of land use/land cover on nitrogen, phosphorous and dissolved oxygen loads in the Velhas River using the concept of exclusive contribution area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(6), 188–333. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5323-2>

Ometo, J. P. H. B., Martinelli, L. A., Ballester, M. V., Gessner, A., Krusche, A. V, Victoria, R. L., & Williams, M. (2000). Effects of land use on water chemistry and macroinvertebrates in two streams of the Piracicaba river basin, south-east Brazil. *Freshwater Biology* (2000), 44, 327–337.

Ortegón, G. P., Arboleda, F. M., Candela, L., Tamoh, K., & Valdes-Abellan, J. (2016). Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.153>

Piffer, P. R., Tambosi, L. R., Ferraz, S. F. de B., Metzger, J. P., & Uriarte, M. (2021). Native forest

- cover safeguards stream water quality under a changing climate. *Ecological Applications*, 31(7), 1–12. <https://doi.org/10.1002/eap.2414>
- Prado, R. D. M., Caione, G., & Campos, C. N. S. (2013). Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. *Applied and Environmental Soil Science*. <https://doi.org/10.1155/2013/581984>
- Roberts, L. (2011). Population is growing steadily. *Science*, 333(July), 540–544. <https://doi.org/10.1787/9789264202085-graph4-en>
- Rodriguez-Lloveras, X., Bussi, G., Francés, F., Rodriguez-Caballero, E., Solé-Benet, A., Calle, M., & Benito, G. (2015). Patterns of runoff and sediment production in response to land-use changes in an ungauged Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 531, 1054–1066. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.014>
- Seeboonruang, U. (2012). A statistical assessment of the impact of land uses on surface water quality indexes. *Journal of Environmental Management*, 101, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.10.019>
- Shi, P., Zhang, Y., Li, Z., Li, P., & Xu, G. (2017). Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. *Catena*, 151, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.017>
- Silva, M. A. S., Griebeler, N. P., & Borges, L. C. (2007). Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(1), 108–114.
- Simpson, T. W., Martinelli, L. A., Sharpley, A. N., & Howarth, R. W. (2009). Impact of Ethanol Production on Nutrient Cycles and Water Quality: The United States and Brazil as Case Studies. In C. U. L. I. in P. (CIP) (Ed.), *Biofuels: Environmental Consequences & Implications of Changing Land Use* (pp. 153–167). NY.
- Souza, S.A.V. (2007). Vinhaça: o avanço das tecnologias de uso. In: Macedo, I.C. (org). A Energia da Cana-de-Açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. 2 ed. São Paulo : Berlendis & Vertecchia : UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2007. Chapter 9.3, 171-177.
- Tanaka, M. O., de Souza, A. L. T., Moschini, L. E., & de Oliveira, A. K. (2016). Influence of watershed land use and riparian characteristics on biological indicators of stream water quality in southeastern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.10.016>

- Tanaka, Y., Minggat, E., & Roseli, W. (2021). The impact of tropical land-use change on downstream riverine and estuarine water properties and biogeochemical cycles: a review. *Ecological Processes*, *10*(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00315-3>
- Taniwaki, R. H., Cassiano, C. C., Filoso, S., Ferraz, S. F. de B., Camargo, P. B. de, & Martinelli, L. A. (2017). Impacts of converting low-intensity pastureland to high-intensity bioenergy cropland on the water quality of tropical streams in Brazil. *Science of the Total Environment*, *584–585*, 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.150>
- Tong, S. T. Y., & Chen, W. (2002). Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Environmental Management*, *66*(4), 377–393. <https://doi.org/10.1006/jema.2002.0593>
- Uriarte, M., Yackulic, C. B., Lim, Y., & Arce-Nazario, J. A. (2011). Influence of land use on water quality in a tropical landscape: A multi-scale analysis. *Landscape Ecology*, *26*(8), 1151–1164. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9642-y>
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., et al. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, *467*(7315), 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- Wang, X. (2001). Integrating water-quality management and land-use planning in a watershed context. *Journal of Environmental Management*, *61*(1), 25–36. <https://doi.org/10.1006/jema.2000.0395>
- Wayland, K. G., Hyndman, D. W., Boutt, D., Pijanowski, B. C., & Long, D. T. (2002). Modelling the impact of historical land uses on surface-water quality using groundwater flow and solute-transport models. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, *7*(3), 189–199. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2002.00187.x>
- Wei, W., Chen, L., Fu, B., Huang, Z., Wu, D., & Gui, L. (2007). The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of Hydrology*, *335*(3–4), 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.11.016>
- Weill, M. A. M., Rocha, J. V., & Lamparelli, R. . (2001). Potencial natural de erosão e riscos de degradação na bacia hidrográfica do rio Mogi-Guaçu. In *VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão* (pp. 1–10). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/267373188>

- Worrall, F., & Burt, T. P. (1999). The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: The use of export coefficient and structural models. *Journal of Hydrology*, 221(1–2), 75–90. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00084-0)
- Yu, D., Shi, P., Liu, Y., & Xun, B. (2013). Detecting land use-water quality relationships from the viewpoint of ecological restoration in an urban area. *Ecological Engineering*, 53, 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.045>
- Zhang, W., Li, H., Sun, D., & Zhou, L. (2012). A statistical assessment of the impact of agricultural land use intensity on regional surface water quality at multiple scales. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(11), 4170–4186. <https://doi.org/10.3390/ijerph9114170>

Discussão geral e conclusões

É evidente a existência de um *trade-off* entre os serviços ecossistêmicos, tais como a produção de alimentos e a oferta de água na quantidade e qualidade necessárias. Com o crescente aumento da população mundial e a constatação de que a insegurança hídrica já é uma realidade para 80% das pessoas no mundo, é de extrema urgência compreender os principais fatores relacionados à manutenção desse importante serviço ecossistêmico. Neste estudo, percorremos três capítulos que buscam compreender como os usos e a cobertura do solo podem influenciar a qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas, levando em consideração a interação desses fatores com a precipitação e as características naturais das bacias.

Inicialmente trabalhamos com bacias hidrográficas de primeira ordem, controlando suas variáveis intrínsecas. Em seguida, direcionamos nossa atenção para bacias hidrográficas de pequena ordem, predominantemente ocupadas por um único tipo de uso do solo, porém relativamente maiores e mais diversas em relação às suas características naturais. De maneira geral, observamos que o regime pluviométrico e a erosão são as principais variáveis que modulam a qualidade da água. Adicionalmente, a proporção de vegetação nativa nas bacias estudadas revelou um impacto positivo na qualidade da água, porém um poder limitado na proteção dos recursos hídricos. Estes resultados reforçam que a expectativa de que a presença de florestas nativas por si só pode atuar como barreira contra poluentes está equivocada, evidenciando que a configuração, e o status de conservação tem importante papel na determinação de sua capacidade de melhorar a qualidade da água nos corpos hídricos, porém pode ser limitada pelo manejo das áreas antrópicas.

Além disso, para alguns dos parâmetros estudados, a interação entre a precipitação e a quantidade de vegetação agrícola e/ou nativa cobrindo o solo emergiu como um dos fatores mais relevantes na determinação dos níveis de nutrientes e sedimentos na água, sendo que a quantidade de vegetação agrícola e/ou nativa cobrindo o solo foi parcialmente eficaz em mitigar o impacto negativo da chuva e da erosão na qualidade da água. Este resultado reforça que os impactos sobre os recursos hídricos podem apresentar oscilações sazonais, apresentando maior magnitude nas estações mais chuvosas. Observamos que os momentos ao longo do ano de maior cobertura vegetal são também os de maior ocorrência de chuva, o que limita o potencial protetor da cobertura vegetal devido ao grande volume de chuvas nas estações mais úmidas. No entanto, nos casos de eventos de chuvas extremas em épocas de baixa cobertura vegetal, a quantidade de vegetação recobrando o solo demonstrou exercer um efeito protetivo crucial.

Além disso, nossos resultados destacaram que as características intrínsecas de cada bacia podem modular os efeitos dos usos do solo na qualidade da água. Detectamos ainda similaridades nas

variáveis preditoras mais relevantes entre os três tipos de uso do solo estudados. Entretanto, identificamos também a possível presença de pastagens degradadas em nossa área de estudo, caracterizadas por uma menor capacidade de evitar desprendimento do solo e uma subsequente taxa elevada de erosão.

Em nosso terceiro e último capítulo, também encontramos evidências da presença de pastagens degradadas com resultante piora na qualidade da água. Diferentemente dos demais capítulos, analisamos um período histórico mais extenso e concentramos nossos esforços na compreensão das tendências da qualidade da água ao longo do tempo. Comparamos bacias hidrográficas de uso constante ao longo do tempo e bacias hidrográficas que passaram por um processo de intensificação no uso do solo. Apesar da expectativa de que a intensificação resultasse em uma deterioração na qualidade da água, esse resultado não foi encontrado para todos os parâmetros e nem para todas as bacias. Hipotetizamos que o maior uso de fertilizantes e a presença de melhores práticas de manejo de solo, características de práticas agrícolas intensivas e que potencialmente resultariam numa piora da qualidade da água, possam inicialmente contribuir para uma recuperação da bacia hidrográfica, uma vez que o uso menos intensivo anterior (geralmente pastagens) podem ter deixado um cenário de degradação. Adicionalmente, frequentemente encontramos tendências não estatisticamente significativas para todos os usos, o que, embora esperado para bacias predominantemente cobertas por vegetação nativa, não seria o resultado esperado para as bacias agrícolas. Isso pode ser consequência de um *time-lag* até que os efeitos resultantes de um novo manejo do solo se manifestem na qualidade da água, especialmente para as bacias que passaram por um processo de intensificação no uso do solo nas quais as mudanças de uso do solo são mais recentes.

Finalmente, concluímos que a precipitação e a cobertura vegetal, quando consideradas em conjunto, influenciam a qualidade da água e essa interação guarda relevante relação com características intrínsecas das bacias hidrográficas. Evidenciamos a existência de um risco ambiental associado à substituição de práticas agrícolas menos intensivas pela agricultura intensiva de commodities, ao mesmo tempo que demonstramos potenciais impactos negativos na qualidade da água resultantes da manutenção de pastagens extensivas sem o manejo adequado. Portanto, ressaltamos a importância de se adotar estratégias de conservação e restauração de áreas florestais nativas, mas que estas devem ser obrigatoriamente acompanhadas da adoção de boas práticas de manejo, quer sejam em áreas de baixa intensidade de uso quanto em áreas de alta intensidade de uso. Nossos resultados têm particular relevância no atual contexto de mudanças climáticas e abordam questões cruciais na gestão hídrica e manutenção da segurança hídrica.