



Impacto observado das mudanças no uso e cobertura da terra na hidrologia de bacias com ênfase em regiões tropicais

Lucas Garofolo¹ , Daniel Andrés Rodriguez² 

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rodovia Presidente Dutra, s/n Km 40, Prédio do CCST, INPE, Zona Rural, CEP 12630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Avenida Moniz Aragão, 360, Bloco 1, Ilha do Fundão - Cidade Universitária, CEP 21941-594, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*Autor correspondente:
lucas.garofolo@inpe.br

Termos para indexação:

Ciclo hidrológico
Bacias hidrográficas
Efeito de escala

Index terms:

Hydrological cycle
Watersheds
Scale effect

Histórico do artigo:

Recebido em 25/11/2019
Aprovado em 16/12/2021
Publicado em 07/07/2022

Resumo - Este artigo apresenta uma perspectiva geral dos impactos observados por mudanças no uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas, com ênfase em regiões tropicais. Primeiramente, são abordadas as primeiras asserções sobre os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra, os primeiros debates e os artigos científicos pioneiros em relação ao tema. Então, se expõe, em termos gerais, os impactos diretos e indiretos das mudanças no uso e cobertura da terra e o papel das florestas nesse contexto. Em seguida, apresenta-se um levantamento não detalhado de estudos em nível mundial e explora-se as regiões tropicais, com estudos na América do Sul, Ásia e África. Adicionalmente, discute-se o efeito de escala, tanto nos estudos em geral quanto na fragmentação dos habitats e considerações finais, identificando algumas tendências e propostas para o futuro de estudos no tema.

Observed impact of land use and cover change in catchments hydrology with emphasis in tropical regions

Abstract - This paper presents an overview of the observed impacts of changes in land use and land cover on catchments hydrology with emphasis on tropical regions. Initially, the first assertions about the impacts of changes in land use and land cover we present. The first debates and the scientific pioneers on the subject in this context. Then we mention the direct and indirect impacts of changes in land use and land cover and the role of forests we present. A brief survey of studies from around the world explores the tropical regions, with studies in South America, Asia and Africa. The scale effect of general studies and regarding habitat fragmentation is discussed, and finally, in the final considerations, some trends and proposals for the future of these studies are presented.



Introdução

Atualmente, há um debate científico muito amplo sobre a influência humana nos ecossistemas. De acordo com pesquisas, o ser humano apropria-se de cerca de 40% da produtividade primária em matéria verde por ano. Consumimos 35% da produtividade oceânica e usufruímos de 60% da água doce do planeta (Sanderson et al., 2002). Segundo Williams et al. (2020) cerca de 58% da superfície terrestre está sob pressão antrópica moderada ou intensa. Esses mesmos autores complementam que, na primeira década do século XXI, 1,9 milhões de km² de áreas primárias tornaram-se altamente modificadas. Resultados recentes fornecem evidências de que a aquisição de terras em larga escala em países tropicais foram concedidos, preferencialmente, em áreas florestais, sendo que mais da metade desses investimentos estão associados à perda florestal acelerada desde o início do século XXI (Davis et al., 2020; Williams et al., 2020).

O aumento exponencial da população humana e o consumo imoderado vem resultando em crises ambientais nunca antes vistas na história da humanidade (McNeill, 2000). Para alguns autores, uma nova era geológica foi definida, denominada de Antropoceno, onde os efeitos cumulativos das mudanças locais são fenômenos globais e relacionados à influência do homem sobre a natureza (Steffen & Tyson, 2001).

Chamada por Vitousek (1997) como a maior ameaça à biodiversidade biológica, a mudança no uso e cobertura da terra resultou na perda e fragmentação do habitat em vários ecossistemas. Um bom exemplo sul-americano é a Mata Atlântica, sendo degradada desde o período colonial brasileiro. A conversão da vegetação natural pode ter diferentes fins: construção de moradias, produção de alimento, pecuária e agrícola, mineração, entre outros. O crescimento da agricultura nos últimos 30 anos, decorrente do aumento populacional, acarretou um aumento nas demandas de água doce para consumo, indústria e irrigação (Tilman et al., 2001), e também mudanças nas taxas mundiais de fixação de nitrogênio e acúmulo de fósforo nos solos e na água.

O uso e cobertura da terra e os recursos hídricos estão inextricavelmente ligados, visto que as mudanças no uso e cobertura da terra podem impactar de forma direta e indireta, por meio de mudanças nos níveis de escoamento superficial e subterrâneo e alterações nos componentes biosfera-atmosfera e, em específico, no fluxo de água e

energia. Dentre os desafios inerentes à ciência hidrológica podemos destacar a análise de impactos das mudanças no uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas. Uma das dificuldades metodológicas enfrentadas é a escassez de dados de longo prazo, em diversas regiões do mundo, onde a medição ou monitoramento dos corpos d'água apenas se consolidou com o avanço da tecnologia. Além disso, o desafio torna-se maior quando consideramos que ainda há outros fatores que podem influenciar ou serem influenciados pelo manejo de bacias, como sedimentos, hidroquímica e hidroecologia, sendo estes fortemente ligados às mudanças no uso e cobertura da terra (McIntyre et al., 2014). Isso mostra a multidisciplinariedade, as variáveis e sujeitos que estão envolvidos nesta área de pesquisa.

Atualmente, há técnicas para mapear e analisar os impactos antrópicos por meio de análises observacionais de mapas temporais, dados hidrometeorológicos, análise biogeoquímica, além de um maior monitoramento e discussão em torno da legislação vigente no Brasil e no mundo. Nesta revisão, discutiremos os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra na hidrologia de bacias com ênfase em zonas tropicais, analisando diferentes mudanças de uso e cobertura da terra e metodologias utilizadas em diferentes regiões.

Impacto observado das mudanças no uso e cobertura da terra na hidrologia de bacias

A mudança no uso e cobertura da terra foi um dos primeiros modos de intervenção antrópica no meio ambiente. O aumento populacional e o desenvolvimento socioeconômico resultaram no crescimento urbano, expansão e intensificação da agricultura, extração de madeira, minério e outros recursos naturais, o que se traduziu numa maior pressão antrópica sobre os ecossistemas e sobre a paisagem.

Histórico sobre o debate e pesquisas pioneiras

O debate sobre os efeitos do uso e cobertura da terra no ciclo hidrológico iniciou-se na antiguidade. Provavelmente “Plínio, o Velho” foi o primeiro a realizar assertivas sobre o papel das florestas no ciclo hidrológico, no documento História Natural (*Natural History*). Ele observou que torrentes desastrosas eram formadas após a derrubada de bosques e florestas, sendo que antes estes fragmentos florestais costumavam conter as nuvens e se alimentar delas (Andréassian, 2004).

Este mesmo debate se mantém ao longo do tempo com algumas obras como “Sobre águas e florestas” (*Eaux et Forêt*) de autoria do rei francês Phillipe Auguste em 1219. No século XVIII, Bernardin de Saint Pierre, entre 1784 e 1788, publica o livro “Estudos da Natureza” (*Etudes de la Nature*), com ricas descrições e baseado numa compilação de informações coletadas por ele mesmo e por outros viajantes (Andréassian, 2004). No segundo volume dessa obra, o autor descreve o impacto das florestas na chuva e nas descargas em Mauritius e, através desta observação, propõe o reflorestamento de parte da França na intenção de restituir os volumes de água (Andréassian, 2004). Rougier de la Bergerie relata suas observações sobre algumas regiões da França em seu livro intitulado “Anotações sobre os abusos do desmatamento e destruição de bosques e florestas”, onde mostra uma longa lista de florestas que foram desmatadas e as consequentes inundações catastróficas (Andréassian, 2004).

Partindo do debate histórico para o início do debate científico, as medições de Belgrand (1850-1852), Jandel, Cantégril e Bellaud (1858-1859) e as medições de Mathieu (1867-1877) sobre chuva interceptada foram alguns dos trabalhos empíricos pioneiros na produção de dados (Andréassian, 2004). Mais recentemente, no século XX, a análise mais ampla envolvendo pesquisas científicas pioneiras sobre o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra foram iniciadas com o trabalho de Hibbert (1967). O autor analisou os resultados de trinta e nove estudos hidrológicos em bacias experimentais em regiões temperadas e percebeu que houve um aumento da vazão em áreas desmatadas e uma diminuição da mesma após o reflorestamento. Bosch & Hewlet (1982) chegaram a conclusões similares. De acordo com tais autores, na maior parte dos casos, a vegetação florestal tende a diminuir os processos de escoamento, quando comparada a regiões onde predominam vegetações rasteiras. Também na década de 1980, Cheng (1989), em uma bacia de 30 km² no Canadá, corroborou a ideia de que a conversão da vegetação florestal em outro uso da terra provoca aumentos nas vazões mensais e anuais, além de interferir nos valores máximos. Resultados similares foram constatados por Fritsch (1990), Cornish (1993), Jayasuriya et al. (1993), Scott & Lesch (1997) e Hornbeck et al. (1997).

Uma das primeiras metodologias utilizadas por pesquisadores para analisar os impactos das mudanças

no uso e cobertura da terra foi o uso de bacias pareadas. O princípio das bacias pareadas é simples e continua a ser referência para estudos sobre os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra na hidrologia das bacias. O conceito de bacias pareadas baseia-se na seleção de duas bacias hidrográficas com aspectos o mais semelhante possível, principalmente no que tange ao tamanho, morfologia, geologia, forçante climática e uso da terra. Esse alto grau de similaridade leva a crer que as duas bacias hidrográficas vão reagir de maneira semelhante às entradas climáticas; no entanto, como é inevitável, cada bacia tem suas peculiaridades.

Ainda hoje são realizados estudos utilizando a metodologia de bacias pareadas para analisar os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra. Rodríguez-Martínez & Santiago (2017) realizaram uma pesquisa nas bacias do Rio Tanamá e Guaónica, localizadas nos municípios de Adjuntas e Utuado, respectivamente, em Porto Rico. A bacia do Rio Tanamá possui 81% de vegetação de porte florestal com remanescentes agrícolas, principalmente de café e bananas, enquanto a bacia do Rio Guaónica possui apenas 59% deste mesmo padrão vegetal, com condições climáticas, hidrogeológicas e de informações relacionadas à escala similares entre as duas. Os resultados indicam que uma quantidade substancial da precipitação anual (45 e 39% no Rio Guaónica e Rio Tanamá, respectivamente) podem percolar à subsuperfície e, posteriormente, emergir como fluxo de base. O fluxo médio anual de base nas bacias hidrográficas do Rio Guaónica e Rio Tanamá são similares, com 79% da vazão média anual por unidade de área para ambas as bacias. Segundo esses autores, a ausência de uma relação consistente entre mudanças no uso e cobertura da terra e fluxo de base é evidente nestes resultados. Outros fatores que não o uso da terra aparentemente têm efeito no fluxo de base nessas bacias montanhosas.

Andréassian (2004) realizou uma síntese dos resultados publicados em diferentes periódicos de 1984 a 2004. Foram 137 experimentos de bacias pareadas, 115 experimentos de desmatamento e 22 de reflorestamento, sendo que a maioria relatava estudos em bacias hidrográficas menores que 2 km². Esse autor concluiu que, em geral, o desmatamento aumentava as vazões anuais, enquanto o reflorestamento as diminuía. Porém, alguns resultados são extremamente dispersos, como já havia sido observado por Hibbert

(1967), reiterando a ideia que a resposta hidrológica às mudanças florestais é altamente variável e, na maior parte, imprevisível.

No século XXI, trabalhos como o de Zhang et al. (2001), Brown et al. (2005), Zhao et al. (2010), Liang et al. (2015) e Buendia et al. (2016) concordam com a ideia geral de que a expansão da floresta resulta na diminuição dos valores de escoamento. Não obstante, estes trabalhos também mostram que a variabilidade da resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica está relacionada não só às características da superfície, mas também a outros elementos locais, como clima, solos e topografia.

O papel das florestas e os impactos diretos e indiretos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a hidrologia de bacias

Sabe-se que algumas funções são inerentes às vegetações florestais, como o arrefecimento local e a manutenção dos fluxos de umidade e padrões de chuva. O resfriamento é explicitamente incorporado à capacidade das árvores de capturar e redistribuir a energia solar. A liberação de vapor d'água continental é auxiliada pelas vegetações florestais, por meio da evapotranspiração – evaporação do solo e superfícies de plantas e transpiração de água pelas plantas. Ao evapotranspirar, as árvores recarregam a umidade atmosférica, contribuindo para a formação de precipitações locais e em locais distantes, por meio do transporte de umidade. A umidade atmosférica que resulta deste processo é circulada pelos ventos nos continentes e oceanos da terra. Essa reciclagem de precipitação, produção e transporte da umidade atmosférica pode promover e intensificar a redistribuição da água por meio das superfícies terrestres (Ellison et al., 2017). Em média, 40% da precipitação sobre a superfície terrestre é decorrente da evapotranspiração (Van der Ent et al., 2010). Segundo esses autores, em algumas regiões, como na bacia do rio da Prata (localizada entre o Sul/Sudeste Brasileiro, Argentina, Paraguai e Uruguai), a evapotranspiração originária da Amazônia contribui com mais de 70% da precipitação. A conversão e a degradação florestal reduzem os níveis de evapotranspiração, com implicações na geração de precipitação, tanto local como em longas distâncias (Debortoli et al., 2016).

Em geral, as mudanças no uso e cobertura da terra afetam a resposta hidrológica das bacias, por meio de modificações nos processos de evapotranspiração e de geração de escoamento, os quais estão diretamente

associados com o tipo de vegetação (Bruijnzeel, 2004; Andréassian, 2004), mas também, indiretamente, por meio da retroalimentação entre a superfície continental e a atmosfera, que modifica as condições do clima local (Pielke, 2005; Pereira Filho et al., 2015). A retroalimentação entre a superfície terrestre e a atmosfera surge do fato de que, se os fluxos de calor e água da superfície da terra para a atmosfera mudarem, a umidade, temperatura e a pressão do ar mudarão como consequência (Overgaard et al., 2006), gerando alterações na redistribuição espacial do fluxo de calor sensível e latente (Pielke et al., 2002), bem como na precipitação e convergência da umidade (Pielke & Chase, 2003). O intercâmbio de umidade, momentum e calor entre atmosfera e superfície é influenciado pela variabilidade espacial do albedo (Faria et al., 2018), índice de área foliar, condutância estomática, umidade do solo e rugosidade da superfície (Avissar, 1992) e, conseqüentemente, atingem a camada limite planetária (Fisch et al., 2004). Como o clima exerce uma grande influência nos fluxos de superfície, as modificações nas condições atmosféricas podem afetar significativamente a superfície, afetando, também, os processos de retroalimentação com a vegetação remanescente, podendo levar à redução do acúmulo de biomassa, às secas e aos incêndios (Duffy et al., 2015).

Outros efeitos são a erosão, decorrente da mudança de vegetação, a erosão dos depósitos de riachos e a morfologia do rio, alterando as características do escoamento e também a interação água subterrânea-superfície. Além de alterações na disponibilidade hídrica, impactos no solo e nos processos subsuperficiais, a fragmentação da paisagem pode acarretar, diminuição da qualidade da água produzida (Collinge, 1996).

Em se tratando de mudanças no uso e cobertura da terra, há consenso popular de que a vegetação natural possui a resiliência como uma capacidade permanente, ou seja, se houver uma alteração antrópica e, posteriormente, esta for abandonada, a vegetação natural irá se restabelecer com o tempo. Jakovac et al. (2015), com o intuito de entender como a intensificação do uso da terra afeta essa resiliência florestal, amostraram 38 pontos sob cobertura de vegetação secundária na região Central da Amazônia. Os resultados mostraram uma clara relação entre a intensificação do uso da terra com a estrutura da vegetação, fazendo com que tal vegetação se desvie cada vez mais do processo sucessional natural, mostrando taxas de recuperação cada vez mais baixas.

Segundo Jakovac et al. (2015), nas condições extremas da intensificação do uso e cobertura da terra, o processo sucessional natural pode ser substituído por trajetórias alternativas da cobertura vegetal, caso haja alguma ação que impeça o retorno ao seu estado anterior. Esses autores reforçam que é possível que ocorra a perda de resiliência, ou seja, a perda da capacidade da vegetação de retornar ao seu estado anterior, quebrando o mito de que essa é uma capacidade inerente das vegetações, e consequentemente, dos biomas.

Impactos observados das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a hidrologia de bacias em regiões tropicais

Muitos dos impactos da conversão florestal a um novo uso e cobertura da terra são conhecidos, pelo menos em termos gerais. Porém, os trópicos úmidos estão longe de serem homogêneos em termos de condições climáticas e de solo e, sendo assim, os resultados observados em região temperada não podem ser aplicáveis a regiões tropicais. Dentre as muitas diferenças entre zonas tropicais e temperadas, vale ressaltar a diferença no regime pluviométrico e a folhagem da vegetação, sendo na primeira majoritariamente do tipo perenifólia e na segunda caducifólia. Os estudos dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra em zonas tropicais são relativamente mais recentes que os realizados em zonas temperadas, visto que cada região possui suas particularidades. As regiões tropicais tornaram-se foco nos últimos anos, devido à lacuna de estudos e também devido à riqueza natural de algumas regiões na África e América do Sul, e a sua importância no sistema climático global. Regiões tropicais têm apontado mudanças no uso e cobertura da terra de forma extensiva nas últimas décadas (Lepers et al., 2005), devido ao aumento da demanda por agricultura e madeira, acarretando em desmatamento, em diversas regiões.

Entretanto, apesar dos níveis de desmatamento em zonas tropicais continuarem altos, a regeneração florestal sobre áreas de agricultura abandonadas vem crescendo, particularmente na América Central (Hecht, 2010). Beck et al. (2013) realizaram um estudo sobre o impacto da regeneração florestal em 12 micro bacias tropicais, localizadas em Porto Rico. Obtiveram mapas de 1951, 1978, 1991 e 2000, com dados de vazão do US Geological Survey (USGS). Embora tenha havido uma variabilidade considerável na mudança das vazões nas 12 regiões de captação examinadas pelos autores,

as correlações entre as mudanças no uso e cobertura e as vazões foram insignificantes. No entanto, a maioria das áreas de captação exibiu decréscimos nas vazões, o que pode ser atribuído ao aumento do uso de água da vegetação associado à regeneração das florestas.

Guzha et al. (2018) realizaram uma revisão bibliográfica sobre os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra no escoamento superficial, nas descargas e nas vazões mínimas na África Oriental, em específico Quênia, Etiópia, Somália, Sudão, Eritreia, Uganda, Ruanda, Burundi e Tanzania. Os autores constataram que a bibliografia aponta para o consenso de que a perda da cobertura vegetal é acompanhada pelo aumento das vazões e do escoamento superficial, porém, não há diferença significativa nas vazões observadas entre as bacias de plantação de bambu e pinheiro. Análises de tendências mostraram que, apesar da perda de cobertura florestal, 63% das bacias hidrográficas apresentaram mudanças não significativas nas descargas anuais, enquanto 31% mostraram tendências crescentes. Metade das bacias estudadas apontaram descargas com tendência não-significativa na estação úmida e seca, enquanto 35% das bacias revelaram uma tendência decrescente nas descargas mínimas. Os mesmos autores observaram que correlações entre cobertura florestal e escoamento, vazão média e vazão máxima indicaram que a cobertura florestal por si só não é um preditor preciso dos fluxos hidrológicos nas bacias da África Oriental.

Estudos realizados nos Gates Ocidentais, uma cordilheira no oeste da Índia, avaliaram o impacto do uso florestal e reflorestamento na condutividade hidráulica do solo e a resposta chuva-vazão (Bonnell et al., 2010; Krishnaswamy et al., 2012). Os usos e cobertura da terra avaliados foram: floresta natural pouco perturbada, plantios silviculturais com várias espécies locais e plantações de árvores variadas. A intensidade do uso da floresta e os efeitos da silvicultura na ecologia do solo foram fatores críticos que afetaram a condutividade hidráulica (Bonnell et al., 2010) e, consequentemente, as vias hidrológicas e a formação de escoamento superficial. Em todas as estações analisadas, a região de floresta natural pouco perturbada converteu 28,4% de precipitação em fluxo total, em comparação com 32,7% para plantações variadas e 45,3% nos plantios silviculturais (Krishnaswamy et al., 2012). Como a evapotranspiração real é provável que seja deprimida durante as monções, as diferenças nas respostas de fluxo

e escoamento entre os tipos de cobertura da terra são amplamente atribuídas a diferenças na infiltração do solo e nas vias hidrológicas.

Na China, pela comparação de imagens do Landsat de 1975, 1990, 2000 e 2010 na bacia hidrográfica de Dunhuang, na Região Autônoma de XinJiang, Chen et al. (2016) verificaram que houve um declínio da cobertura vegetal, com 926 km² transformados em solo exposto nos últimos 35 anos, fato ocorrido principalmente entre 1975 e 1990. As áreas úmidas, entre pântanos, lagos da primavera e também a vegetação hidrofílica, sofreram um encolhimento extremo. As áreas de pântanos de sal diminuíram contínua e gradualmente e se degeneraram em terras salinas, alcalinas e, em geral, expostas. A desertificação da terra da bacia está intimamente ligada ao decréscimo dos níveis de água subterrânea, sofrendo um declínio de 0,1 a 0,5 m ano⁻¹. As condições climáticas locais também sofreram impacto com a conversão da terra, com um aumento de quase 1,5 °C na temperatura média anual e diminuição da precipitação.

Inúmeros métodos têm sido utilizados para separar o impacto individual das forças motrizes capazes de afetar o ciclo hidrológico, como as mudanças do clima e mudanças no uso e cobertura da terra. Dentre esses métodos, podemos citar a modelagem hidrológica e abordagens conceituais, experimentais e analíticas. Cavalcante et al. (2019) buscaram averiguar essa questão na bacia do rio Itacaiúnas, afluente do Tocantins, no leste amazônico. Para tentar discernir os impactos individuais de cada componente, foram utilizados 3 métodos distintos: método de Tomer e Schilling (Tomer & Schilling, 2009), método baseado em elasticidade (Schaake, 1990) e decomposição da curva de Budyko (Wang & Hejazi, 2011), além de uma análise de tendências utilizando o teste de Mann-Kendall não paramétrico. O balanço de água foi analisado de 1973 a 2017 e a estimativa de cobertura vegetal foi obtida por Souza-Filho et al. (2016) em 1973, 1984, 1994, 2004 e 2013. Resultados apontam que as áreas de florestas diminuíram de 99% para 49% de 1973 a 2013 e a análise estatística apontou uma tendência positiva nas séries temporais anuais, máximas e mínimas de vazão, enquanto os dados climáticos exibiram uma tendência positiva na evapotranspiração de referência, mas nenhuma tendência significativa na precipitação (Cavalcante et al., 2019). As maiores mudanças na vazão média anual foram observadas entre os períodos de 1973 a 1984 e de 1985 a 1994. O terceiro e o quarto período (1994 a 2003 e 2004

a 2016) mostraram pequenas mudanças, provavelmente devido à intensidade das atividades de corte e de queima e o crescimento da vegetação. Os três métodos utilizados apontaram que a conversão da vegetação florestal foi a causa primária das mudanças nas vazões, porém, com diferentes intensidades, sendo observada uma pequena recuperação no último período analisado.

Grip et al. (2005) avaliaram 10 microbacias de cabeceira sob vegetação natural em zonas tropicais. As medições foram realizadas entre 1977 e 1984. As conversões dos experimentos A e C foram da seguinte forma: floresta primária, corte raso, solo nu e uma fase de transição, durante a qual a superfície do solo ficava totalmente coberta novamente, enquanto a nova vegetação acumulava biomassa ativamente. Os experimentos D, G, H, I e J passaram pelas mesmas conversões iniciais, exceto a última etapa de transição. Os pesquisadores concluíram que a conversão de floresta primária em plantação de palma, cacau ou algum tipo de silvicultura afeta a produção de água a longo prazo em até 10%, enquanto a conversão para pastagem poderia levar ao aumento nos escoamentos de 300 mm ano⁻¹ a 700 mm ano⁻¹, dependendo das condições anuais. A extração de madeira (E) causou um aumento anual máximo no escoamento superficial, que foi 26% maior do que o esperado sob a floresta, porém, o efeito chegou a 149% durante o período inicial sob a extração mecanizada (D); sendo assim, o efeito do manejo florestal mecanizado na magnitude do escoamento em período chuvoso é maior do que o manejo florestal tradicional não mecanizado. O escoamento superficial só veio se igualar aos valores do período pré-extração após o quarto ano após a operação de corte de árvores e com regeneração natural, porém, ainda permaneceram 16% maior do que se houvesse a cobertura florestal original, experimento B, predominantemente floresta primária e onde não houve mudança no uso e cobertura da terra. Em outra microbacia, operação tradicional de derrubada e queima (I) foi praticada por 2 anos. O plantio e a colheita foram feitos à mão, sendo a única entrada mecânica a utilização de motosserras portáteis para derrubar as árvores. Neste experimento, os impactos hidrológicos foram baixos, com um aumento de 23% e 30% no escoamento superficial no primeiro e segundo ano de plantio, respectivamente.

Nas outras duas micro bacias foram propostas a substituição da floresta primária por plantios silviculturais baseados em eucalipto (H) e pinus (G). Neste, não

ocorreram grandes variações no escoamento superficial durante o primeiro ano, porém, no segundo ano houve um aumento de 62% e 47% para os experimentos G e F, respectivamente. A partir do terceiro ano, na plantação de eucalipto ocorreu uma queda drástica em relação ao segundo ano, mas a plantação de pinus seguiu atingindo altos níveis de escoamento. A troca da vegetação florestal por pastagem para uso pecuário também foi experimentada, com cerca de 0,3 a 1,3 animais por ha⁻¹ na região de estudo. Como esperado, os níveis de escoamento superficial se mantiveram altos durante os anos de medições, com cerca de 60% de aumento nos 3 primeiros anos e estabilizando em 50% do terceiro ano em diante. Por fim, o experimento com a conversão para pomar de toranja foi o que apontou o maior aumento no escoamento superficial, atingindo 200% acima do que estava estabelecido no período inicial do plantio, estabilizando em 50% maior que a floresta, apenas no quinto ano após o plantio.

Como regra, os impactos relativos mais fortes foram observados nas bacias com o menor escoamento superficial em condições florestais e vice-versa. Assim, as bacias hidrográficas com solos de drenagem livre mostraram-se muito mais sensíveis a distúrbios do que aquelas com drenagem impedida ou pantanosa, refletindo o fato de que, as mudanças nas propriedades hidráulicas superficiais de solos de drenagem livre, como a compactação causada por maquinário, causaram uma mudança nas rotas do escoamento superficial, partindo de uma percolação predominantemente vertical para rotas superficiais mais rápidas, devido ao excesso de infiltração superficial (Grip et al., 2005).

Jobbágy & Jackson (2004) analisaram a conversão de gramíneas para plantios silviculturais na região dos Pampas uruguaios. De acordo com os autores, o plantio silvicultural pode fornecer uma ferramenta para o controle de inundações e uma melhora na qualidade da água, contudo, essa forma de manejo florestal pode comprometer a fertilidade do solo (Geary, 2001). Guimarães et al. (2010) realizaram uma avaliação sobre a quantidade e a qualidade da água em áreas de reflorestamento com espécies de *Pinus* no município de Joinville, SC. Onde houve reflorestamento, as vazões sofreram uma forte redução no período de estiagem. Os resultados também apontaram uma tendência de aumento da condutividade elétrica, turbidez e nitrato após o plantio de *Pinus*. No Pampa brasileiro, no Rio Grande do Sul, Almeida et al. (2016) analisavam

dados de 6 microbacias com uso e cobertura da terra distintos e concluíram que as descargas diárias nas bacias predominantemente cobertas de pastagem são, geralmente, maiores que aquelas cobertas por plantio silvicultural. Esse comportamento se mantém, mesmo após a colheita, indicando que os solos das pastagens podem ter menores taxas de infiltração de água e maior fluxo de superfície.

Outro bioma no Brasil alvo de processos extensivos de mudanças na sua cobertura vegetal é o Cerrado, onde aproximadamente 50% dos 2 milhões de km² está, atualmente, sob uso agropecuário (IBGE, 2004; Silva et al., 2006; Beuchle et al., 2015), comprometendo cerca de 80% da vegetação primária do Cerrado. A conversão da sua vegetação natural é contínua, como um processo dominante de mudança no uso e cobertura da terra, inclusive no Estado de Mato Grosso (Lapola et al., 2014). Nobrega et al. (2017) conduziram um estudo em Campo Verde, MT, situado na bacia do Rio das Mortes, no Cerrado brasileiro. Os autores compararam duas microbacias adjacentes com menos de 1 km², com características climáticas e hidrogeológicas similares, porém, uma sendo predominantemente coberta por vegetação do Cerrado e a outra, onde houve uma conversão da vegetação primária para pastagem, com pecuária extensiva. Para averiguar as mudanças causadas pela conversão florestal, foram analisadas as séries históricas de estações climáticas na região, durante o período de outubro de 2012 a agosto de 2014. Os autores concluíram que a conversão de vegetação do cerrado não perturbado para pastagem causou um aumento significativo nas vazões diárias e anuais, decorrente da redução da evapotranspiração causada pela conversão.

Também no Cerrado brasileiro, Arantes et al. (2016) utilizaram o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), ferramenta disponível no sistema de sensores orbitais *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e série histórica de evapotranspiração do período de 2000 a 2012 para estudar as diferenças no fluxo evaporativo das principais paisagens naturais e antrópicas desse Bioma. A vegetação natural do Cerrado, da qual ocupa 48% do bioma, contribui com 61% da evapotranspiração. As pastagens e sistemas agrícolas, que ocupam 49% da área, contribuem com 39% da evapotranspiração. Os autores observaram que o desmatamento até o ano de 2002 contribuiu para um declínio no fluxo de vapor de água para a atmosfera do Cerrado e, como consequência, mudanças nas vazões. Os resultados sugeriram que

a recuperação de pastagens degradadas pode ter um impacto positivo no clima, devido às maiores taxas de transferência de água para a atmosfera.

Spera et al. (2016) utilizaram imagens do MODIS para mapear as mudanças no uso e cobertura da terra na região dos estados de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, chamada de Matopiba, que tem parte de suas áreas cobertas por Cerrado. No período de 2003 a 2013, a agropecuária mais do que duplicou em área, passando de 1,2 para 2,5 milhões de ha, sendo 74% das novas terras oriundas da vegetação primária do Cerrado. Essas mudanças impactaram negativamente a quantidade de água reciclada para a atmosfera por evapotranspiração a cada ano. Somente em 2013, as áreas de cultivos únicos reciclaram 3% menos água caso a cobertura da terra fosse ainda a nativa do Cerrado. Em sistemas de cultivo duplo (por exemplo, soja e milho), a evapotranspiração é semelhante ou maior que a vegetação natural ao longo da maior parte da estação úmida. Os autores concluíram que, se o objetivo ambiental é minimizar os impactos no ciclo da água, o cultivo duplo pode ser enfatizado para manter uma paisagem que se comporta mais próximo do sistema natural.

Cabral et al. (2015) conduziram um estudo na região Paulista do Cerrado, na reserva do Pé-de-Gigante, uma área de 1.213 ha, no Parque Estadual Vassununga. A cobertura vegetal é predominantemente natural do Cerrado, porém, rodeada de talhões com plantios de eucalipto e plantações de cana-de-açúcar. Os autores utilizam o método *eddy covariance* para medir os fluxos de água. Na região de Cerrado, a evapotranspiração na estação seca foi 1 mm dia⁻¹ e na estação chuvosa de 7,1 mm dia⁻¹. Os maiores níveis de evapotranspiração foram decorrentes de noites chuvosas, onde a energia disponível aumenta e o solo e a vegetação estão mais úmidos. Em comparação a outras estações do ano, os resultados obtidos por esses autores foram menores, principalmente no Centro-Oeste brasileiro, onde variam entre 1,5 e 4,6 mm dia⁻¹. A fração média de evaporação foi 68% e a interceptação contabilizada foi de 8% da precipitação, assim, a vegetação nativa exibiu um forte controle de superfície, enquanto havia perda de área foliar na estação seca (Oishi et al., 2010). Isso fez com que reduzisse o pico de demanda de água, evidenciando a adaptação da vegetação a este clima sazonalmente seco (Hutley et al., 2000). Além disso, apesar do aumento de 11% na precipitação anual observada no ano mais chuvoso e também uma queda de 16% no mais seco, a maior amplitude

dos valores precipitados não teve um impacto significativo na evapotranspiração, o que mostra o papel fundamental do Cerrado no fornecimento de água para as áreas a jusante.

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro e o quarto maior ecossistema do país. Compreende uma grande extensão no Nordeste Brasileiro, com aproximadamente 1 milhão de km² (IBGE, 2004), sendo sua maioria no semiárido (Menezes et al., 2012). Da Silva et al. (2017) realizaram um estudo similar ao de Cabral et al. (2015), analisando os efeitos da conversão da vegetação primária para pastagem. Os autores utilizaram o método *eddy-covariance*, no estado de Pernambuco, para medir os fluxos de água e energia na Caatinga e na pastagem. Os resultados apontaram que a evapotranspiração da estação seca foi controlada pela vegetação primária da Caatinga e pelas condições atmosféricas na estação chuvosa. A evapotranspiração da Caatinga foi maior que sobre a pastagem, de 1,4 mm dia⁻¹ e 0,8 mm dia⁻¹, respectivamente. Assim, os autores concluem que a conversão da vegetação primária da Caatinga para pastagem tenderia a uma diminuição da evapotranspiração.

A Mata Atlântica, outro grande bioma brasileiro, foi um dos primeiros a ser antropizado, sofrendo modificações de sua cobertura vegetal desde o período da colonização portuguesa. Uma das tipologias da vegetação natural do bioma Mata Atlântica é a Floresta Ombrófila Densa, apresentando extrema riqueza em biodiversidade e importância ecológica e hidrológica para a Costa Leste do Brasil. O bioma já teve muitas áreas com mudanças no uso e cobertura da terra ao longo dos anos, entre eles: mineração, agropecuária, agricultura, expansão demográfica e, atualmente, uma crescente silvicultura (Carrielo, 2012), principalmente no Sudeste brasileiro. Os estudos nessa região se mostram mais escassos, tendo se consolidado nos últimos anos, visando ao melhor entendimento dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra na hidrologia das bacias que compõem esta região.

Após análise de vazões observadas em postos fluviométricos localizados nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, Marengo et al. (2005) concluíram que há uma tendência negativa nas vazões nas últimas cinco décadas. Essa tendência negativa parece estar associada a um possível impacto antrópico, na forma de gerenciamento dos recursos hídricos, geração de energia, esgotos lançados no rio, irrigação e crescimento populacional, e não a uma mudança do clima, pela alteração do regime de chuva na bacia. Esse argumento é endossado por registros

de problemas relativos à poluição e desmatamento na bacia do Paraíba do Sul, além de pressões devido à expansão demográfica (Encarnação et al., 2020).

Na região Amazônica, referência em floresta tropical e considerada a maior do mundo, é de conhecimento geral e de grande preocupação a acelerada mudança no uso e cobertura da terra em território brasileiro, principalmente pelo desmatamento ocorrido nas últimas 4 décadas (Coe et al., 2016). Alvo de várias hipóteses, projeções futuras utilizando cenários de mudanças no uso e cobertura da terra sugerem que 20% a 30% da bacia poderia ser desmatada nos próximos 40 anos (Soares Filho et al., 2006), desencadeando uma cascata de impactos negativos nos recursos hídricos em várias escalas, visto a importância desse bioma para o Brasil e para o mundo.

Um estudo inédito realizado por Khanna et al. (2017) na região de Rondônia, no período entre os anos 1983 a 2008, fornece uma perspectiva integrada sobre como três décadas de desmatamento na Amazônia afetaram o hidroclima regional. Por meio de análise observacional de nuvens e precipitações, os autores apontaram uma transição de um regime convectivo térmico para um dinâmico, sendo isso associado a crescentes escalas de desmatamento. A influência dessa transição é substancial no que tange à umidificação dos setores localizados em correntes de áreas desmatadas e uma seca similar nos setores contra o vento. A mudança de precipitação resultante nas duas regiões foi de aproximadamente 25% da média da área desmatada. Além disso, a redução da rugosidade superficial induzida pelo desmatamento desempenhou um papel essencial no hidroclima atual na estação seca. Os autores consideraram que, embora o mecanismo dinâmico fosse suficiente para explicar as características gerais das mudanças observadas no hidroclima, pesquisas mais aprofundadas seriam necessárias para quantificar até que ponto outros processos, como mudanças na evapotranspiração e reciclagem de umidade, também podem ter contribuído.

Também na região de Rondônia, Rodriguez et al. (2010) identificaram tendências nos parâmetros hidrológicos a partir de 1990 na bacia do rio Ji-Paraná. Algumas das tendências identificadas estão de acordo com os resultados geralmente apresentados em outros estudos de impactos do desmatamento em bacias hidrográficas: aumento da vazão de pico, diminuição do fluxo de base e respostas chuva-vazão mais rápidas (Swank et al., 1988; Trancoso, 2006). Em geral, os

resultados obtidos por Rodriguez et al. (2010) indicaram que o efeito do desmatamento é perceptível em bacias menores e, à medida que a área de drenagem aumenta, esse efeito tende a se tornar menos perceptível, mostrando uma forte dependência com a escala, tópico que iremos debater a seguir.

Efeito de escala

Geralmente, as mudanças no uso e cobertura da terra são, tipicamente, fenômenos locais. Segundo Meister et al. (2017), os efeitos dessas mudanças podem ser vistos muito mais cedo e mais claramente em microescala do que em macroescala, mostrando uma dependência com a escala de conversão em questão. Bloschl et al. (2007) já haviam introduzido o conceito, sugerindo que os impactos tendem a ser inversamente proporcionais ao tamanho da bacia e, que a partir de certo limite, atingindo certo limite, a variabilidade climática anula a influência das mudanças no uso e cobertura da terra. Também importa salientar a localização da paisagem modificada, podendo esta modular os efeitos de escala. O impacto gerado por uma conversão da cobertura a montante de uma bacia hidrográfica pode não ser o mesmo daquele originado por uma conversão a jusante da mesma. Além disso, em diferentes configurações hidrológicas, os impactos também podem divergir, visto que a hidrologia é totalmente dependente do contexto, sendo de suma importância conhecer onde, quando e como ocorrem os processos hidrológicos.

A revisão realizada até o momento se refere, em sua maioria, à microescala, apresentando, geralmente, uma mudança unilateral no uso e cobertura da terra. Podemos concluir que estes experimentos fornecem uma fonte clara de conhecimento sobre os efeitos que essas mudanças causam, porém, tais efeitos não podem, de forma alguma, ser generalizados quando analisamos a macroescala. Ainda, a retroalimentação com o clima local, geralmente, tende a reduzir a precipitação sobre a área perturbada, reduzindo assim o escoamento (Costa, 2005).

Alguns autores sugerem que as mudanças no uso e cobertura em nível de microescala ou escala local ($< 10^2$ km²) apresentam desacoplamento dos distúrbios da superfície da terra e do ciclo da água, de modo que o escoamento aumenta e a evapotranspiração diminui, porém, não há mudanças na precipitação, como vimos anteriormente em diversos estudos aqui apresentados. Em uma conversão de mesoescala ou escala regional ($10^2 - 10^5$ km²), as interações superfície-atmosfera

podem ou não ser desacopladas, dependendo do grau de fragmentação da floresta. O contraste entre o fluxo de calor latente e as transferências sensíveis entre áreas desmatadas pode induzir a convergência de vapor de água e aumento na precipitação e cobertura de nuvens, dependendo do tamanho e fragmentação da área perturbada.

Em caso de desmatamento completo substituído por gramíneas, a reciclagem de umidade tende a enfraquecer, aumentando a temperatura e reduzindo os fluxos de água, precipitação, evapotranspiração e escoamento. Em um impacto mais severo, abrangendo a macroescala ($> 10^5$ km²), é provável que aconteçam pequenos aumentos no escoamento (Bonell, 2010). Porém, quando se trata de impactos da conversão florestal no ciclo hidrológico através da escala fragmentada, D'Almeida et al. (2007) notaram inconsistências nos resultados que eram dependentes da escala, onde não foram detectadas alterações significativas nas séries de vazão perto da foz do rio Amazonas. Wilk et al. (2001) não encontraram impactos expressivos nas séries históricas de vazão na bacia do Rio Nam Pong, na Tailândia, apesar da mesma ter sofrido uma perda de 50% da floresta primária. Resultados similares foram apontados por Linhares (2005) na bacia do Ji-Paraná, que também mostra mais de 50% de sua cobertura florestal alterada. Segundo Trancoso (2006), as tendências dos afluentes do Rio Amazonas da região conhecida como arco do desmatamento podem ser explicadas por mudanças nos padrões de chuva, corroborando os resultados de Espinoza-Villar (2009), que concluiu que a mais provável causa das tendências observadas nas descargas das sub-bacias amazônicas é a variabilidade interdecadal da precipitação. Outros estudos também apontam um efeito positivo nas vazões e na produção de água nas bacias (Lin & Wei, 2008; Zhang & Wei, 2012a; Biederman et al., 2015).

Por meio de uma revisão realizada por Filoso et al. (2017), a maioria dos estudos publicados relatam a redução da produção de água após a restauração ou expansão da cobertura florestal, o que reforça as conclusões de algumas pesquisas que abordamos inicialmente (p.e. Brown et al., 2005; Calder, 2007; Van Dijk & Keenan, 2007), tendo como a principal causa o aumento na evapotranspiração. Um ponto a se considerar é que grande parte dos estudos analisados na revisão de Filoso et al. (2017) foram de curto prazo ($< = 10$ anos) e as bacias hidrográficas de tamanho

pequeno (< 10 km²). Alguns estudos de longo prazo apontaram que, enquanto a produção de água tende a aumentar após o desmatamento, ocorre o inverso durante o reflorestamento, em alguns casos, atingindo volumes abaixo daqueles obtidos no período pré-desmatamento (Cornish & Vertessy, 2001; Sun et al., 2006). Quando a floresta atinge a maturidade, a produção de água pode atingir um novo equilíbrio e, potencialmente, níveis maiores que aqueles obtidos no período pré-desmatamento (Bruijnzeel, 2004). Contudo, todo este processo pode levar mais de uma década, ficando mascarado em estudos de curto prazo. Isso sugere que a produção de água pode se recuperar com o tempo e sustentar o argumento de que a predominância de estudos de curto prazo pode ter criado um viés em direção a uma maior frequência de estudos com resultados similares no que tange à produção de água. Reiterando esta ideia, Brown et al. (2005) observaram que experimentos com foco no desmatamento alcançaram um novo equilíbrio na produção de água mais rapidamente do que experimentos com foco no florestamento, reflorestamento ou restauração florestal.

Por exemplo, nos experimentos no leste africano, em Kericho, no Quênia, a substituição da floresta tropical por um tipo de cultura agrícola resultou em redução do uso de água, enquanto a substituição de florestas de bambu por plantação de árvores lenhosas em Kimakia, também no Quênia, não mostrou mudanças significativas na produção de água (Brown et al., 2005).

Mudanças no ciclo hidrológico de bacias hidrográficas podem ocorrer como resultado das mudanças no uso e cobertura da terra, como as ocasionadas por incêndios, implantação de agricultura ou uso para mineração, e podem ser particularmente severas em escalas pequenas, mas podem não impactar da mesma forma em larga escala. O comportamento do sistema hidrológico em resposta à mudança pode ser caracterizado por propriedades como estabilidade, resiliência, reversibilidade ou irreversibilidade da mudança e, também, histerese. Por exemplo, o desmatamento pode não causar efeito imediato, mas mudanças atrasadas podem ocorrer devido a um efeito de memória das características do solo da bacia, levando a processos histeréticos.

Sendo assim, é particularmente difícil discernir os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra na hidrologia de bacias, principalmente em larga escala, devido à interdisciplinaridade, abrangendo a heterogeneidade da paisagem, diferentes estágios sucessionais da vegetação

modificada, variação espacial na precipitação ou a aplicação de práticas sustentáveis (Siriwardena et al., 2006).

Considerações finais

Após uma revisão de variadas pesquisas e estudos realizados nas mais diversas regiões, em especial em regiões tropicais, um ponto de suma importância que podemos considerar é que os impactos que as mudanças no uso e cobertura da terra causam na hidrologia de bacias não podem ser generalizados. Apesar de grande parte dos estudos reforçarem a ideia que a recuperação florestal tende a diminuir a produção de água e vice-versa, vê-se que esta conclusão não é consenso entre todos os estudos aqui revisados. As mudanças observadas nas respostas hidrológicas em meso e macro escalas não podem, salvo raras exceções, ser confiantemente atribuída a mudanças no uso e cobertura da terra.

A dependência da escala de trabalho e do padrão de fragmentação da vegetação, a complexidade que abrange essa área atrelada à falta de séries históricas consistentes limitam a capacidade de se elaborar pesquisas de longo prazo e de macroescala. Além disso, quando se trabalha em macroescala, há ainda a necessidade de se isolar a forçante da mudança na resposta hidrológica e verificar se são, realmente, as mudanças no uso e cobertura da terra as responsáveis pela mudança e não outros fatores, já levantados aqui. Ainda, há estudos de macroescala utilizando diversos tipos de modelos; no entanto, esses estudos, geralmente, não configuram uma abordagem observacional, como levantamos nesta revisão, apontando uma forte necessidade de projetos de grande escala bem monitorados. As questões de escala relacionadas aos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra na hidrologia de bacias só podem ser respondidas, de forma mais abrangente e conclusiva, com a adoção de uma abordagem experimental mais observacional.

Esforços para que haja um melhor entendimento dos padrões e processos do uso e cobertura da terra são de suma importância tanto acadêmica quanto social. As implicações geopolíticas das teleconexões sobre as bacias hidrográficas ainda são pouco exploradas. Em função das mudanças do clima como o aumento da temperatura e as mudanças na frequência e intensidade das chuvas, as iniciativas e políticas públicas de manejo do uso e cobertura da terra deveriam considerar os efeitos da presença ou ausência de florestas sobre a água e o clima em escala locais, regionais e continentais, reiterando

a ideia de que essas implicações são de nível global. Proporcionar um avanço nas observações hidrológicas e na relação superfície-atmosfera constituirá, também, um avanço na previsibilidade dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre os recursos hídricos, visto que a observação e as evidências geram conhecimento.

Como os estudos nas regiões tropicais são relativamente recentes, os focos, em geral, tomam um caráter mais extremo, como estudos de desmatamento em floresta densa, conversão de pastagem em agricultura ou meio urbano. Chama a atenção o trabalho desenvolvido por Spera et al. (2016) sobre o cultivo duplo, onde os autores concluíram que o efeito dessa cobertura no ciclo da água se comporta mais próximo do sistema natural, nesse caso, do Cerrado Brasileiro, pois, dentre os trabalhos aqui levantados, esse foi o único que abordou a policultura. A ideia da policultura vai de encontro com as pesquisas desenvolvidas por Ellison et al. (2017) e Ilstedt et al. (2007). Esses autores sugerem que a presença de árvores na agricultura promovem maior capacidade de infiltração da água do solo, devido ao aumento da macroporosidade, criando caminhos preferenciais e facilitando a recarga do aquífero. É importante enfatizar, também, a negligência em não se analisar a cobertura vegetal intermediária do solo, que seria o caso das técnicas de policultura (Ilstedt et al., 2016). A pesquisa realizada em uma região da África Ocidental aponta que a cobertura intermediária de árvores pode melhorar a capacidade de recarga do aquífero, sendo esta superior ao déficit proporcionado pelo aumento da evapotranspiração (Ellison et al., 2017). Sendo assim, apesar de mudar as taxas de cada processo pertinente ao fluxo de água numa bacia hidrográfica, a disponibilidade hídrica total pode se manter análoga, como vimos em Spera et al. (2016). Com este estudo, os autores propuseram uma teoria ótima da cobertura de árvores, questionando a teoria vigente de que mais árvores representam menos água.

A policultura, permacultura e os sistemas agrosilvopastoris ou a integração lavoura pecuária floresta são técnicas atuais que buscam combinar espécies florestais, culturas agrícolas e/ou pecuária no intuito de manter a produção de alimentos, produtos florestais, madeireiros ou não, além de manter a heterogeneidade da paisagem, incremento da diversidade genética e conservação ambiental. Apesar de todos estes benefícios socioeconômicos e ambientais, ainda não há trabalhos suficientes sobre os efeitos dessas práticas no ciclo da água e na hidrologia de bacias, conhecimento

que poderia gerar novas propostas e programas que beneficiariam todos os setores envolvidos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

Referências

- Almeida, A. C. et al. Quantifying the effects of *Eucalyptus* plantations and management on water resources at plot and catchment scales. **Hydrological Processes**, v. 30, p. 4687-4703, 2016. <https://doi.org/10.1002/hyp.10992>.
- Andréassian, V. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 1-27, 2004.
- Arantes, A. E. et al. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66-78, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008>.
- Avissar, R. Conceptual aspects of a statistical-dynamical approach to represent landscape subgrid-scale heterogeneities in atmospheric models. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, p. 2729-2742, 1992.
- Beck, H. E. et al. Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments. **Water Resources Research**, v. 49, p. 7843-7863, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/2013WR013918>.
- Beuchle, R. et al. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116-127, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.017>.
- Biederman, J. A. et al. Recent tree die-off has little effect on streamflow in contrast to expected increases from historical studies. **Water Resources Research**, v. 51, n. 12, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015WR017401>.
- Blöschl, G. et al. At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? **Hydrological Processes**, v. 21, p. 1241-1247, 2007.
- Bonell, M. The impacts of global change in the humid tropics: selected rainfall-runoff issues linked with tropical forest-land management. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 24, p. 279-325, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10795-010-9104>.
- Bosch, J. M. & Hewlett, J. D. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, p. 3-23, 1982.
- Brown, A. E. et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alteration. **Journal of Hydrology**, v. 310, n. 1-4, p. 28-61, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>.
- Bruijnzeel, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, p. 185-228, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>.
- Buendia, C. et al. Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. **Science of Total Environment**, v. 540, p. 144-157, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.005>.
- Cabral, O. M. R. et al. Water and energy fluxes from a woodland savana (cerrado) in southeast Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 22-40, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.010>.
- Calder, I. R. Forests and water: ensuring forest benefits outweigh water costs. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1, p. 110-20, 2007.
- Carriello, F. **A região do Vale do Paraíba Paulista analisada sob a ótica da ecologia de paisagens: mudanças no uso e cobertura da terra entre o período de 1986 e 2010**. 2012. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.
- Cavalcante, R. B. L. et al. Opposite effects of climate and land use changes on the annual water balance in the Amazon Arc of Deforestation. **Water Resources Research**, v. 55, n. 4, p. 3092-3106., 2019. <https://doi.org/10.1029/2019WR025083>.
- Cheng, J. D. Streamflow changes after clear-cut logging of a pine beetle-infested watershed in Southern British Columbia, Canada. **Water Resources Research**, v. 25, n. 3, 1989. <https://doi.org/10.1029/WR025i003p00449>.
- Chen, W. et al. Land use/land cover change and driving effects of water environmental system in Dunhuang Basin, northwestern China. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, p. 1027, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5809-9>.
- Coe, M. T. et al. The hydrology and energy balance of the Amazon Basin. In: Nagy, L. et al. (ed.). **Interactions between biosphere, atmosphere and human land use in the Amazon Basin**. Berlin: Springer, 2016. p. 34-53
- Collinge, S. Ecological consequences of habitat fragmentation: implications for landscape architecture and planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 36, p. 59-77, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(96\)00341-6](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(96)00341-6).
- Cornish, P. M. The effects of logging and forest regeneration on water yields in a moist eucalypt forest in New South Wales, Australia. **Journal of Hydrology**, v. 150, p. 301- 322, 1993.
- Cornish, P. M. & Vertessy, R. A. Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a eucalypt forest. **Journal of Hydrology (Amst)**, v. 242, p. 43-63, 2001.
- Costa, M. H. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion. In: Bonell, M. & Bruijnzeel, L.A. (ed.). **Forests, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p. 590-597. <http://doi.org/10.1017/cbo9780511535666.030>.
- D’Almeida, C. et al. The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 633-647, 2007. <http://doi.org/10.1002/joc.1475>.

- Da Silva, P. F. et al. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>.
- Davis, K. F. et al. Tropical forest loss enhanced by large-scale land acquisitions. **Nature Geoscience**, v. 13, p. 482-488, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0592-3>.
- Debortoli, N. et al. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 6, p. 2889-2900, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4886>.
- Duffy P. B. et al. Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences, USA**, v. 112, p. 13172-13177, 2015.
- Ellison, D. et al. Trees, forests and water: cool insights for a hot world. **Global Environmental Change**, v. 43, p. 51-61, 2017.
- Espinoza-Villar, J. C. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 1574-1594, 2009. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>.
- Faria, T. D. O. et al. Surface albedo in different land-use and cover types in Amazon forest region. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2120>.
- Filoso, S. et al. Impacts of forest restoration on water yield: a systematic review. **PLoS one**, v. 12, n. 8, e0183210, 2017.
- Fisch, G. et al. The convective boundary layer over pasture and forest in Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 47-59, 2004.
- Fritsch, J.-M. **Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants: opération ECEREX en Guyane française**. 1990. 392 p. PhD Thesis. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- Geary, T. F. Afforestation in Uruguay: study of a changing landscape. **Journal of Forestry**, v. 99, p. 35-39, 2001.
- Grip, H. et al. Soil and water impacts during forest conversion and stabilisation to new land use. In: Bonell, M. & Bruijnzeel, L. A. **Forests, water and people in the humid tropics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. (International hydrology series). <https://doi.org/10.1017/cbo9780511535666.029>
- Guimarães, R. Z. et al. Avaliação dos impactos da atividade de silvicultura sobre a qualidade dos recursos hídricos superficiais. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 377-390, 2010.
- Guzha, A.C. et al. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: evidence from East Africa. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 15, p. 49-67, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.005>.
- Hecht, S. The new rurality: globalization, peasants and the paradoxes of landscapes, **Land Use Policy**, v. 27, p. 161-169, 2010.
- Hibbert, A. R. Forest treatment effects on water yield. In: Sopper, W. E. & Lull, H. W. (ed.). **Forest hydrology, proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar**. Oxford: Pergamon Press, 1967. p. 527-543.
- Hornbeck, J. W. et al. Summary of water yield experiments at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 27, p. 2043-2052, 1997.
- Hutley, L. B. et al. Evapotranspiration from Eucalypt open-forest savanna of Northern Australia. **Functional Ecology**, v. 14, p. 183-194, 2000. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2000.00416.x>.
- IBGE. **Mapa de biomas**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm. Acesso em: 23 set. 2021.
- Iltstedt, U. et al. Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 21930, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep21930>.
- Iltstedt, U. et al. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1-2, p. 45-51, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.014>.
- Jakovac, C. C. et al. Loss of secondary-forest resilience by land-use intensification in the Amazon. **Journal of Ecology**, v. 103, p. 67-77, 2015. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12298>.
- Jayasuriya, M. D. A. et al. Some factors affecting water yield from mountain ash (*Eucalyptus regnans*) dominated forests in south-east Australia. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2-4, p. 345-367, 1993. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90116-q](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90116-q).
- Jobbágy, E. G. & Jackson, R. B. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. **Global Change Biology**, v. 10, p. 1299-1312, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00806.x>.
- Khanna, J. et al. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. **Nature Climate Change**, v. 7, p. 200-204, 2017. <https://doi.org/10.1038/nclimate3226>.
- Krishnaswamy, J. et al. The rain-runoff response of tropical humid forest ecosystems to use and reforestations in the Western Ghats of India. **Journal of Hydrology**, v. 472-473, p. 216-237, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.016>.
- Lapola, D.M. et al. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 27-35, 2014.
- Lepers, E. et al. A Synthesis of Information on Rapid Land-cover Change for the Period 1981-2000. **BioScience**, v. 55, p. 115-124, 2005. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0115:asoior\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0115:asoior]2.0.co;2).
- Liang, W. et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau. **Water Resources Research**, v. 51, n. 8, p. 6500-6519, 2015. <https://doi.org/10.1002/2014wr016589>.
- Lin, Y. & Wei, X. The impact of large-scale forest harvesting on hydrology in the Willow watershed of Central British Columbia. **Journal of Hydrology**, v. 359, n. 1-2, p. 141-149, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.023>.
- Linhares, C. A. **Influência do desflorestamento na dinâmica da resposta hidrológica na bacia do Rio Ji-Paraná/RO**. 2006. 219 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

- Marengo, J. A. et al. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.
- McIntyre, N. et al. Modelling the hydrological impacts of rural land use change. **Hydrology Research**, v. 45, n. 6, p. 737-754, 2014. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.145>.
- McNeill, J. R. **Something new under the sun: an environmental history of the twentieth-century word**. New York: W. W. Norton & Company, 2000. 421 p.
- Meister, S. et al. Process-based modelling of the impacts of land use change on the water balance in the cerrado biome (Rio das Mortes, Brazil). **Erdkunde**, v. 71, n. 3, p. 241-266, 2017. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2017.03.06>.
- Menezes, R.S.C. et al. Biogeo-chemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 suppl., 643e653, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>.
- Nóbrega, R. L. B. et al. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. **PLoS ONE**, v. 12, n. 6, e0179414, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179414>.
- Oishi, A. C. et al. Interannual invariability of forest evapotranspiration and its consequence to water flow downstream. **Ecosystems**, v. 13, p. 421-436, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9328-3>.
- Overgaard, J. et al. Land-surface modelling in hydrological perspective? A review. **Biogeosciences, European Geosciences Union**, v. 3, n. 2, p. 229-241, 2006. <https://doi.org/10.5194/bg-3-229-2006>.
- Pielke, R. A. & Chase, T. N. A proposed new metric for quantifying the climatic effects of human-caused alterations to the global water cycle. In: Symposium on Observing and Understanding the Variability of Water in Weather and Climate, 83, 3003. **AMS Annual Meeting**. [S.l.: s.n.], 2003.
- Pielke, R. A. et al. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 360, n. 1797, p. 1705 -1719. 2002. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1027>.
- Pielke, R. A. Land use and climate change. **Science**, v. 310, p.1625-1626, 2005. <https://doi.org/10.1126/science.1120529>.
- Pereira Filho, A. Convective rainfall in Amazonia and adjacent tropics. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 5, p. 137-161, 2015. <https://doi.org/10.4236/acs.2015.52011>.
- Rodriguez, D. A. et al. Is the forest conversion to pasture affecting the hydrological response of Amazonian catchments? Signals in the Ji-Paraná Basin. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 1254-1269, 2010. <https://doi.org/10.1002/hyp.7586>.
- Rodríguez-Martínez, J. & Santiago, M. **The effects of forest cover on base flow of streams in the mountainous interior of Puerto Rico, 2010**. Virginia: U.S. Department of the Interior; U. S. Geological Survey, 2017. 19 p. (Scientific Investigations Report, 2016-5142.) <https://doi.org/10.3133/sir20165142>.
- Sanderson, E. W. et al. The human footprint and the Last of the wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. **BioScience**, v. 52, n. 10, p. 891-904, 2002. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0891:TH FATL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0891:TH FATL]2.0.CO;2).
- Schaake, J. C. From climate to flow. In: Waggoner, P. E. (ed.). **Climate change and U.S. water resources**. New York: John Wiley, 1990.
- Scott, D. F. & Lesch, W. Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa. **Journal of Hydrology**, v. 199, p. 360-377, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03336-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03336-7).
- Silva, J. F. et al. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 3, p. 536-548, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01422.x>.
- Siriwardena, L. et al. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: the Comet River, Central Queensland, Australia. **Journal of Hydrology**, v. 326, p. 199-214. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.030>.
- Soares-Filho, B. S. et al. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, n. 440, p. 520-523, 2006.
- Souza-Filho, P. W. M. et al. Four decades of land-cover, land-use, and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 167, n. 1, p. 175-184, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.039>.
- Spera, S.A. et al. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, p. 3405-3413, 2016. <https://doi.org/10.1111/gcb.13298>.
- Steffen, W. & Tyson, P. **Global change and the earth system: a planet under pressure**. Stockholm: International Geosphere-Biosphere Program, 2001.
- Sun, G. et al. Potential water yield reduction due to forestation across China. **Journal of Hydrology**, v. 328, n. 3, p. 548-558, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.013>.
- Swank, W. T. et al. Streamflow changes associated with forest cutting, species conversions and natural disturbances. In: Swank W. T. & Crossley D. A. (ed.). **Forest hydrology and ecology at Coweeta**. New York: Springer: New York, 1988. 469 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3732-7_22.
- Tilman, D. et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change. **Science**, v. 292, p. 281-284, 2001.
- Tomer, M. D. & Schilling K. E. A simple approach to distinguish land-use, and climate-change effects on watershed hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 376, p. 24-33, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.029>.
- Trancoso, R. **Mudanças na cobertura da terra e alterações na resposta hidrológica de bacias hidrográficas na Amazônia**. 139 f. 2006. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

- Van der Ent, R. J. et al. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. **Water Resources Research**, v. 46, n. 6, 2010. <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>.
- Van Dijk, A. I. & Keenan, R. J. Planted forests and water in perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1, p. 1-9, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.010>.
- Vitousek, P. M. Human domination of Earth's ecosystems. **Science**, v. 277, p. 494-499, 1997.
- Wang, D. & Hejazi, M. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States, **Water Resources Research**, v. 47, n. 10, W00J12, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010WR010283>.
- Wilk, J. et al. Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in large river basin in Thailand. **Hydrological Processes**, v. 15, p. 2729-2748, 2001. <https://doi.org/10.1002/hyp.229>.
- Williams, B. A. et al. Change in terrestrial human footprint drives continued loss of intact ecosystems. **One Earth**, v. 3, n. 3, p. 371-382, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.009>.
- Zhang, X. et al. Trends in Canadian streamflow. **Water Resources Research**, v. 37, n 4, p. 987-998, 2001.
- Zhang, M. & Wei, X. The cumulative effects of forest disturbance on streamflow in a large watershed in the central interior of British Columbia, Canada. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 7, p. 2021-2034, 2012a. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2021-2012>.
- Zhao, G. et al. Streamflow trends and climate variability impacts in Poyang Lake Basin, China. **Water Resources Management**, v. 24, n. 4, p. 689-706, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9465-7>.