**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Avaliação hidrológica das práticas de conservação do solo no Ribeirão das
Posses, Extrema-MG**

Hugo de Carvalho Ricardo

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2020**

Hugo de Carvalho Ricardo
Engenheiro Agrícola e Ambiental

**Avaliação hidrológica das práticas de conservação do solo no Ribeirão das Posses,
Extrema-MG**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **SÉRGIO NASCIMENTO DUARTE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Ricardo, Hugo de Carvalho

Avaliação hidrológica das práticas de conservação do solo no Ribeirão das Posses, Extrema-MG / Hugo de Carvalho Ricardo. - -versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

84 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Serviços hidrológicos 2. Mapbiomas 3. Conservador das Águas 4. Florestas I. Título

*Aos meus pais **Edvar e Rose**, e a minha irmã **Luiza**, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos.*

*A minha noiva **Camila** por todo amor, apoio e compreensão.*

Nada disso seria possível sem vocês na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosemeri e Edvar, por sempre acreditarem em mim, por todo o amor e dedicação, que me possibilitaram chegar até aqui. Sem vocês não, eu não seria nada!

A minha vovó Nina, pelo carinho e gentileza em todos os nossos momentos. Sua luz ilumina o meu caminho. Vovó a senhora é a melhor!

A minha irmã Luiza, por toda a amizade e companherismo de sempre. Tenho orgulho de você irmã!

A minha família, primos e tios. Obrigado pelo apoio!

A minha família de Guapimirim, em especial meus padrinhos Eliana e Ilídio, por todo o afeto.

A minha noiva Camila, pelo amor e carinho em todos os momentos difíceis desta caminhada. Esta conquista também é sua!

Aos amigos do Colégio Pedro II, ENSC e UFRRJ, por sempre estarem ao meu lado.

Aos amigos do CDP Latin América, por todos os valiosos momentos de alegria e aprendizado ao longo deste período.

Ao meu orientador, professor Dr. Sergio Nascimento Duarte, pela amizade, confiança e zelo durante o período de mestrado.

A Carolina Bozetti Rodrigues, pelos ensinamentos e o auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca Conan Ayade Salvador e Fernando Mendonça, por todas as contribuições para a melhoria do trabalho.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos funcionários do programa de Pós-graduação da Engenharia de Sistemas Agrícolas, por facilitarem o dias de trabalho dos pós graduandos.

Aos integrantes dos “Feras Livres”, por todos os momentos incríveis de amizade e companherismo.

Aos meus irmãos de orientação Thais, Jéssica, Adriano, Luisa e Rony, pelas contribuições no desenvolvimento desta dissertação, e por proporcionarem dias de trabalho mais leves.

A todos aqueles que contribuíram para a realização dessa dissertação, o meu sincero agradecimento.

“Ser feliz sem motivo é a mais autêntica forma de felicidade”.

Carlos Drummond de Andrade

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. Objetivos específicos:.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. O uso e ocupação do solo e sua relação com o regime hidrológico.	14
3.2. Pagamento por serviços ambientais.	18
3.2.1. Programa produtor da água	19
3.2.2. Projeto conservador das águas	19
3.3. Serviços hidrológicos.....	24
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4.1. Caracterização da área de estudo	28
4.2. Aquisição de dados	29
4.3. Processamento de dados	30
4.3.1. Caracterização hidrológica	30
4.3.1.1. Separação dos escoamentos de base e direto.....	33
4.3.1.2. Índice de escoamento de base (BFI)	34
4.3.1.3. Rendimento hídrico (RH).....	34
4.3.1.4. Flashiness (F)	35
4.3.1.5. Coeficiente de escoamento direto (Ca)	35
4.3.2. Uso e cobertura do solo	35
4.3.2.1. Cobertura Vegetal e Florestal	37
4.4. Efeito da cobertura do solo e da precipitação nos indicadores hidrológicos	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1. Precipitação no período de estudo	41
5.2. Classificação da cobertura do solo e seus efeitos sobre a evapotranspiração	42
5.3. Avaliação dos serviços hidrológicos	49
5.3.1. Avaliação dos indicadores de disponibilidade hídrica	49
5.3.1.1. Rendimento hídrico.....	49
5.3.1.2. Índice de escoamento de base.....	53
5.3.2. Avaliação dos indicadores de proteção	59
5.3.2.1. Coeficiente de escoamento direto	59
5.3.2.2. Flashiness	64
6. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	71
ANEXO A.....	81
ANEXO B.....	84

RESUMO

Avaliação hidrológica das práticas de conservação do solo no Ribeirão das Posses, Extrema-MG

A gestão mais eficiente dos recursos hídricos é associada à preservação dos serviços hidrológicos. Em linha com a preservação de serviços hidrológicos estão os projetos de pagamento por serviços ambientais (PSA). No Brasil, a principal referência das iniciativas de PSA é o Projeto Conservador das Águas (PCA). O PCA tem como um dos objetivos promover a restauração de nascentes no município de Extrema, situado no extremo sul de Minas Gerais, região em que estão localizadas as principais nascentes da Bacia do PCJ, responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar numericamente os efeitos da mudança do uso do solo nos serviços hidrológicos de disponibilidade hídrica e proteção do Ribeirão das Posses, em Extrema-MG. Os cálculos dos indicadores hidrológicos de disponibilidade hídrica, rendimento hídrico (RH) e índice e escoamento de base (BFI); e proteção, coeficiente de escoamento direto (Ca) e flashiness (F); foram realizados, por intermédio da série histórica de dados fluviométricos e pluviométricos, referentes ao período de 2009 a 2015. A aquisição dos dados fluviométricos e pluviométricos foi realizada por meio da plataforma Hidroweb da ANA. O preenchimento de falhas nos dados hidrológicos de vazão foi realizado por intermédio de regressões lineares com os dados diários de precipitação. O método utilizado na separação do escoamento de base foi o filtro digital recursivo, desenvolvido por Lyne e Hollick (1979). Assim, os dados foram integrados ao longo do tempo, para a obtenção de seus respectivos valores anuais, e sazonais (período seco e chuvoso), e então cálculo dos indicadores. Por fim, por intermédio dos testes de Mann Kendall e Pettit foram verificadas possíveis mudanças de tendência nas séries de dados dos indicadores hidrológicos e dados de precipitação. A mudança do uso do solo foi comprovada por meio da análise de dados adquiridos na plataforma MAPBIOMAS. O aumento das categorias de cobertura do solo denominadas “Vegetação” (coberturas arbóreas da região, incluindo floresta), e “Floresta”, foram de 6,3% e 1,8% respectivamente. Para a verificação dos efeitos da cobertura do solo sobre os serviços hidrológicos, em diferentes condições climáticas, foram realizadas regressões simples entre os valores das categorias de cobertura do solo “Vegetação”, e “Floresta”, e as respostas observadas dos indicadores hidrológicos, para os períodos anual e sazonal. Não foram identificadas mudanças significativas de tendência da série de dados de precipitação, BFI, Ca e F. Foram observadas mudanças de tendência negativas, nas séries de dados de RH, confirmadas pelos testes de Mann Kendall e Pettit, para o período sazonal chuvoso. Tomando em conta os efeitos das variações nos valores precipitação na série histórica de dados avaliada pode-se concluir que a mudança do uso do solo, provocada pelas ações do PCA, está contribuindo para a redução dos valores de RH, um potencial aumento dos valores de BFI, indicando maior estabilidade da vazão do período de estiagem. Além da redução dos valores de Ca e F, auxiliando a prevenção de possíveis danos ambientais relacionados aos recursos hídricos na região.

Palavras-chave: Serviços hidrológicos, Mapbiomas, Conservador das Águas, Florestas

ABSTRACT

Hydrological evaluation of soil conservation practices in Ribeirão das Posses, Extrema-MG

The most efficient water resources management is related with the hydrological services preservation. In line with the preservation of hydrological services are the payments for environmental services (PES) projects. In Brazil the main reference of PES initiatives is the “Projeto Conservador das Águas” (PCA). The objective of the PCA is to promote the forest restoration in the municipality of Extrema, located in the south of Minas Gerais, region where the main springs of PCJ watershed, responsible for supplying the São Paulo Metropolitan Region, are located. The objective of this study was to evaluate the effects of land use change on hydrological services of water supply and flood protection of Ribeirão das Posses, in Extrema, MG. Calculations of hydrological indicators of water availability, Water yield (RH) and Base index and flow (BFI); and protection, direct flow coefficient (Ca) and flashiness (F); were performed through the historical series of flow and rainfall data from 2009 to 2015. The acquisition of fluvimetric and rainfall data from the region was carried out through the ANA Hidroweb platform. Gap fills in the hydrological flow data was performed by linear regressions with the daily precipitation data. The method used to separate the base flow was the recursive digital filter, developed by Lyne and Hollick (1979). Thus, the data were integrated over time, to obtain their respective annual and seasonal values (dry and wet season), and then the indicators calculation. Finally, through Mann Kendall and Pettit tests, were verified possible trend changes in the hydrological indicators and rainfall data series. Land use change has been proven by analyzing data acquired on the MAPBIOMAS platform. The variations in the land cover categories called “Vegetation” (regional tree cover including forest) and “Forest” were 6.3% and 1.8% respectively. To verify the effects of land cover on hydrological services under different climatic conditions, simple regressions were performed between the values of the land cover categories; “Vegetation” and “Forest” and the responses of the hydrological indicators for annual and seasonal periods. No trend changes were identified from the rainfall, BFI, Ca and F data series. Negative trend changes were observed in the RH data series confirmed by the Mann Kendall and Pettit tests for the wet period. Taking into account the effects of rainfall variations values in the historical data series, it can be concluded that the land use change, caused by the PCA actions, is contributing to the reduction of RH values, a potential increase in BFI values, that indicate a greater stability of drought flow rates, and reduction of Ca and F values, which helps to prevent possible environmental damage related to water resources in the region.

Keywords: Hydrological services, Mapbiomas, Conservador das Águas, Forests

1. INTRODUÇÃO

A preservação dos serviços hidrológicos é referência nas discussões acerca do desenvolvimento sustentável. No contexto atual, as reações provocadas pelas mudanças climáticas no ciclo hidrológico, associadas ao aumento da demanda hídrica, estabelecem a necessidade de compreensão dos fatores que influenciam o regime hídrico, e consequentemente possam colaborar para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos.

Detentor de um dos patrimônios hídricos mais importantes do planeta, o Brasil possui cerca de 12% da água disponível para consumo do mundo, e ainda assim são cada vez mais comuns práticas de racionamento da mesma (BICUDO, 2015). A escassez de água manifesta-se em regiões com características climáticas que a favoreça, ou, regiões com alta demanda como a zona metropolitana de São Paulo, e teve seu auge durante a “crise hídrica” de 2014 (CIRILO, 2015).

O Sistema Cantareira, que tem a represa do Jaguari como um de seus principais reservatórios, é responsável por cerca de 50% do abastecimento total da zona metropolitana de São Paulo (WHATELY, 2008). A represa do Jaguari é alimentada pelo rio de mesmo nome, cujas nascentes estão localizadas no extremo sul do Estado de Minas Gerais, no município de Extrema. Essa região apresentou modificações em sua paisagem ao longo dos anos, devido à substituição da vegetação nativa por pastagem.

A alteração no uso do solo, sem o manejo adequado, modifica a oferta dos serviços hidrológicos de uma região. Os efeitos das diferentes coberturas vegetais são importantes variáveis na análise das condições de infiltração, escoamento e recarga hídrica dos cursos d'água, sendo esses mais facilmente identificados em bacias hidrográficas menores, visto que é diluído quando avaliada em bacias maiores (HUFF et al., 2000).

Em linha com a preservação dos serviços hidrológicos estão os projetos de pagamento por serviços ambientais. No município de Extrema, o Projeto Conservador das Águas (PCA), que completa 15 anos em 2020, é uma das iniciativas pioneiras de compensação financeira, que utiliza pagamentos por serviços ambientais no país. Esse projeto promove a restauração e conservação de nascentes e córregos de microbacias degradadas, como a do Ribeirão das Posses, em áreas privadas.

A literatura indica que as florestas restauradas têm influência positiva na qualidade da água, mitigação de enchentes por meio da redução do escoamento direto, e diminuição das taxas de erosão (BROWN et al., 2005; ANDRÉASSIN, 2004; JACKSON et al., 2005). Apesar disso, seus efeitos sobre a disponibilidade hídrica não são conclusivos.

A premissa aqui discutida é que a floresta seja um fator importante no armazenamento da água subterrânea e na disponibilidade hídrica superficial, influenciando principalmente o escoamento

de base e as vazões mínimas. Se mesmo assim, esse efeito não for confirmado, sugere-se ainda que haja uma redução dos valores de escoamento a partir do incremento florestal (CALDER, 2002; FILOSO; 2017).

Desse modo, tomando o crescente avanço de metas internacionais baseadas no aumento da cobertura florestal, para a melhoria dos serviços hidrológicos, é necessário o desenvolvimento de estudos que possam identificar os efeitos da restauração florestal sobre os recursos hídricos.

A recuperação de áreas de recarga degradadas do importante Sistema Cantareira, e a possibilidade de análise dos impactos de uma ação de restauração em larga escala em um microbacia, promovidas pelo PCA, impulsionam o interesse da comunidade científica para o estudo da influência dessas práticas conservacionistas nos recursos hídricos. Com isso, o uso de indicadores hidrológicos que possam facilitar a avaliação da influência das práticas adotadas pelo PCA no comportamento dos cursos d'água, tem papel extremamente importante para o diagnóstico da contribuição da restauração florestal na conservação dos recursos hídricos.

Neste contexto, o objetivo do estudo será avaliar os efeitos da mudança da cobertura do solo, nos serviços hidrológicos quantitativos, de disponibilidade hídrica e proteção na microbacia do Ribeirão das Posses. O estudo contribuirá para o entendimento dos fatores que influenciam o regime hidrológico de uma microbacia, auxiliando assim a tomada de decisão acerca da gestão dos recursos hídricos.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da mudança da cobertura do solo nos serviços hidrológicos da microbacia do Ribeirão das Posses.

2.1. Objetivos específicos:

- Avaliar os indicadores hidrológicos de disponibilidade hídrica;
- Avaliar os indicadores hidrológicos de proteção hídrica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O uso e ocupação do solo e sua relação com o regime hidrológico.

O Brasil é considerado um país privilegiado sob o ponto de vista de disponibilidade hídrica no contexto internacional. De acordo com a ANA (2007), cerca de 19% da água doce do planeta se encontra em terras brasileiras. Essa quantidade de água, junto com uma importante rede fluvial, que distribui esse volume hídrico por uma significativa malha de drenagem, constitui parte significativa do potencial hídrico do mundo.

Apesar da aparente disponibilidade hídrica, a rede fluvial brasileira é complexa. As inúmeras bacias hidrográficas com aspectos socioeconômicos e naturais que diferem entre si, colaboram para distintas realidades de disponibilidade, e consumo do volume de água no território brasileiro. Estudos indicam que 68,5% da produção hídrica brasileira é gerada na região Norte, região onde está localizada apenas 7% da população nacional. Enquanto isso, a região Sudeste, responsável por uma produção hídrica de 6%, abriga aproximadamente 42,5% da população do país (EUCLYDES et al., 2007).

Tendo como base esse desequilíbrio entre a disponibilidade e a demanda, exemplificado pelo contexto brasileiro, estudos têm sido desenvolvidos com objetivo de compreender os fatores naturais que influenciam a disponibilidade hídrica de uma determinada região (ANDRÉASSIAN, 2004; BROWN et al., 2005; CARDOSO et al., 2006; LIMA, 2008).

Com o objetivo de quantificar os processos hidrológicos, grande parte desses estudos se utiliza da análise em microbacias. Calijuri e Bubel (2006) definem microbacias como áreas frágeis e constantemente ameaçadas por distúrbios, onde as escalas espacial, temporal e observacional têm uma influência maior quando comparadas as bacias hidrográficas maiores. Somando-se a isso, para Faustino (1996), a área de uma microbacia deve ser inferior a 100 km², conceitualmente. No presente estudo, a definição de bacia hidrográfica constituirá uma área que capta a água de eventos de precipitação, fazendo convergir os escoamentos para seu exutório, sendo, portanto, um conjunto de áreas drenadas por um rio principal, formada nos divisores topográficos (regiões mais altas) (BARELLA., 2001; TUCCI, 2007).

Ademais, esses estudos indicam que para o entendimento da dinâmica hidrológica, é necessário ilustrar a importância dos parâmetros físicos (área, fator de forma, compacidade, altitude e declividade média, direção e comprimento da bacia), geológicos (tipos de rochas, solo e sedimentos fluviais) e da vegetação (tipo de cobertura vegetal). Tais parâmetros podem então ser utilizados na mensuração dos fluxos hidrológicos (escoamento superficial, escoamento de base, infiltração, evapotranspiração, precipitação e vazão dos rios), de modo a quantificar os processos nas bacias

hidrográficas (CARDOSO et al., 2006; LIMA, 2008), para fins de monitoramento e gestão de recursos hídricos.

No tocante a degradação causada aos corpos hídricos, a mesma é debatida em diferentes regiões do Brasil, sendo a influência da ocupação e o manejo inadequados do solo, um dos elementos centrais do debate. O potencial de prejuízo causado pela alteração do escoamento superficial em uma região é comparável ao aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera do planeta, o que indica a relevância do tema. Portanto, entender as características e a magnitude dos impactos no que tange à conservação de recursos hídricos é uma das questões fundamentais para a sustentabilidade humana (STONESTROM et al., 2009; STERLING et al., 2012).

As alterações ambientais causadas pelos diferentes usos e ocupação do solo que afetam a composição vegetal nas áreas de nascentes, no entorno dos córregos, e nos topos de morro, modificam significativamente as estruturas físicas e os ecossistemas aquáticos, agindo de forma negativa na qualidade e quantidade de água. Esta reação em cadeia pode ocasionar o aumento do custo dos sistemas de tratamento de água, assim como a dificuldade de suprir a demanda hídrica em diversos setores da sociedade. Um estudo realizado por Reis (2004) exemplifica essa situação: segundo o autor, os custos do tratamento de água no manancial de abastecimento do Rio Piracicaba aumentam à medida que ocorrem reduções do percentual de cobertura vegetal na bacia hidrográfica.

Segundo Gonçalves (2003), a cobertura vegetal, de modo geral, executa as funções de: reforçar e manter a permeabilidade do solo; diminuir o teor de água no solo por meio do processo de transpiração; retardar a evaporação do solo, devido à diminuição da temperatura ocasionada pela pouca penetração de luz solar; e interceptar a água da chuva, por meio das camadas de húmus presentes na zonas superiores do solo, camada de herbáceas e raízes, amortecendo assim o escoamento superficial.

O escoamento (escoamento total ou deflúvio), que reflete a integração de todos os fatores hidrológicos em uma bacia hidrográfica, além de incluir características topográficas, de clima, de solo, de geologia e de uso do solo, pode ser classificado em: escoamento direto (superficial), ou escoamento de base (subterrâneo).

O escoamento superficial é consequência da chamada precipitação efetiva sobre a bacia, onde a diminuição da capacidade de infiltração do solo, devido ao aumento da umidade, causa a acumulação do excesso de água nas depressões do terreno, sendo a continuidade da chuva responsável pelo escoamento do excesso da água das suas partes superiores para as inferiores. Destaca-se que o escoamento superficial tem maior velocidade quando comparado ao escoamento de base (LIMA, 1998; SPERLING, 2014).

O escoamento de base é o componente que mantém a vazão de um curso d'água perene em períodos de estiagens prolongadas. Esse, que é consequência do escoamento que deriva das águas

subterrâneas, acontece em regime laminar, demorando semanas ou meses para contribuir para a vazão de um rio ou afluir em um lago. O processo está relacionado com o infiltrar hídrico por gravidade nos poros e fissuras das rochas, formando uma zona saturada onde a água se acumula, funcionando como um regulador de recarga do escoamento fluvial total (OLIVEIRA, 2008, SPERLING 2014).

A literatura indica que as mudanças da cobertura solo afetam a resposta hidrológica por intermédio da taxa de evapotranspiração, associada aos diferentes tipos de vegetação em uma microbacia, sendo a análise dos padrões de precipitação outro fator determinante no comportamento do balanço hídrico. O balanço hídrico é o equilíbrio entre o uso da água pela cobertura do solo da região (evapotranspiração), a entrada de água no sistema (precipitação), e a quantidade de água produzida (deflúvio) (ZHANG et al., 2001; LIMA, 2010).

Jackson et al. (2005) indicaram que a intensidade dos efeitos de diminuição do deflúvio causada pela substituição da vegetação de pequeno porte (pastagens e etc) em florestas plantadas, pode variar com as condições climáticas da região, entre as quais os valores de precipitação. Zhang et al. (2001) indicaram que a diferença dos valores de evapotranspiração entre florestas e gramíneas é pequena em locais com valores de precipitação anual é menor que 900 mm, quando comparados a locais com maiores valores de precipitação anual.

Os estudos da relação entre a cobertura florestal e o regime hídrico de uma região geralmente são analisados de forma qualitativa e quantitativa. Além disso, há uma aceitação global de que a cobertura florestal influencia de forma positiva o ciclo hidrológico de uma região, desde a precipitação à regularização do regime hídrico dos rios, que leva em consideração o escoamento de uma determinada área de drenagem ou bacia hidrográfica.

Sun et al. (2006) indicaram que a disponibilidade hídrica em uma região semi-árida no norte do território chinês estaria entre 30 e 50% comprometida em decorrência do cultivo florestal implementado. Germer et al. (2009) relataram que a substituição da floresta tropical por pastagem, pode alterar significativamente o balanço hídrico, pois de acordo com os autores, do total da precipitação em uma área experimental da região amazônica, 18% foi convertida em escoamento superficial com a cobertura de pastagem, e somente 1% com a cobertura de florestal nativa.

Trancoso et al. (2007) verificaram alterações significativas na distribuição da vazão em microbacias com cobertura florestal que foram transformadas em áreas cobertas por pastagem na Amazônia. Segundo os autores, os picos nos períodos de estiagem foram menores, ocorreram diferentes respostas do escoamento superficial nos eventos de precipitação, e maiores picos de vazão máxima na área de pastagem.

De maneira geral, o desmatamento tende a aumentar as vazões máximas das bacias hidrográficas, elevando assim o risco de enchentes que acontecem principalmente em eventos extremos. Esse efeito é gerado pela diminuição da infiltração e o aumento da umidade do solo antes

do evento acontecer. O mesmo acontece com as vazões médias, sendo considerado ainda a queda da evapotranspiração da camada vegetal, promovida pela diminuição ou conversão da floresta, como um dos fatores que disponibilizam uma maior quantidade de água para o escoamento superficial (JACKSON et al., 2005; WAHREN et al., 2012). No tocante as vazões mínimas, o desmatamento reduz a infiltração, diminuindo o escoamento de base. Esse efeito reduz a vazão mínima, uma vez que, como mencionado anteriormente, o escoamento de base mantém a vazão durante os períodos de estiagem (SMAKHTIN, 2001).

Apesar da necessidade de embasamento técnico e científico acerca do papel das florestas na conservação de água (BACELAR, 2005), acredita-se que a restauração florestal pode contribuir com o aumento da capacidade de armazenamento da água na microbacia, o que eleva o nível de vazão nos períodos de estiagem quando comparados a uma situação de área desmatada. O processo ocorre, pois com cobertura florestal a água das chuvas é liberada de forma gradativa nas microbacias; além disso, as florestas permitem uma maior percolação da água pluvial, o que abastece os lençóis freáticos aumentando a recarga de nascentes e águas subterrâneas.

Torna-se importante mencionar que ao analisar a regeneração florestal, não se pode restringir sua efetividade à presença de cobertura arbustiva, pois todos os componentes da floresta estão interligados e apresentam diferentes interdependências. Em alguns casos, formas de vida vegetal, que não somente arbórea, podem representar mais de 50% das espécies vegetais nas florestas tropicais, sendo assim cruciais para a dinâmica do ecossistema florestal (CONSERVADOR DAS ÁGUAS, 2012).

O Programa das Nações Unidas para o meio Ambiente (PNUMA) considera a restauração de matas ciliares como uma das prioridades nos planos para a preservação de recursos ambientais, entre os quais os serviços hidrológicos. Por isso, e devido a implementação de acordos com o objetivo de restauração florestal em larga escala (HONDA & DURIGAN, 2017), torna-se importante a avaliação do regime hídrico em diferentes cenários de uso e cobertura do solo, contribuindo assim para o embasamento técnico e científico e a consolidação de indicadores e modelos, que possam monitorar e estimar os serviços hidrológicos de uma determinada região.

3.2. Pagamento por serviços ambientais.

O conceito de serviços ambientais é amplo, podendo ser definido de diversas formas. Para este trabalho optou-se por conceituar os serviços ambientais como iniciativas resultantes do esforço humano para favorecer a manutenção, a recuperação ou o melhoramento dos serviços ecossistêmicos, sejam eles naturais ou manejados pelo homem. Assim, o conceito é diretamente relacionado com a capacidade da natureza de promover benefícios diretos e indiretos para os seres vivos, com foco principal em quatro ações: o sequestro e a redução das emissões de carbono, a conservação da biodiversidade, a manutenção da beleza cênica e a conservação de recursos hídricos (BORN & TALOCCHI, 2002; WUNDER, 2005; KFOURI et al., 2011; SEEHUSEN & PREM, 2011).

A proposta de introdução de mecanismos econômicos como ferramentas utilizadas na gestão ambiental surgiu a partir da década de 1970, sendo essa apoiada na concepção de que o mercado e a economia poderiam agir de forma mais efetiva, quando comparados a ações políticas e a legislação (BORN & TALOCCHI, 2002). Portanto, há a perspectiva de que a aplicação concreta do conceito de desenvolvimento sustentável está diretamente ligada à valoração econômica dos serviços ambientais prestados (AMAZONAS, 2001).

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) é um recurso que garante o fornecimento dos serviços ambientais aos seus usuários, por meio de compensações financeiras àqueles que de alguma forma ajudam a prover esses serviços. Os “provedores”, incentivados pela compensação financeira, vislumbram a prestação de serviços ambientais como vantajosa, enquanto os beneficiados pelo serviço, pagam por eles (WHATELY & HERCOWITZ, 2008; PAGIOLA & PLATAIS, 2003).

O mecanismo PSA tem contribuído para os planos de gestão de bacias hidrográficas, principalmente em regiões com perdas florestais, com impactos oriundos do uso e ocupação do solo, e escassez de água, causada dentre outros motivos pelo aumento da demanda de água que advém do desenvolvimento das cidades (SANTOS, 2014). Pelo fato do Brasil ser um país com vocação agrária, os agricultores têm grande responsabilidade na conservação dos corpos d’água, e no uso do solo, passando a ser o principal fator socioeconômico a afetar o equilíbrio do ecossistema de bacias hidrográficas (HASCIC & WU, 2006).

Um sistema PSA voltado à manutenção de recursos hídricos deve atender a uma série de critérios, além de ser constituído por vendedores, produtores rurais à montante da bacia, que por meio de ações conservacionistas contribuem para a melhoria dos recursos hídricos e conservação dos solos, fornecendo assim um serviço aos compradores que estão à jusante da bacia e se beneficiam destes serviços, propiciando em contrapartida uma compensação financeira. Por isso, um dos aspectos mais discutidos atualmente é a questão da valoração dos incentivos econômicos ser baseada a partir de indicadores gerados por meio de atividades, como as avaliações hidrológicas (ZOLIN, 2010).

No âmbito global, diversas propostas similares ao PSA já foram implementadas. Países como: Austrália, Colômbia, Costa Rica, Estados Unidos, Equador, França, entre outros, já implementaram formas de compensar financeiramente os serviços ambientais prestados na conservação de recursos hídricos, sejam em escalas federal, estadual ou municipal. Santos et al. (2012) afirmam que o conceito de PSA no Brasil vem sendo discutido desde os anos 2000, após o lançamento do programa “Proambiente”. Atualmente, destaca-se o “Programa Produtor da Água” (PPA), que visa a manutenção da qualidade e quantidade dos recursos hídricos do país (GONZALEZ, 2010; GONÇALVES, 2013).

3.2.1. Programa produtor da água

A Agência Nacional das Águas (ANA), desde de 2001, vem seguindo as tendências agroambientais atuais por intermédio do PPA. O PPA tem por objetivo a aplicação do conceito de provedor-recebedor no estímulo ao desenvolvimento de sistemas PSA para proteção hídrica de mananciais estratégicos, apoiando, orientando e certificando os projetos que tenham como finalidade a conservação dos recursos hídricos.

De acordo com a ANA (2008), os agentes participantes do PPA (entidades federais ou estaduais, prefeituras municipais, organizações não governamentais e comitês ou agências de bacias hidrográficas) devem estabelecer arranjos que viabilizem o PSA, por meio de ações como: construção de terraços e bacias de infiltração, readequação de estradas, recuperação e proteção de nascentes, reflorestamento de APPs e RLs e saneamento ambiental, além de realizar o PSA aos proprietários rurais participantes. As ações estabelecidas devem induzir o alcance de metas, como: aumentar a oferta de água nas bacias hidrográficas, reduzir os níveis de poluição difusa rural, difundir o conceito de manejo integrado do solo e da água, e garantir a sustentabilidade sócio econômica e ambiental dos manejos e práticas adotadas, estabelecidas pelo PPA para cada propriedade rural.

Nos dias atuais, o PPA apoia em torno de 16 projetos de PSA em 10 Estados brasileiros (PROGRAMA PRODUTOR DE ÁGUA, 2018), tendo o “Projeto Conservador das Águas” como destaque entre eles, tanto no contexto nacional quanto no internacional.

3.2.2. Projeto conservador das águas

O Projeto Conservador das Águas (PCA) é uma iniciativa pioneira, criada pela Prefeitura Municipal de Extrema-MG, em conjunto com a organização não governamental (ONG) The Nature Conservancy (TNC) com base na lei municipal nº 2.100 de 21 de dezembro de 2005. O projeto nasceu

como um desdobramento do projeto da Prefeitura Municipal de Extrema denominado “Água é Vida”, e ganhou forte apoio de um outro programa nacional, o PPA.

O PCA busca a preservação e a conservação ambiental do município por meio da conservação do solo e da manutenção de zonas ripárias, com o objetivo de sustentar os serviços ecossistêmicos fornecidos por essa área, principalmente no tocante à produção hídrica. Os principais objetivos do projeto são: aumentar a cobertura florestal nas sub-bacias hidrográficas e implantar microcorredores ecológicos; reduzir os níveis de poluição difusa rural, decorrentes dos processos de sedimentação, eutrofização e de falta de saneamento ambiental; difundir o conceito de manejo integrado de vegetação, solo e da água na bacia hidrográfica do Rio Jaguari; e garantir a sustentabilidade sócio-econômica dos manejos e práticas implantados, por meio de incentivos financeiros aos proprietários rurais.

Para que esses objetivos sejam atingidos, quatro principais metas foram estabelecidas: adoção de práticas conservacionistas de solo, com a finalidade de abatimento efetivo da erosão e da sedimentação; implantação de sistema de saneamento ambiental rural; implantação e manutenção de APPs; e implantação de reserva legal.

Devido ao seu caráter inovador, e o compromisso da equipe técnica ambiental responsável pela implementação e manutenção do projeto, o PCA recebeu outros parceiros em níveis federais, estaduais e da iniciativa privada (Quadro 1).

Ainda que baseado nos mesmos princípios do PPA, o PCA tem suas peculiaridades, principalmente quanto à forma de remuneração dos prestadores de serviços ambientais. No PPA a remuneração do proprietário é fundamentada na área da propriedade rural que fornece os serviços ambientais, enquanto no PCA a remuneração abrange a área como o todo, sendo a participação do proprietário no projeto condicionada a três premissas principais: propriedade rural inserida na microbacia hidrográfica trabalhada no projeto, propriedade maior ou igual a dois hectares, e que o uso da água da propriedade esteja regularizado (CONSERVADOR DAS ÁGUAS, 2017). Esse comportamento é justificado pelo discurso de que no PCA o importante é a adequação total da propriedade (DOS SANTOS, 2009).

Quadro 1 - Papel das entidades parceiras no Projeto Conservador das Águas Fonte: VEIGA NETO, 2008 adaptado por JARDIM, 2010.

Instituição Parceira	Papel no Projeto "Conservador das Águas"
Prefeitura Municipal de Extrema	Pagamentos por Serviços Ambientais, mapeamento das propriedades, assistência técnica e gerenciamento do projeto
Instituto Estadual de Florestas (IEF-MG)	Financiamento dos insumos (cercas, adubos, calcário, herbicidas); apoio no processo de comando e controle e averbação das Reservas Legais das propriedades rurais
SABESP	Monitoramento da água e fornecimento de mudas
ANA	Apoio às ações de conservação do solo e monitoramento de água (instalação de uma estação de monitoramento quali-quantitativo)
TNC	Financiamento às ações de plantio, manutenção e cercamento das áreas (mão de obra e alguns insumos), monitoramento Biodiversidade e Comunidade
SOS Mata Atlântica	Fornecimento de mudas
Comitê PCJ	Apoio às ações de conservação do solo

Fitogeograficamente, a região de Extrema está inserida no Bioma Mata Atlântica, em uma zona de tensão ecológica entre a Floresta Estacional Semidecidual Densa e a Floresta Ombrófila (Densa e Mista), sendo que esta última foi a vegetação natural predominante no município. Hoje em dia, pode-se dividir o uso da terra em seis classes, entre as quais se destacam as pastagens (39,37%) e a vegetação nativa (24,49%) (PLANO MUNICIPAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE EXTREMA, 2011). Vale ressaltar ainda que as áreas antropizadas (7%) são responsáveis pelas atividades econômicas mais lucrativas do município (Figura 1).

Figura 1. Principais usos da terra no município de Extrema, MG, em 2010. A área total do município é de 24.457,50 ha. Fonte: Plano Municipal de Recursos Hídricos de Extrema (2011), adaptado por Rodrigues (2016).

Em razão do impacto causado pela mudança da cobertura do solo, destacando-se de cobertura florestal para pastagem, a microbacia do Ribeirão das Posses foi a selecionada para o início do projeto. O uso do solo na bacia das Posses, pouco se modificou percentualmente entre 1972 e 2005. A categoria pastagem era o uso dominante, com mais de 80% da área, seguida pelas matas com pouco mais de 10% do total. Com base nisso, julgou-se necessário realizar a restauração imediata das áreas de preservação ambiental nas propriedades rurais da microbacia. Acredita-se que intervenções em áreas degradadas, como as propostas pelo PCA, podem acelerar o processo de regeneração e recuperar em menor espaço de tempo algumas das funções ecológicas das matas ciliares (SALOMAO, 2008).

Atualmente, há uma grande discussão acerca das metodologias para a restauração de áreas degradadas. A complexidade das interações ecossistêmicas apoia a teoria de que o manejo sustentável dos recursos naturais não deve ser implementado por meio de padrões universais. Assim, o desenvolvimento de modelos de restauração alternativo, baseados nas características naturais das regiões de implementação, são cruciais para maximizar os efeitos do processo de restauração florestal.

As ações de implementação do projeto seguiram a ordem das propriedades de montante para a jusante do curso d'água. Com isso, foram cadastradas e mapeadas 120 propriedades rurais da microbacia, sendo a pecuária leiteira a atividade predominante na região. Por fim, antes da prática de implementação de campo, foram realizadas reuniões com os produtores do Ribeirão das Posses, para garantir a adesão dos atores ao projeto.

A etapa do mapeamento das propriedades teve como objetivo a delimitação das APPs, sendo as baseadas no Código Florestal e no Plano diretor Municipal. Após o mapeamento das áreas e o engajamento dos produtores foi realizado o isolamento das APPs, a fim de inibir os fatores de degradação ambiental, entre as quais as atividades agropecuárias na área, e iniciar os processos de regeneração natural.

A condução dos processos de regeneração florestal no Ribeirão das Posses seguiu os seguintes passos: preparo do terreno (limpeza, covas e adubação), plantio, irrigação e a manutenção da área. No preparo do terreno destacam-se as ações de limpeza do terreno: roçada e coroamento (limpeza do local específico onde será plantada a muda).

Com o objetivo de favorecer o estabelecimento mais rápido das espécies florestais, e diminuir os gastos com o controle de plantas invasoras, foram realizadas adubações de plantio e cobertura verde. A técnica de adubação verde consiste no cultivo de espécies que estruturam, enriquecem o solo, e protegem as espécies florestais introduzidas. Para a adubação verde no Ribeirão Posses foram utilizadas mudas de: calogopônio, feijão de porco, feijão guandu e mucuna.

Após o preparo do terreno foi realizado o plantio das mudas de espécies florestais nativas da região. A metodologia aplicada foi desenvolvida pelo LERF (Laboratório de Ecologia e Restauração

Florestal) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, que é baseada em dois grupos distintos de plantio: o denominado preenchimento, para rápido preenchimento das áreas, e o grupo diversidade (Figura 2). O preenchimento é caracterizado por espécies pioneiras, já o grupo diversidade, por espécies secundárias e de clímax. Ambos os grupos de mudas utilizados no projeto foram obtidos por intermédio de viveiros credenciados pela SOS Mata Atlântica.

Esquema de recomendação para o plantio dos adubos verdes no campo

Figura 2. Esquema de plantio dos adubos verdes utilizados no Ribeirão das Posses. Fonte: Livro Conservador das águas, 2012.

As atividades de implementação do projeto no Ribeirão das Posses foram finalizadas em 2009. Ainda de acordo com a TNC (2011), mais de 75.000 mudas de espécies nativas foram plantadas na microbacia, sendo o monitoramento hidrológico da região de responsabilidade da ANA, do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), e da Fundação de Apoio a Pesquisa Agrícola (FUNDAG).

Para o PCA, a adoção de práticas conservacionistas tem potencial de promover melhorias significativas na qualidade e na quantidade de água nos mananciais. Portanto, a realização de estudos que procuram avaliar a eficiência das práticas realizadas, sendo esses estudos baseados em indicadores que podem justificar as ações promovidas pelo projeto, tem papel fundamental para o diagnóstico de contribuição das áreas reflorestadas na manutenção dos serviços hidrológicos da região (SANTOS, 2014).

3.3. Serviços hidrológicos

A água é um dos fatores principais no que se refere à sobrevivência dos seres humanos. Por isso, entre os serviços ecossistêmicos mapeados é o de maior importância, sendo a base do desenvolvimento socioeconômico sustentável (HADDADIN, 2001; UNWATER, 2014).

A partir da definição de serviços ecossistêmicos, citada anteriormente, os serviços hidrológicos podem ser caracterizados como os benefícios produzidos pelos ecossistemas e utilizados pelos seres humanos no tocante aos processos hidrológicos sobre águas continentais (Figura 3), isto é, corpos hídricos não oceânicos (BRAUMAN et al., 2007, DUKU, 2015).

Figura 3. Relação entre as propriedades do ecossistema, suas funções, serviços e benefícios. Fonte: Garcia (2018) adaptado de Carvalho-Santos et al. (2014).

De acordo com Fidalgo et al. (2017), os serviços hidrológicos podem ser classificados em: serviços de suprimento de água (disponibilidade hídrica), mitigação de danos relacionados a água (proteção hídrica), culturais e de suporte ao ecossistema. Garcia (2018) define disponibilidade hídrica como a quantidade de água disponível para o consumo humano, e a proteção hídrica, como o benefício de redução dos picos de vazão e do carregamento de sedimentos para os rios. Esses serviços são analisados em três dimensões: qualidade, quantidade e temporal (BRAUMAN et al., 2007).

Como previamente mencionado, a cobertura do solo exerce um importante impacto no regime hídrico, e consequentemente nos serviços hidrológicos. Ademais, as mudanças climáticas também os têm afetado, destacando-se os serviços de disponibilidade e proteção hídrica, intimamente relacionados com a distribuição temporal, sazonal e intensidade da precipitação (BATES et al., 2008; HUNTINGTON, 2010; VOSE et al., 2011).

O monitoramento hidrológico fornece informações importantes a respeito de possíveis impactos ambientais que possam afetar a conservação dos recursos hídricos; sendo assim, constitui-se em uma ferramenta interessante na análise das bacias hidrográficas (GARCIA, 2005). A análise da qualidade e da quantidade de água são essenciais para a compressão da sustentabilidade hídrica das bacias, e consequentemente, para a elaboração de diagnósticos ambientais fundamentados. Por isso, o monitoramento em bacias pequenas, como a do Ribeirão das Posses, pode facilitar as tomadas de decisão do poder público no contexto de minimizar os prejuízos ao ecossistema (REIS, 2017).

Pesquisadores exaltam a necessidade de estudos com o propósito de monitorar e analisar os serviços hidrológicos, por intermédio de indicadores que possam caracterizar o estado hídrico de uma determinada região. A literatura destaca que o parâmetro é a forma de obtenção de uma informação capaz de quantificar um determinado fenômeno; já indicadores têm um significado mais abrangente, que vai além da medida do parâmetro. Os indicadores são constituídos de um ou mais parâmetros, sendo neste caso chamados de índices. (FIDALGO, 2017).

No trabalho que aqui se apresenta, para a avaliação dos efeitos hidrológicos causados pela mudança da cobertura do solo, na disponibilidade e proteção hídrica, foram empregados os seguintes indicadores: Coeficiente de escoamento direto, Flashiness, Índice de escoamento de base e Rendimento hídrico. Vale destacar que a oferta de cada serviço é positiva quando os valores de disponibilidade hídrica são maximizados e os de proteção minimizados.

O Coeficiente de escoamento direto (Ca), representa a parcela total escoada superficialmente na bacia com relação à precipitação total anual. Este coeficiente deve variar à medida que a bacia se urbaniza e com a magnitude da enchente. O Ca pode variar em uma mesma bacia, em função da intensidade, distribuição temporal e espacial da precipitação. A análise dos valores médio anuais, permite analisar os cenários do balanço hídrico e a interferência das mudanças do uso do solo na bacia (TUCCI, 2000).

O Flashiness (FL) é um indicador que representa a relação de magnitude entre as vazões mínimas e máximas. Este é utilizado para comparar a reposta das bacias hidrográficas ao escoamento superficial, sendo assim associado a tendência de enchentes em determinadas regiões (JORDAN et al., 2005, BROGNA et al., 2017).

O comportamento do escoamento de base de um rio pode ser representado por diversos parâmetros, entre os quais o Índice de Escoamento de Base (BFI). O BFI determina a porcentagem da vazão de um rio que é representada pelo escoamento de base, simbolizando a contribuição do aquífero subterrâneo na vazão. Desse modo, esse parâmetro pode ser utilizado para estimar os efeitos do crescimento de florestas na disponibilidade hídrica, assim como apresentado no estudo de Rodrigues (2017).

O rendimento hídrico (Q/P) é a razão entre deflúvio (Q) e a precipitação (P). Esta relação, que representa a porcentagem da precipitação que se transforma em deflúvio de um rio, foi utilizada por diversos autores (VASQUÉZ, 2019; CASSIANO, 2017; RODRIGUES, 2017; BOGGS et al., 2013) para medir os efeitos da mudança do uso do solo no regime hidrológico.

O monitoramento dos serviços hidrológicos exige um claro entendimento dos fatores que os influenciam, assim como interdependência das relações desses fatores com os indicadores de monitoramento hidrológico. Neste sentido, estudos foram desenvolvidos, acerca das relações entre diferentes coberturas do solo e variações climatológicas, com os serviços de disponibilidade e proteção hídrica.

Garcia (2018) simulou o aumento da cobertura florestal na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, localizada no município de Piracicaba, e identificou um limiar de aumento da cobertura florestal, no qual correram mudanças nos serviços de disponibilidade hídrica e proteção. Segundo a autora, os maiores efeitos encontrados foram nos indicadores de proteção, entre os quais o Flashiness, sendo a diminuição da disponibilidade de hídrica relacionada com o aumento da evapotranspiração.

Cassiano (2017) avaliou a influência da composição de florestas plantadas e nativas na conservação dos recursos hídricos. Neste estudo, a autora identificou que maiores proporções de floresta nativa, tornam a microbacia menos vulnerável aos mais secos. Esses resultados foram identificados por meio do aumento do índice de escoamento de base no período de estiagem.

Sobre as relações entre a cobertura do solo, precipitação e indicadores de serviços hidrológicos, Brogna (2017) desenvolveu modelos, anuais e sazonais, com o objetivo de explicar variação dos indicadores hidrológicos propostos no estudo, por intermédio da cobertura do solo e intensidades de precipitação ao longo dos anos avaliados. Segundo o autor, a precipitação tem um forte impacto negativo no BFI; o mesmo acontece com a cobertura florestal e o índice Flashiness, porém esse impacto negativo significa uma melhora no serviço proteção hídrica.

A relação entre a cobertura do solo e a água vem sendo amplamente debatida, principalmente nos períodos de crise hídrica. Ainda assim, há a necessidade de desenvolvimento modelos de caracterização hidrológica simples e replicáveis em diferentes regiões, fundamentados em indicadores de clara compreensão, que permitam avaliar os efeitos da cobertura do solo sobre os indicadores hidrológicos (FILOSO, 2017; SORIANI, 2016; BROGNA, 2017).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido na microbacia do Ribeirão das Posses, localizada no município de Extrema-MG, latitude 22°51'18''S e longitude 46°19'04''O (Figura 4). O qual encontra-se próximo à divisa com o estado de São Paulo (distando 492 km de Belo Horizonte e 110 km da cidade de São Paulo), e é dividido pela Rodovia Fernão Dias (BR 381), que liga São Paulo a Belo Horizonte. A microbacia do Ribeirão das Posses possui uma área de 1.218,15 hectares e está inserida na bacia hidrográfica do Rio Jaguari, um dos rios que abastece o reservatório do Sistema Cantareira no estado de São Paulo.

Figura 4. Localização e Altitude da microbacia do Ribeirão das Posses.

O clima característico, segundo a classificação de Köppen, é o Cwb, ou seja, verões brandos e suaves, com grandes períodos de estiagem no inverno. A precipitação média anual é de 1477 mm (ANA, 2008), e a temperatura anual média é de 18°C, tendo os meses mais quentes e mais frios temperaturas médias de 25,6°C e 13,1°C, respectivamente. Os solos da região são classificados em: Argissolos Vermelho-Amarelos, Cambissolos Háplicos e Húmicos, Neossolos Litólicos e Neossolos Flúvicos, como demonstrado na Figura 2A. O relevo corresponde a áreas com ondulação e forte ondulação, com variações de altitude entre 942 e 1454 m (Figura 2B) (LIMA, 2010).

Figura 5. Temperatura mínima, média e máxima, médias mensais na sub-bacia do Ribeirão das Posses. Fonte: Saad (2005).

Figura 6. (A) Mapa das classes de solos da sub-bacia das Posses, Extrema (MG) (B) Mapa de declividade da sub-bacia das Posses. Fonte: Lima (2010).

4.2. Aquisição de dados

A delimitação e o georreferenciamento das áreas analisadas foram realizadas por meio de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). O software ArcGIS 10.2.2, com o auxílio do pacote *Arc hidro*, foi utilizado para determinar a microbacia de drenagem da estação fluviométrica, assim como as estações pluviométricas inseridas na microbacia.

As informações das estações fluviométrica e pluviométricas foram obtidas no Sistema de Informações Hidrológicas – Hidroweb e no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH, ambos pertencentes a plataforma da ANA.

As imagens utilizadas para identificação da cobertura do solo, foram adquiridas por meio da plataforma Mapbiomas. A iniciativa Mapbiomas utiliza imagens de satélite Landsat (resolução 30 x 30 m), disponíveis na plataforma Google Earth Engine, com uma série temporal de mais de 30 anos (MAPBIOMAS, 2018).

4.3. Processamento de dados

O processamento de dados do estudo na microbacia do Ribeirão das Posses foi realizado e subdividido para análise, em: caracterização hidrológica e a classificação do uso e cobertura do solo.

4.3.1. Caracterização hidrológica

A etapa inicial do estudo foi constituída na delimitação da bacia de drenagem da estação fluviométrica. O modelo digital de elevação utilizado para a delimitação da área de drenagem foi o ASTER GDEM, disponibilizado por intermédio de uma parceria entre a NASA e o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI). Esse modelo possui cerca de 30 m de resolução espacial e é disponibilizado pelo USGS (*United States Geological Survey*), sendo que, o download da cena utilizada na delimitação foi realizado no portal *Earth Explorer*.

A partir da delimitação foi realizada a filtragem dos postos fluviométricos e pluviométricos da microbacia do Ribeirão das Posses. As estações selecionadas para o desenvolvimento deste estudo têm como entidade responsável a ANA, e sua operação é realizada pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM). Todas as estações duas estações fluviométricas (62584600 e 62584500) e seis pluviométricas (2246167, 2246168, 2246169, 2246170, 2246171, 2246175) foram georreferenciadas por meio do software ArcGIS 10.2.2 (Figura 7).

Sobre as estações pluviométricas, é importante destacar que, devido a mínima distância das estações de Sítio Bela Vista e Recanto do Ratinho para as zonas limites da microbacia, estas foram utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Sobre as estações fluviométricas, a Foz Ribeirão das Posses (62584600) foi a utilizada neste estudo, visto que para a estação Portal das Estrelas (62584500), não foi identificado nenhum dado de vazão.

Figura 7. Linhas de drenagem e localização das estações fluviométricas e pluviométricas da microbacia Ribeirão das Posses.

Os dados de vazão e precipitação utilizados neste estudo se referem ao período entre 2009 e 2015, totalizando 7 anos hidrológicos completos, sendo que todos os anos analisados são posteriores ao início das atividades do PCA na microbacia. Apesar da disponibilidade de dados para os anos de 2008 e 2016, estes não foram utilizados neste estudo, pois não possuem um número de meses suficientes para a caracterização sazonal.

Com os dados diários de cada mês para o período de 2009 a 2015, foram desenvolvidas equações de regressão (Tabela 1) para todos os meses de cada ano que possuíam falhas de dados fluviométricos, correlacionando assim a precipitação em milímetros (mm) e a vazão em metros cúbicos

por segundo (m^3/s). Posteriormente todos os dados diários de vazão (experimentais e estimados) foram transformados em dados diários de deflúvio, em milímetros (mm).

Tendo como base uma diferença não significativa, quando comparado a outros métodos de determinação de precipitação média, como o polígono de Thiessen, por exemplo (MENDONÇA et al., 2015), os valores de precipitação utilizados na equação de regressão consideraram a média aritmética das estações (6) pluviométricas analisadas para a realização deste estudo.

Tabela 1. Período de falhas (ano e mês) e equações de regressão de estimativa de vazão ($y, \text{m}^3/\text{s}$) em função da precipitação (x, mm), referentes a cada período.

	Período de falhas	Equação	Número de dias estimados
2009	Janeiro	$y = 0.0077x + 0.3191$	4
	Fevereiro	$y = 0.0181x + 0.3249$	4
	Abril	$y = 0.0018x + 0.0817$	2
	Maio	$y = 0.0017x + 0.0658$	2
	Junho	$y = 0.0007x + 0.0497$	1
	Dezembro	$y = 0,0188x + 0,3261$	1
2010	Janeiro	$y = 0.0092x + 0.2837$	6
	Fevereiro	$y = 0.0186x + 0.4012$	2
2015	Agosto	$y = 0.0006x + 0.0507$	1
	Setembro	$y = 0.0077x + 0.0527$	1
	Dezembro	$y = -0.0004x + 0.0958$	6

De posse dos dados diários de deflúvio (escoamento total), foi realizada a separação em escoamento de base (Q_b) e escoamento direto (Q_d). Assim, os dados de deflúvio, escoamento de base, escoamento direto e precipitação foram integrados no tempo para a obtenção dos dados mensais (caracterização sazonal) e anuais. A caracterização sazonal levou em consideração os 6 meses mais chuvosos (outubro – março) e os 6 meses mais secos (abril – setembro), denominados período seco e período chuvoso, respectivamente. Por fim, conhecendo-se os valores dos escoamentos e das precipitação anuais, foram determinados os índices BFI, RH, F e Ca.

Figura 8. Esquema das etapas empregadas nas séries de dados diários de precipitação e deflúvio, nos anos entre 2009 e 2015 para obtenção dos parâmetros anuais e sazonais utilizados na caracterização do regime hidrológico da microbacia hidrográfica do Ribeirão das posses.

4.3.1.1. Separação dos escoamentos de base e direto

O primeiro passo a ser adotado na determinação dos indicadores de serviços hidrológicos foi a separação do escoamento de base e do escoamento direto, no hidrograma das séries de vazões diárias. O método utilizado na separação foi o filtro digital recursivo, desenvolvido por Lyne e Hollick (1979). Rodrigues (2017) adaptou a equação para a determinação do escoamento de base. Para tanto, também foi utilizado um coeficiente α de valor 0,925 (NATHAN; MCMAHON, 1990), sendo Qd determinado pela equação (1) e Qb pela equação (2).

$$Qd(i) = \alpha Qd(i-1) + (Q(i) - Q(i-1)) \frac{(1+\alpha)}{2} \quad (1)$$

Em que (para $Qd(i) \geq 0$):

Qd (i) - escoamento direto (mm) no momento “i”;

Q (i) - deflúvio diário (mm) no momento “i”;

$$Qb = Q - Qd \quad (2)$$

Em que:

Q_b (i) - escoamento base (mm) no momento “i”.

4.3.1.2. Índice de escoamento de base (BFI)

A ferramenta utilizada para investigar as possíveis alterações no comportamento, anual e sazonal, do escoamento de base, foi o índice de escoamento de base que é a razão entre o volume de escoamento de base proveniente da água armazenada no subsolo, e o volume de escoamento total, em uma bacia hidrográfica.

$$BFI = \frac{Q_b}{Q} \quad (3)$$

Em que:

BFI – índice de escoamento de base (adimensional);

Q_b – escoamento de base anual e sazonal (mm); e

Q – escoamento total anual e sazonal (mm).

4.3.1.3. Rendimento hídrico (RH)

O comportamento, anual e sazonal, da razão deflúvio e precipitação, grandeza dos recursos hídricos das microbacias estudadas, foi determinada por meio do rendimento hídrico. A razão entre o deflúvio (Q) e a precipitação (P) é considerada um dos parâmetros mais importantes para quantificar as consequências da mudança do uso do solo sobre os valores anuais do deflúvio (BOGGS et al., 2015).

$$Rh = \frac{Q}{P} \quad (4)$$

Em que:

Rh - rendimento hídrico (adimensional);

Q - escoamento total anual e sazonal (mm);

P - precipitação anual e sazonal (mm).

4.3.1.4. Flashiness (F)

De acordo com Baker et al (2004), o índice Flashiness (taxa de mudança), é definido como a rapidez com que a vazão do curso d'água varia, aumenta ou diminui, a partir da ocorrência de eventos de chuva. O autor propõe a equação (5), para o cálculo do índice F, sendo que essa foi utilizada neste estudo para investigar possíveis mudanças, anuais e sazonais, na dinâmica de variação da vazão.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (5)$$

Em que:

F - flashiness (adimensional); e

q (i) - deflúvio diário (mm) no momento "i"; (mm).

4.3.1.5. Coeficiente de escoamento direto (Ca)

Para investigar possíveis modificações nos valores, anuais e sazonais, do escoamento direto, foi calculado o coeficiente de escoamento direto (Ca). O Ca foi calculado pela metodologia proposta por Tucci (2000), onde Ca é a razão entre o escoamento direto anual (Qd) e a precipitação anual.

$$Ca = \frac{Qd}{P} \quad (6)$$

Em que:

Ca - coeficiente de escoamento anual (adimensional);

Qd - escoamento direto anual e sazonal (mm); e

P - precipitação anual e sazonal (mm).

4.3.2. Uso e cobertura do solo

Como mencionado anteriormente, as informações acerca do uso e cobertura do solo utilizados neste estudo foram adquiridas por intermédio da plataforma Mapbiomas. O principal objetivo dessa plataforma é contribuir para a compreensão da dinâmica do uso do solo no Brasil e em outros países tropicais, tendo como pilares a rapidez, confiabilidade e o baixo custo no desenvolvimento de mapas de uso do solo no Brasil a partir de 1985. A criação da plataforma contribuiu para facilitar a disseminação de uma metodologia focada em uma única base de algoritmos, estabelecendo uma rede colaborativa entre especialistas em mapeamento da cobertura do solo no Brasil (MAPBIOMAS, 2018). Dentre todos os produtos do Mapbiomas, o *Mapbiomas user toolkit*, os

códigos de legenda e a classificação e a descrição detalhada do uso do solo, foram os utilizados para a identificação do uso do solo neste trabalho.

O *Mapbiomas user toolkit*, é uma ferramenta que proporciona rápida exportação da coleção Mapbiomas. Essa ferrameta é disponível no *Google Earth Engine*, e permite a exportação dos dados de uso do solo, em formato *Raster*, entre os anos de 1985 e 2017, por limite de bioma, estado, município, bacia hidrográfica e áreas protegidas.

Neste estudo, foram exportados os dados de uso do solo do município de Extrema-MG, para cada ano no período entre 2009 e 2015. Posteriormente, com o auxílio do software ArcGis 10.2.2, os dados foram georreferenciados para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 zona UTM 22S. De posse dos limites da microbacia do Ribeirão das Posses, essa foi utilizada para a extração de dados do arquivo *Raster* referente ao município de Extrema, possibilitando assim a verificação da evolução do uso do solo na área e período avaliados neste estudo.

Em seguida, baseado nos valores de cada pixel do arquivo raster do Ribeirão das posses, foi utilizado o código de legenda para a coleção 4.0 do Mapbiomas, caracterizando assim os usos do solo de acordo com identificação proposta pela iniciativa.

Figura 9. (A) *Mapbiomas user toolkit*; (B) classificação e a descrição detalhada do uso do solo; (C) códigos de legenda. Fonte: autor.

Por fim, utilizando a classificação e descrição detalhada do uso solo, proposta pela iniciativa, foram realizados agrupamentos, com o objetivo de facilitar o entendimento e a avaliação da evolução do uso do solo no período considerado neste estudo. Para isso, foram realizadas duas propostas de

avaliações distintas para a microbacia. Estas foram apoiadas na determinação da proporção de Cobertura Vegetal e Cobertura Florestal da microbacia, que serão aprofundadas adiante. A possível influência da evolução dos uso do solo nas variáveis hidrológicas foi avaliada tendo como base a resposta dos valores de evapotranspiração (precipitação subtraído do deflúvio) nos anos analisados nesse estudo.

4.3.2.1. Cobertura Vegetal e Florestal

Para o entendimento do efeito das coberturas do solo sobre os serviços hidrológicos, após a aquisição e o processamento dos dados e construção dos mapas de uso do solo, foram realizadas duas classificações distintas para a microbacia Ribeirão das Posses; estas foram denominadas: Cobertura Vegetal e Cobertura Florestal.

A classificação da Cobertura Vegetal (CV) foi composta por três categorias: Vegetação, Pastagem e Área não Vegetada. Como mencionado anteriormente, a cobertura pastagem e o atual processo de urbanização, possuem uma importância histórica para região do município de Extrema e para a microbacia do Ribeirão das Posses. Por isso, a composição das categorias de uso e cobertura do solo levou em consideração a separação da categoria Pastagem (pastagem natural ou plantada, relacionadas com atividades agrícolas) e Área não Vegetada (infraestrutura urbana, afloramento rochoso e outras áreas não vegetada) como categorias específicas.

Fundamentada na classificação proposta pela iniciativa Mapbiomas, a categoria Vegetação foi determinada tendo como base todas as coberturas arbóreas da região: cobertura florestal, formações naturais não florestais (formação campestre, área úmida natural não florestal, entre outras), e agricultura (cultura perene e semi-perene); excetuando-se a pastagem.

Considerando a importância das florestas no contexto das atividades desenvolvidas pelo PCA, a classificação Cobertura Florestal (CF) foi composta por quatro categorias de uso e coberturas do solo diferentes: Floresta, Cobertura Natural não Florestal, Pastagem e Área não Vegetada, sendo as duas últimas já definidas anteriormente. Juntas as categorias Florestas e Cobertura Natural não Florestal constituem a categoria Vegetação referente a classificação CV descrita anteriormente.

Da mesma forma, utilizando a definição proposta pela iniciativa Mapbiomas, a categoria Formação Natural não Florestal considera as formações arbóreas: formações naturais não florestais (formação campestre, área úmida natural não florestal, entre outras), e agricultura (cultura perene e semi-perene); excetuando-se a cobertura florestal e a pastagem. Já a categoria Floresta considera: formação savânica, mangue, floresta plantada e outras formações florestais.

Finalizadas as classificações CV e CF, foram verificadas as evoluções temporais das categorias para ambas a classificações. Assim, possuindo os valores da área (percentual e em hectares) de cada

categoria de uso e cobertura do solo para a microbacia, foram avaliados os efeitos das variações da “Vegetação” e “Floresta”, sobre os indicadores hidrológicos de disponibilidade e proteção hídrica.

4.4. Efeito da cobertura do solo e da precipitação nos indicadores hidrológicos

Para garantir a compreensão da resposta dos serviços hidrológicos, os indicadores de disponibilidade e proteção hídrica foram avaliados em relação a sua resposta anual e sazonal, ao longo dos anos considerados neste estudo. A avaliação dos testes estatísticos, foi realizada por meio do software Microsoft Excel 2016, com o auxílio do pacote XLSTAT.

Após o cálculo dos valores dos indicadores para cada ano, foi realizado o teste de normalidade estatística de Shapiro Wilk, com significância de 5%, e comprovada a ausência de normalidade, foi aplicado o teste de Mann Kendall. Em caso de tendência significativa comprovada pelo último teste, foi aplicado o teste de Pettitt, visando constatar em que ano ocorreu a mudança de tendência da serie temporal.

O teste de Mann-Kendall é um método robusto, sequencial e não paramétrico, utilizado para constatar se uma determinada série de dados possui uma tendência temporal de alteração estatisticamente significativa. Além de não requerer distribuição normal dos dados, por ser um teste não paramétrico, é pouco influenciado por mudanças abruptas ou séries não homogêneas (YUE et al., 2002; ZHANG et al., 2009). Já o teste de Pettitt, possibilita a identificação de tendência significativa nas séries históricas de vazões e precipitações mensais, bem como do ponto de mudança da série (ULIANA et al., 2013).

Os efeitos da cobertura do solo sobre os indicadores hidrológicos de disponibilidade e proteção hídrica foram avaliados, levando-se em consideração a variação das categorias Vegetação e Floresta, descritas anteriormente. Para tanto, foi realizada uma regressão simples entre cada categoria de uso e cobertura do solo mencionadas e as respostas sazonais e anuais dos indicadores hidrológicos, sendo o coeficiente de determinação (R^2) utilizado para identificar o melhor ajuste que representasse as relações. A avaliação dos efeitos da precipitação na resposta dos indicadores hidrológicos, seguiu o mesmo raciocínio descrito (Tabela 2).

Tabela 2. Relação das avaliações dos serviços hidrológicos, indicadores, períodos e fatores analisados no estudo.

Serviço hidrológico	Indicador hidrológico	Período	Fator
Disponibilidade hídrica	BFI	Anual	Cobertura do solo* Precipitação
		Sazonal	Cobertura do solo Precipitação
	RH	Anual	Cobertura do solo Precipitação
		Sazonal	Cobertura do solo Precipitação
Proteção	F	Anual	Cobertura do solo Precipitação
		Sazonal	Cobertura do solo Precipitação
	Ca	Anual	Cobertura do solo Precipitação
		Sazonal	Cobertura do solo Precipitação

*Cobertura do solo: Vegetação e Floresta

Por fim, objetivando potencializar a replicabilidade do estudo, e a abrangência de um maior número de fatores na avaliação dos serviços hidrológicos da região, foi realizada uma análise de regressão linear múltipla, incorporando o uso e cobertura do solo e a precipitação como variáveis que impactam a resposta anual e sazonal dos indicadores hidrológicos de disponibilidade e proteção hídrica, período de 2009 a 2015. O modelo de regressão proposto é descrito na equação 7, sendo o teste f aplicado para a análise de significância, e o (R^2) utilizado para avaliar o ajuste das variáveis ao modelo proposto.

$$Y_i = f(\text{Cobertura do solo; Precipitação}) \quad (7)$$

Sendo que:

Y_i – Indicador hidrológico, anual e sazonal (adimensional);

Cobertura do solo – Vegetação ou Floresta (%); e

Precipitação – Precipitação anual e sazonal (mm).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Precipitação no período de estudo

Ao longo do período de estudo, verificaram-se grandes variações nos valores anuais e sazonais de precipitação da região, destacando-se a variabilidade da precipitação anual nos anos analisados em relação à média anual (1477 mm) observada pela ANA (2008).

A Figura 10 e a Tabela 3 ilustram a variação dos valores anuais e sazonais de precipitação da região no período de 2009 a 2015. Quando comparado com a média anual de precipitação da região determinada pela ANA (2008), o valor médio das precipitações referentes ao período anual, foi 4,9% maior, atingindo valores 38% maiores e 21% menores, nos anos de 2009 e 2014, respectivamente.

Figura 10. Variação dos valores da precipitação (P) no período de estudo.

Tabela 3. Valores médios, maiores, menores e coeficiente de variação (CV) anuais e sazonais da precipitação.

	P anual (mm)	P seco (mm)	P chuvoso (mm)
Média	1549	358	1191
Maior	2045	511	1598
Menor	1163	253	830
CV %	18.6%	27.2%	21.2%

Com relação à variação da precipitação no período de estudo, foi identificado uma alta diferença significativa entre os maiores e menores valores dos períodos anuais e sazonais. Nos períodos

anual e chuvoso, essa variação corresponde a aumentos de até 76% e 93%, respectivamente, correspondendo à diferença entre os anos de 2009 e 2014. Para o período seco, a variação é de 102% e corresponde à diferença entre os anos de 2012 e 2010.

Ademais da avaliação do comportamento dos valores extremos de precipitação, foi verificada a homogeneidade de dados da série, sendo esta determinada por meio do coeficiente de variação. Os valores dos coeficientes de variação, calculados para os períodos anual, seco e chuvoso, foram 18,6%, 27,2% e 21,2%, respectivamente. De acordo com a classificação de Gomes (1985), o período anual foi classificado como de média heterogeneidade e os períodos sazonais como de alta heterogeneidade em relação aos dados de precipitação.

A heterogeneidade e a amplitude dos dados de precipitação no período analisado confirmam a escolha de avaliação por períodos anuais e sazonais. Baseado na equação do balanço hídrico apresentada anteriormente, a alta variabilidade dos valores de precipitação representa diferentes cenários anuais e sazonais de evapotranspiração e deflúvio, dificultando a avaliação dos valores absolutos dessas variáveis hidrológicas. Por isso, diversos estudos (BROGNA et al., 2017; SALEMI, 2013; BROWN et al., 2005) empregam avaliações baseadas em indicadores, que consideram as proporções (entre precipitação, deflúvio e evapotranspiração) para a caracterização dos serviços hidrológicos de uma determinada região.

Apesar da variação nos valores de precipitação, de acordo com o teste de Mann Kendall e o teste de Pettit, não foram encontradas tendências significativas em seu comportamento, tanto para os valores anuais quanto para os sazonais. Ainda assim, a entrada de água no sistema hidrológico, representada pela precipitação, é fator crucial no entendimento da resposta dos indicadores hidrológicos no período do estudo.

5.2. Classificação da cobertura do solo e seus efeitos sobre a evapotranspiração

A verificação da cobertura do solo da microbacia do Ribeirão das Posses em 2009, realizada por este estudo, ratifica a decisão de implementação pioneira das práticas de conservação do solo desenvolvidas pelo PCA na região. Nota-se (Figura 11) que, em 2009, a cobertura do solo na região encontrava-se altamente modificada, destacando-se o baixo percentual da categoria “Floresta” (8,0% ou 97,56 ha), o alto percentual da categoria “Pastagem” (76,6% ou 933,39 ha) e a categoria “Vegetação” (17,4% ou 212,31 ha).

Esses percentuais de cobertura do solo diferem dos valores encontrados por Lima (2010). Em seu estudo foi identificado um percentual de cobertura vegetal de 24%, correspondente a uma área de 289,1 ha. Ainda segundo os autores, a importância da cobertura vegetal está relacionada ao balanço hídrico, pois possibilita a infiltração de água, preservando a recarga oriunda da precipitação. Assim, as

práticas conservacionistas do solo e da água nas subbacias que alimentam o sistema Cantareira, evitam o comprometimento da recarga do lençol freático, visto que esta pode ser afetada pela diminuição da cobertura vegetal da região.

A partir da classificação do uso do solo desenvolvida no estudo (CV e CF), foi identificado um incremento de 6,4% (77,13 ha) e 1,8% (21,78 ha) nas categorias “Vegetação” e “Floresta” respectivamente. Além disso, ocorreu a diminuição de 10,4% da “Pastagem”, e o aumento de 4,1% (49,41 ha) e 4,6% (55,35 ha) “Área não Vegetada” e “Cobertura natural não florestal” (formações naturais e agricultura), respectivamente, sendo este último responsável por aproximadamente 72% do incremento da categoria “Vegetação” no período de 2009 a 2015 (Figura 11, e Anexo A).

Figura 11. Cobertura do Solo nos anos de 2009 e 2015, no Ribeirão das Posses, Extrema MG.

Tabela 4. Variação percentual das categorias de cobertura do solo para a classificação Cobertura Vegetal do Ribeirão das Posses, Extrema, MG.

Ano	Categoria de cobertura do solo (%)		
	Vegetação	Pastagem	Área não Vegetada
2009	17,4%	76,6%	5,9%
2010	17,9%	75,7%	6,4%
2011	19,5%	72,8%	7,8%
2012	20,3%	72,0%	7,7%
2013	21,9%	70,2%	7,9%
2014	23,1%	67,4%	9,5%
2015	23,8%	66,2%	10,0%

Tabela 5. Variação percentual das categorias de cobertura do solo para a classificação Cobertura Florestal do Ribeirão das Posses, Extrema, MG.

Ano	Categoria de cobertura do solo (%)			
	Floresta	Cobertura natural não Florestal	Pastagem	Área não Vegetada
2009	8,0%	9,4%	76,6%	5,9%
2010	7,7%	10,1%	75,7%	6,4%
2011	8,1%	11,3%	72,8%	7,8%
2012	8,8%	11,6%	72,0%	7,7%
2013	9,2%	12,7%	70,2%	7,9%
2014	9,3%	13,8%	67,4%	9,5%
2015	9,8%	14,0%	66,2%	10,0%

Após a constatação da mudança da cobertura do solo, foram verificados possíveis efeitos dessa variação sobre a evapotranspiração da região. Para tanto, determinaram-se os valores de evapotranspiração anual e sazonais, e então foi averiguada a possibilidade de um ajuste de regressão significativo entre os incrementos percentuais de “Vegetação” e “Floresta”, e os valores anuais da razão entre evapotranspiração e precipitação (Evpt %).

Tabela 6. Valores médios, maiores, menores e coeficiente de variação (CV) anual e sazonais da evapotranspiração.

	Evpt anual (mm)	Evpt seco (mm)	Evpt chuvoso (mm)
Média	1119	219	900
Maior	1468	347	1121
Menor	813	98	715
CV %	20.8%	44.2%	18.3%

Na Tabela 6, observa-se que Foram identificadas altas amplitudes de variação de evapotranspiração para os períodos anuais e sazonais. Nos períodos anual e chuvoso essa variação atinge 80,5% e 56,8%, respectivamente; destaca-se o período seco, quando a amplitude alcança 253%; todas as amplitudes correspondem aos anos de 2009 e 2013. Os coeficientes de variação calculados foram classificados em: alto, muito alto e médio, para os períodos anual, seco e chuvoso, respectivamente, caracterizando assim a heterogeneidade da série histórica (Figura 12).

Os valores anuais encontrados no estudo estão em concordância com a variação da evapotranspiração em florestas nativas. Em uma síntese sobre as relações entre precipitação, deflúvio e evapotranspiração em florestas plantadas de *Eucalyptus* e vegetação nativa, Rodrigues (2017) analisou 13 estudos realizados em área de vegetação nativa, sendo dois realizados na Mata Atlântica. Os estudos, indicam uma amplitude de evapotranspiração entre, 689 e 1969 mm, para valores de precipitação entre, 1301 e 2870 mm. No presente estudo, os anos de 2013 e 2014 (1267 e 1163 mm) ultrapassam o limite inferior observado pela autora.

Figura 12. Variação dos valores de evapotranspiração em relação a precipitação, e respostas das Evpt% anuais e sazonais.

Considerando a importância da entrada de água no sistema hidrológico representada pela precipitação, a literatura indica a Evpt% como a melhor forma de avaliação da resposta da evapotranspiração, principalmente quando consideradas escalas sazonais nos estudos (SALEMI, 2013; LI, 2017). Para isso, foi realizada a seguinte classificação: (i) Evpt% = 100 %; (ii) $100\% < \text{Evpt\%} > 90\%$; (iii) $90\% < \text{Evpt\%} < 80\%$; e (iv) $\text{Evpt\%} < 80\%$ (RODRIGUES, 2017).

Quando considerados os períodos anuais e sazonais, os resultados indicam que: nos períodos anual e chuvoso, 5 anos (71%) são classificados como (iv) (2009, 2010, 2011, 2012 e 2013), e 2 anos são classificados como (iii) (2014 e 2015); no período seco, 6 anos (86%) pertencem a classe (iv) (2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015) e 1 ano pertence a classe (iii) (2014).

Estes resultados vão de encontro ao observado nos estudos relacionados à vegetação nativa e o bioma mata atlântica, principalmente para as repostas no período seco. De acordo com Rodrigues (2017), 78% das observações da Evpt% anual em estudos relacionados à vegetação nativa estão enquadradas na classe quatro, enquanto todas as observações avaliadas para o bioma Mata Atlântica se encontram nessa classificação.

Apesar disso, é importante destacar os valores observados nos anos de 2014 e 2015, para o período anual e sazonal chuvoso. A mudança das classificações de Evpt% anos podem indicar a consolidação da influência do incremento da cobertura florestal no aumento da Evpt%.

Por intermédio do teste de Mann Kendall, foram identificadas mudanças de tendência significativas positivas para Evpt% no período chuvoso (Figura 12). Por isso, foi realizada a análise de Pettit que indicou os anos de 2011 e 2012 como os anos de mudança da série. As médias foram modificadas de 70,3 %, até 2011 (vermelho), para 80,2 % (verde) de 2012 em diante (Figura 12).

Estudos indicam que, em comparação com outros usos do solo, como agropecuário, a restauração florestal por vegetação nativa ou a implementação de florestas plantadas, aumentam a evapotranspiração da região, principalmente em áreas não florestadas anteriormente (BROWN et al., 2005; JACKSON et al., 2005; BRUIJNZEEL, 2004), como por exemplo o Ribeirão das Posses.

Assim, o incremento da “Floresta” e da “Vegetação”, potencializado pelos maiores valores de temperatura em relação ao restante do ano para o período chuvoso, que é característico da região, provocou o aumento da demanda hídrica, conduzindo a uma maior conversão da entrada de água (precipitação) em evapotranspiração.

Por isso, baseados nos valores obtidos pelas classificações da cobertura do solo, CV e CF, foram desenvolvidas regressões simples entre os valores das categorias “Vegetação” (classificação CV) e “Floresta” (classificação CF); e os valores de evapotranspiração entre para os períodos anual, seco e chuvoso (Figura 13).

Para a “Vegetação” foram verificados ajustes significativos quadráticos nos períodos anual ($R^2 = 0,8$) e seco ($R^2 = 0,7347$). Como mencionado anteriormente, a categoria leva em consideração

todas as coberturas vegetais com exceção da pastagem. Foram identificadas alterações na resposta (de negativa para positiva) da Evpt%, a partir do intervalo entre 19,5 a 20,3% de estabelecimento da “Vegetação” na área da microbacia em ambos os casos. No caso do período chuvoso, foi identificado um ajuste linear positivo ($R^2 = 0,67$) indicando que um aumento do percentual da área coberta por “Vegetação” na microbacia, gera um aumento da Evpt%.

A cobertura “Floresta” segue o mesmo padrão, ajustes quadráticos para os períodos anual ($R^2 = 0,48$) e seco ($R^2 = 0,246$), porém não significativos, com alterações na resposta (de negativa para positiva) da Evpt%, a partir do intervalo entre 8,1% e 8,8% de estabelecimento da “Floresta” na área da microbacia, e ajuste linear positivo indicando que o aumento percentual da “Floresta” gera o aumento da Evpt% no período chuvoso ($R^2 = 0,62$).

A resposta anual e sazonal seca dos valores da Evpt%, em relação às mudanças da cobertura do solo seguem hipóteses bem similares. A relação negativa, verificada em um primeiro momento, pode ser explicada pelas variações percentuais da cobertura do solo apresentada na Tabela 5.

Até o período de mudança da série, o incremento da categoria “Vegetação”, foi proporcionado pela categoria “Cobertura natural não Florestal”. Adicionado a isso está o fato de que grande parte da diminuição percentual da categoria “Pastagem”, foi adicionada a categoria “Área não Vegetada”. Assim, ficou caracterizado uma diminuição da vegetação arbórea da microbacia, o que provocou uma diminuição da demanda evapotranspiratória da região, e consequentemente o efeito de queda da Evpt% proporcionado pelo aumento da “Vegetação”.

Posteriormente, pode-se supor que o efetivo incremento da categoria “Floresta”, verificado na Tabela 5, proporcionou uma maior demanda evapotranspiratória, o que associada com a diminuição dos valores de precipitação, motivou o aumento de Evpt%. A literatura indica que a maturidade da floresta restaurada influencia diretamente na evapotranspiração da região. Então, florestas mais jovens, como as avaliadas neste estudo, tendem a uma maior demanda hídrica, e consequentemente maiores valores de Evpt% (LI, 2017, MALMER et al., 2010, FARLEY et al., 2005).

Figura 13. Valores de Evpt% anual e sazonal em função dos incrementos das categorias de cobertura do solo “Vegetação” e “Floresta”. As relações em que estão indicadas as equações, apresentaram relações significativas para um valor $p < 0,05$.

Essas influências são mais sentidas em situações com menores valores de precipitação, como as apresentadas nos períodos secos, visto que nesse caso as mudanças na cobertura do solo, que tem um impacto na evapotranspiração, são mais perceptíveis (LI, 2016), e consequentemente marcantes na relação Evpt%.

5.3. Avaliação dos serviços hidrológicos

As séries históricas completas referentes aos dados de precipitação, evapotranspiração, deflúvio, escoamento de base e escoamento direto; assim como os valores dos indicadores hidrológicos e Evpt% calculados para os anos de 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015, podem ser encontradas no ANEXO A.

5.3.1. Avaliação dos indicadores de disponibilidade hídrica

5.3.1.1. Rendimento hídrico

Os valores de deflúvio e precipitação, assim como a resposta do rendimento hídrico (RH), obtidos nos períodos anual e sazonal do intervalo entre 2009 e 2015, estão ilustrados na Tabelas 7 e na Figura 14.

Tabela 7. Valores médios, máximos, mínimos e coeficiente de variação (CV) anual e sazonal do Rendimento hídrico.

	RH anual (%)	RH seco (%)	RH chuvoso (%)
Média	27	40	24
Maior	37	65	32
Menor	12	17	11
CV %	35%	49.5%	35.3%

Os resultados observados indicam que o RH apresentou maior valor médio (40%) no período sazonal seco. Os coeficientes de variação calculados foram classificados em muito altos, para os períodos anual e sazonais.

Sobre a amplitude de variação, nos períodos anual e sazonal chuvoso, os valores alcançam 24,6% e 21,0%, respectivamente, correspondendo a diferença entre os anos de 2011 e 2014. Essas amplitudes representam os valores de deflúvio 591 e 143 mm, e precipitação 1604 e 1163 mm, no período anual; e valores de deflúvio 419 e 88 mm, e precipitação 1328 e 830 mm, no período sazonal chuvoso. Para o período sazonal seco, a amplitude é de 48% e corresponde a diferença entre os anos de 2012 e 2010, representando valores de deflúvio 263 e 86 mm, e precipitação 511 e 253 mm.

Os valores anuais de RH obtidos neste estudo estão de acordo com os encontrados na literatura para o bioma Mata atlântica. Rodrigues (2017), analisando 45 observações, referente a 13 estudos em florestas nativas, verificou uma amplitude de variação de, 0,13 (13%) a 0,50 (50%). Extrapolando a amplitude citada para o período sazonal, nota-se que o RH obtido neste estudo para o

período chuvoso está dentro do intervalo de amplitude identificado pela autora. Sobre o período seco, vale destacar que o maior valor de rendimento hídrico do período seco, qual seja, 65% no ano de 2013, para condições de deflúvio, 185 mm e precipitação, 283 mm, não está no intervalo proposto.

A avaliação das respostas de RH ao longo do período avaliado neste estudo (Figura 14), identificou comportamentos similares entre os períodos anual e sazonais. Por meio do teste de Mann Kendall foram observadas variações de tendência significativas (negativas) para os valores de RH no período chuvoso. Por isso foi realizada análise de Pettit que constatou 2011 e 2012 como os anos de mudança da série. O teste indicou mudanças na média dos valores do RH, de 29,70, até o ano de 2011 (verde), para valores de 19,09 de 2012 em diante (vermelho).

Figura 14. Variação dos valores de deflúvio em relação a precipitação, e respostas do rendimento hídrico anual e sazonais.

Tomando como base os conceitos do balanço hídrico, mencionados anteriormente em 3.1, as respostas de RH observadas estão diretamente ligadas aos comportamentos dos valores de precipitação e evapotranspiração da região analisada.

Nos períodos anual e sazonal, as respostas do RH em relação às variações no balanço hídrico podem ser analisadas em dois momentos distintos. Em um primeiro momento, ocorre um aumento (período anual e seco) ou estabilização (período chuvoso) da resposta de RH, em virtude das mudanças da cobertura do solo, já mencionadas, item 5.2, até o ano de 2011, que acarretaram a queda (período anual e seco) ou estabilidade (período chuvoso) da Evpt%.

Adicionado a isso, está o fato da tendência de queda nos valores de precipitação anual e do período chuvoso, promover um ambiente de maior restrição hídrica nesses períodos ao longo dos anos, potencializando a sensibilidade da microbacia aos efeitos de Evpt% sobre a resposta RH (LI, 2016). Os efeitos da restrição hídrica são ainda mais claros no período seco, quando se tem uma maior percepção da variação da Evpt% sobre os valores de RH.

O segundo momento, indica uma tendência de queda nos valores de RH anual e sazonal; esse efeito negativo é explicado pelo aumento da Evpt% a partir do incremento da cobertura florestal nos anos de 2011 em diante. Essa resposta está em concordância com a grande maioria dos estudos que analisam o incremento da cobertura florestal em microbacias hidrográficas (FILOSO et al., 2017, BOSCH et al., 1982; BROWN et al., 2005).

Por isso, para destacar as hipóteses apresentadas sobre as respostas dos valores de RH da região, no período analisado, foram desenvolvidas regressões simples entre os valores das categorias “Vegetação” e “Floresta”, apresentadas nas Tabelas 4 e 5, e os valores de RH anual e sazonal (Figura 14).

Verifica-se na Figura 15, que para a categoria “Vegetação”, foram encontrados ajustes quadráticos significativos nos RH; para o período anual ($R^2 = 0,8000$) e sazonal seco ($R^2 = 0,7347$). As alterações nas respostas (de positiva para negativa) nos valores de RH, apresentaram-se a partir do estabelecimento de 19,5 a 20,3% (2011 e 2012), de “Vegetação” na área da microbacia. No caso do período chuvoso, foi encontrado um ajuste linear negativo ($R^2 = 0,6700$), indicando que o aumento da “Vegetação” provoca a redução dos valores de RH.

A categoria “Floresta” segue o mesmo raciocínio, com ajustes quadráticos em relação aos valores de RH no período anual ($R^2 = 0,4900$) e sazonal seco ($R^2 = 0,2460$), porém não significativos, com alterações nas respostas de RH (de positiva para negativa), a partir do intervalo de valores entre, 8,1 e 8,8% (2011 e 2012) da área coberta com “Floresta”. Para o período chuvoso, foi obtido um ajuste linear descendente ($R^2 = 0,6200$), indicando que o aumento da categoria “Floresta” proporciona uma diminuição dos valores de RH.

Além disso, foram realizadas regressões simples entre os valores anual e sazonal de precipitação e RH. Foram determinados ajustes lineares para os períodos anual ($R^2 = 0,0358$) e sazonal chuvoso ($R^2 = 0,2770$), e um ajuste quadrático para o período seco ($R^2 = 0,3710$), sendo as alterações na resposta de RH (de negativa para positiva), a partir do intervalo entre 333 e 401 mm de precipitação.

A variação do RH em função dos valores de “Vegetação” e “Floresta” segue os preceitos do balanço hídrico, mencionado anteriormente. Para os períodos anual e sazonal, a disponibilidade hídrica indicada pelo aumento dos valores de RH em função do aumento de “Vegetação”, ocorre devido à queda dos valores de Evpt%, provocada pelas mudanças da cobertura do solo explicadas anteriormente, e indicadas na Tabela 5.

Posteriormente, o incremento percentual da categoria “Florestas” na região, no intervalo entre 8,1 e 8,8% promove o aumento da Evpt% e, conseqüentemente, a diminuição da disponibilidade hídrica indicada pelos valores de RH. A diminuição da sensibilidade hidrológica sobre o balanço hídrico no período chuvoso permite a visualização dos efeitos negativos, do aumento das categorias “Vegetação” e “Floresta” (aumento de Evpt%), sobre RH.

A precipitação demonstra uma influência positiva nos valores do RH. A literatura indica que esse efeito positivo da precipitação sobre a disponibilidade hídrica, é causado pela maior entrada de água no balanço hídrico, o que aumenta os valores de deflúvio (BROGNA, 2017). Já sobre o período seco, provavelmente o comportamento negativo pode ser explicado pela necessidade de recarga hídrica dos valores de precipitação, necessários para suprir a demanda evapotranspiratória da cobertura do solo da microbacia. Após uma entrada de água mínima, a precipitação exerce a mesma influência (positiva) sobre os valores de RH indicados para o período anual e sazonal chuvoso.

Ademais, destaca-se que a cobertura florestal pode influenciar a disponibilidade hídrica de uma microbacia de outras formas, como por exemplo, por intermédio das descargas do lençol freático na superfície, garantindo o fluxo constante principalmente nos períodos de estiagem. Essa influência foi estimada por meio do Índice de escoamento de base da microbacia, que será discutido no próximo tópico.

Figura 15. Valores da RH anual e sazonal em função da precipitação e dos incrementos das categorias de cobertura do solo “Vegetação” e “Floresta”. A relações em que estão indicadas as equações, apresentaram relações significativas para um valor $p < 0,05$.

5.3.1.2. Índice de escoamento de base

Os valores de escoamento de base e deflúvio, assim como a resposta do índice de escoamento de base (BFI), obtidos nos períodos anual e sazonal do intervalo entre 2009 e 2015, são apresentados na Tabela 8 e na Figura 16.

Tabela 8. Valores médios, máximos, mínimos e coeficiente de variação (CV) anual e sazonal do Índice de escoamento de base (BFI).

	BFI anual (%)	BFI seco (%)	BFI chuvoso (%)
Média	50	67	41
Maior	65	81	59
Menor	29	58	23
CV %	22%	13.2%	28.7%

Os resultados observados indicam que o BFI apresentou maior valor médio (67%) no período sazonal seco. Os coeficientes de variação calculados, foram classificados em alto para o período anual e sazonal chuvoso, e médio para o período seco.

Sobre a amplitude de variação, nos períodos anual e sazonal chuvoso, foi observado o mesmo valor, ou seja, 36%, correspondendo à diferença entre os anos de 2014 e 2009. Essas amplitudes representam os valores de escoamento de base 93 e 169 mm, e deflúvio 143 e 577 mm, no período anual; e valores de escoamento de base 52 e 108 mm, e deflúvio 88 e 478 mm, no período sazonal chuvoso. Para o período sazonal seco, a amplitude é 23% e corresponde à diferença entre os anos de 2011 e 2012, representando valores de escoamento de base 139 e 153 mm, e deflúvio 172 e 263 mm.

Os valores anuais do índice de escoamento de base diferem dos encontrados em estudos que consideram condições relacionadas a florestas nativas. Avaliando as influências de diferentes coberturas do solo (Floresta nativa, pastagem e *Eucalyptus*) sobre os processos hidrológicos no bioma Mata Atlântica, Salemi et al. (2013) encontraram valores de BFI anual para floresta nativa (11,5 ha) iguais, 76%, em dois anos hidrológicos sequenciais.

Os resultados de BFI anual encontrados neste estudo estão mais alinhados se comparados aos valores, de estudos em área compostas por diferentes coberturas de solo, ou em áreas que estão experimentando processos de restauração florestal. Chile (2019), baseada em 11 anos hidrológicos de avaliação, realizou a caracterização hidrológica de duas bacias hidrográficas diferentes, localizadas no domínio mata atlântica. A bacia composta em sua totalidade por cobertura florestal nativa (38,2 ha), apresentou maiores valores médios de BFI anual (58,6%), e menores valores de amplitude de variação (3,2%) que os encontrados neste estudo. Enquanto a bacia composta por 15% (20,3 ha) de cobertura florestal nativa apresentou valores médios de 56,8% e uma amplitude de variação de 27,9%. Vásquez (2019), ao analisar as respostas hidrológicas dos 5 primeiros anos de restauração florestal, em uma área de uma área localizada de no domínio Mata Atlântica (72 ha), encontrou valores médios de 53%, para o BFI anual, e 25 % de amplitude de variação.

Figura 16. Variação dos valores de escoamento de base em relação ao escoamento total e respostas do índice de escoamento de base (BFI) anual e sazonais.

A avaliação das respostas do BFI entre os anos analisados indicou comportamentos semelhantes: ajustes quadráticos nos períodos anual ($R^2 = 0,5970$) e sazonal chuvoso ($R^2 = 0,4338$), e um ajuste linear no período seco ($R^2 = 0,1235$). Foram realizados os testes de Mann Kendall e Pettit que não identificaram variação tendência significativa da série nos anos avaliados neste estudo.

Considerando as avaliações da precipitação, Evpt% e RH apresentadas anteriormente, as tendências de aumento nos valores de BFI, para o período anual e sazonal chuvoso, podem ser explicadas em dois momentos distintos. Inicialmente, a diminuição da demanda evapotranspiratória indicada por Evpt%, impulsionaria o aumento dos valores de deflúvio, representados por RH, que não são perceptíveis devido a tendência de queda dos valores de precipitação. Sabe-se que o deflúvio é composto por escoamento total e escoamento direto. Assim, os efeitos da diminuição da precipitação

influenciaram de forma mais intensa o escoamento direto que o escoamento de base, sendo este o fator responsável pela diminuição do deflúvio, e consequentemente o aumento do BFI.

Adicionalmente, deve se considerar os benefícios provocados pelo incremento da cobertura vegetal natural e florestal nos parâmetros físicos do solo reportados em diversos estudos (PRICE et al., 2011; BRUIJNZEEL, 2004). O maior teor de matéria orgânica proporciona o aumento da agregação e do espaço dos poros que influenciam a condutividade hidráulica, melhorando assim as condições de infiltração de água (ZIMMERMANN et al; 2006; BONELL et al; 2010). Este efeito também pode contribuir para a compreensão do aumento de RH, no primeiro momento, mencionado anteriormente.

Ainda sobre a análise do período anual e sazonal chuvoso, em um segundo momento, acredita-se que o aumento da Evpt%, provocada pelo aumento da cobertura florestal, associada a diminuição da precipitação, que induziram a diminuição de RH, também causaram efeitos sobre o BFI. Ou seja, conhecendo-se a alta demanda hídrica da cobertura florestal, os efeitos positivos causados pela melhoria das condições de infiltração, podem ter sido inferiores ao incremento da evapotranspiração provocado pelo aumento da cobertura florestal (CALDER, 2007).

As melhorias nas condições de infiltração do solo pressupostas anteriormente, podem ser visualizadas no período seco. De acordo com Salemi et al. (2013), em comparação com outras coberturas do solo, como por exemplo as pastagens, as florestas permitem uma maior infiltração de água no período chuvoso, o que abastece o escoamento de base no período seco. Então, o efeito do incremento florestal pode estar conduzindo a um aumento no escoamento de base, e consequentemente do BFI da microbacia para o período sazonal seco.

Para auxiliar a compreensão dos fatores que influenciam o BFI da região nos anos avaliados neste estudo, foram desenvolvidas regressões simples entre o BFI e os valores da categoria do uso do solo “Vegetação” e “Floresta”, e entre o BFI e os valores de Precipitação anual e o BFI, para os períodos anuais e sazonais (Figura 17).

Figura 17. Valores de BFI anual e sazonal em relação a precipitação, e aos incrementos das categorias de cobertura do solo “Vegetação” e “Floresta”. A relações em que estão indicadas as equações apresentaram relações significativas para um valor $p < 0,05$.

Em relação a precipitação, foram verificados ajustes significativos lineares (negativos) para os períodos anual ($R^2 = 0,7200$) e sazonal chuvoso ($R^2 = 0,6500$), e ajuste quadrático (de positivo para negativo) não significativo para o período sazonal seco ($R^2 = 0,4100$).

Em relação aos períodos anual e sazonal chuvoso, resultados semelhantes foram encontrados por Brogna (2017). Esse efeito negativo promovido pela precipitação é explicado pelo aumento do deflúvio em decorrência de aumento da precipitação. Como mencionado anteriormente, o componente do deflúvio mais sensível às variações da precipitação é o escoamento direto. Nesse caso, o aumento do deflúvio ocorre em razão do aumento do escoamento direto, que em

consequência diminui a proporção do deflúvio que é referente ao escoamento de base, reduzindo o BFI.

Essa hipótese é sustentada pela resposta demonstrada no período seco, onde em um primeiro momento, ocorre o abastecimento do escoamento de base, e a partir de determinados valores de precipitação se inicia a produção de escoamento superficial. Essa capacidade de infiltração, é dependente de vários fatores, entre os quais: a quantidade e intensidade de precipitação, propriedades físico-hídricas do solo, disponibilidade de armazenamento e o tipo de vegetação do local (SOPHOCLEUS, 2002; IDOWU, 2003).

Para as categorias “Vegetação” e “Floresta”, foram indicados ajustes quadráticos (de positivo para negativo) nos períodos anual ($R^2 = 0,44$ e $0,16$, respectivamente) e sazonal chuvoso ($R^2 = 0,22$ e $0,08$, respectivamente), e lineares (positivos) no período sazonal seco ($R^2 = 0,14$ e $0,05$, respectivamente).

Como mencionado anteriormente, os comportamentos quadráticos para o período anual e sazonal chuvoso podem estar relacionados com o equilíbrio entre os efeitos positivos causados pela melhoria das propriedades físicas do solo e o aumento da Evpt% (CALDER, 2002), provocado pelo incremento percentual das categorias “Vegetação” (entre 20,3 e 21,9%) e “Floresta” (8,8 e 9,2%), que reduzem o BFI, visto à alta demanda evapotranspiratória da cobertura florestal (PRICE, 2011).

Ainda sobre os fatores que poderiam ser associados a resposta do BFI da região, ao longo dos anos avaliados, foi encontrado um ajuste significativo linear múltiplo ($R^2 = 0,836$, $p = 0,02686$, erro = $\pm 5,8744$ %), para a variação os valores de precipitação, e da categoria “Floresta”, a resposta do BFI no período sazonal chuvoso. Resultados similares foram encontrados por Brogna (2017), em um estudo sobre a influência da cobertura florestal nos serviços hidrológicos em *Wallonia* (Bélgica). Assim, por intermédio da equação (8) é possível obter uma estimativa dos valores do BFI no período sazonal chuvoso para o Ribeirão das Posses. É importante ressaltar que, a viabilidade do modelo está condicionada a variação da categoria “Floresta” e precipitação no período sazonal chuvoso apresentadas anteriormente.

$$\text{BFI} = -800.061 * \text{"Floresta"} - 0.051196 * \text{Precipitação} + 171.93742 \quad (8)$$

Em que:

BFI – %;

“Floresta” – %; e

Precipitação no período chuvoso – mm.

5.3.2. Avaliação dos indicadores de proteção

5.3.2.1. Coeficiente de escoamento direto

Os valores de escoamento direto e precipitação, assim como a resposta do coeficiente de escoamento direto (Ca) obtidos nos períodos anual e sazonal do intervalo entre 2009 e 2015, estão apresentados na Tabela 9 e na Figura 18.

Tabela 9. Valores médios, máximos, mínimos e coeficiente de variação (CV) anual e sazonal do coeficiente de escoamento direto.

	Ca anual (%)	Ca seco (%)	Ca chuvoso (%)
Média	14	13	14
Maior	20	25	23
Menor	4	4	4
CV %	40.6%	58.9%	43.7%

Os resultados obtidos apontam valores médios de Ca similares entre os períodos anual e sazonal. Os maiores valores médios de Ca, observados na série de dados histórica avaliada, foram encontrados nos períodos anual e sazonal chuvoso, 14%. Os coeficientes de variação encontrados, foram classificados como muito altos para os períodos anual e sazonal.

Em relação à amplitude de variação, foram encontrados menores valores nos períodos anual (16%) e sazonal chuvoso (19%), ambos referentes à diferença entre os anos de 2009 e 2014. Essas amplitudes de variação correspondem aos valores de escoamento direto, 408 e 50 mm, e precipitação, 2045 e 1163 mm, no período anual; e valores de escoamento direto, 370 e 36 mm, e precipitação, 1598 e 830 mm, no período sazonal chuvoso. No período sazonal seco, a amplitude de variação é de 21%, com valores de escoamento direto, 110 e 13 mm, e precipitação, 511 e 333 mm, valores correspondentes à diferença entre os anos de 2012 e 2014, respectivamente.

A literatura indica diferentes valores de coeficiente de escoamento direto para os estudos realizados em áreas de florestas nativas, restauração florestal e outras coberturas do solo.

Salemi et al. (2013) observaram valores médios de Ca iguais a 10%, com uma amplitude de variação de 2%, em áreas de vegetação nativa (11,5 ha), e valores médios e amplitude de variação de Ca iguais a 18%, analisando dois anos hidrológicos sequenciais, para um intervalo de variação de precipitação entre 1717 e 3003 mm, na área de vegetação nativa, e 1430 e 2120 mm, na área de pastagem, no bioma Mata Atlântica.

Por sua vez, utilizando os valores de precipitação e escoamento direto, referentes aos 5 primeiros anos hidrológicos em área de restauração (72 ha), observados por Vazquez (2019), foram

obtidos os dados do coeficiente de escoamento direto. Os valores calculados indicaram um Ca médio de 2,4%, com uma amplitude de variação de 2,4%. Segundo a autora, os baixos valores de escoamento direto encontrados podem estar relacionados com a presença de floresta nativa preservada (42%), ou seja, sem ser submetida a nenhum manejo florestal durante muitos anos.

Na Figura 18, observa-se que os valores de Ca obtidos, entre os anos de 2009 e 2015, para a microbacia do Ribeirão das Posses, indicaram respostas semelhantes: ajustes lineares, para os períodos anual ($R^2 = 0,4960$) e sazonal chuvoso ($R^2 = 0,6390$), e um ajuste quadrático para período sazonal seco. Foram realizados os testes de Mann Kendall e Pettit, que não identificaram variações de tendências significativas nas séries de dados de Ca calculadas neste estudo.

Para a compreensão das repostas dos valores de Ca da região, no período de estudo, devem ser consideradas as relações de precipitação, Evpt%, RH e BFI mencionadas anteriormente.

As repostas dos valores de Ca para os períodos anual e sazonal chuvoso são semelhantes, e acredita-se que em um primeiro momento, estão relacionadas com a tendência de diminuição nos valores de precipitação. Apenas a tendência de diminuição dos valores de precipitação já seria suficiente para justificar as respostas lineares negativas apresentadas pelos valores de Ca, nos anos analisados.

Ainda assim, em um estudo desenvolvido por Ogden et al. (2013), a presença de floresta secundária em estágio adulto foi vinculada à diminuição de escoamento direto (50%) em comparação com as bacias de pastagem e outros usos do solo. Ademais, vale destacar que a infiltração de água no solo pode aumentar com a idade da floresta (BIRKEL et al., 2012; LEITE et al., 2018). Este fato pode contribuir para justificar a tendência de diminuição dos valores de Ca apresentados.

O aumento do BFI, e a diminuição do Ca, mesmo na situação de aumento de RH, apresentada anteriormente, indicam um aumento do escoamento de base em relação ao escoamento direto, ou seja, a maior parte da água que entra no sistema, em forma de precipitação, tende a infiltrar devido as melhorias das condições de infiltração, ocasionadas pelo incremento da categoria “Vegetação” e posteriormente da categoria “Floresta”, o que diminui os valores de Ca.

Além disso, a diminuição de RH, em consequência do aumento de Evpt%, provocado pelo incremento da cobertura florestal, é mais um fator que pode justificar a manutenção da tendência de diminuição dos valores de Ca para os períodos anual e sazonal, nos anos avaliados.

Figura 18. Variação dos valores de escoamento direto (Qd) e do coeficiente de escoamento superficial (Ca) em relação ao deflúvio, e respostas do BFI anual e sazonal.

As repostas dos valores de Ca para o período sazonal seco podem ser avaliadas em dois momentos distintos. Como mencionado anteriormente, os menores valores de precipitação, característicos do período, induzem ao aumento da sensibilidade hidrológica, tornando assim as regiões mais dependentes de outros fatores que podem influenciar o regime hídrico (LI, 2016). Possivelmente, a tendência de estabilidade dos valores de precipitação, indicadas para o período, permite a maior influência dos valores de Evpt%, na resposta Ca. Inicialmente, a diminuição de Evpt% proporciona um aumento nos valores de RH, e consequentemente, BFI e Ca. Posteriormente, as possíveis melhorias nas condições de infiltração do solo pressupostas anteriormente, e a tendência de aumento de Evpt%, ocasionadas pelo incremento percentual da categoria “Floresta”, provocam a diminuição dos valores de RH, e por consequência de Ca. Vale destacar, a boa potencialidade de

recarga da região, influenciada pelos atributos de solos e topográficos, citada por Lima et al. (2013), que contribuem para o aumento do escoamento de base.

Com o objetivo de auxiliar à compreensão dos fatores e seus possíveis efeitos sobre o Ca da microbacia entre 2009 e 2015, foram desenvolvidas regressões simples entre as categorias “Vegetação” e “Floresta”, os valores de precipitação e os valores de Ca para os períodos anual e sazonal (Figura 19).

Para as categorias “Vegetação” e “Floresta”, foram indicados ajustes lineares (negativos), nos períodos anual ($R^2 = 0,48$ e $R^2 = 0,34$ respectivamente) e sazonal chuvoso ($R^2 = 0,60$ e $R^2 = 0,44$ respectivamente), significativos apenas para a relação “Vegetação” e Ca, no período sazonal chuvoso. O período sazonal seco foi caracterizado por ajustes quadráticos (de negativo para positivo), não significativos, para ambas as categorias ($R^2 = 0,54$, “Vegetação”; e $R^2 = 0,25$, “Floresta”).

As repostas obtidas para as relações entre as categorias “Vegetação” e “Floresta” para os períodos anual e sazonal chuvoso, sustentam os cenários apresentados como justificativas para a variação nas respostas de Ca, mencionados anteriormente, e estão em linha com outros estudos, como o de Cardoso et al. (2006), que indicam possíveis reduções dos valores de escoamento direto, em ocorrência do incremento de vegetações naturais e florestais, justificando assim a diminuição dos valores de Ca. Segundo os autores, a manutenção da cobertura vegetal promove uma maior lentidão da movimentação de água, diminuindo o escoamento superficial e aumentando a retenção de água no solo.

No período seco, a tendência inicial de variação positiva nos valores de Ca, em decorrência do aumento das categorias “Vegetação” e “Floresta”, indicada na Figura 18, pode ter como causa principal, as características específicas da região, apresentadas anteriormente, que provocam a diminuição da Evpt%, e o aumento do RH, ocasionando assim o aumento de Ca.

Em relação à precipitação, foram obtidos ajustes não significativos; lineares (positivos), para os períodos anual ($R^2 = 0,25$) e sazonal chuvoso ($R^2 = 0,53$), e quadrático (de negativo para positivo) para o período sazonal seco ($R^2 = 0,53$).

As repostas observadas para os valores de Ca, em relação ao aumento dos valores de precipitação, nos períodos anual e sazonal chuvoso, podem ser justificadas pelo aumento dos valores de deflúvio. Esse efeito pode estar relacionado com os valores de taxa de infiltração do solo, maiores em áreas com cobertura florestal. Devido à maior umidade do solo no período chuvoso, uma menor quantidade de água, disponibilizada pela precipitação, tende a infiltrar, facilitando a produção de escoamento superficial. O período seco experimenta menores valores de umidade, possibilitando a infiltração de água (Salemi et al., 2013).

Figura 19. Valores do coeficiente de escoamento superficial (Ca) anual e sazonal em relação a precipitação e aos incrementos das categorias de cobertura do solo “Vegetação” e “Floresta”. As relações em que estão indicadas as equações, apresentaram relações significativas para um valor $p < 0,05$.

Esse efeito pode ser observado na relação entre os valores de precipitação e Ca obtidos para o período sazonal seco. Possivelmente, os menores valores de umidade do solo na região no período seco, contribuem para a infiltração de água (tendência de redução nos valores de Ca), recarregando o escoamento de base (tendência de aumento dos valores de escoamento de base, Figura 17). Com o aumento da umidade do solo, e consequentemente a diminuição dos valores de taxa de infiltração, o aumento dos valores de precipitação provoca a produção de escoamento superficial, e assim o aumento dos valores de Ca.

5.3.2.2. Flashiness

Os valores do índice flashiness (F), assim como suas tendências de resposta para os períodos anual e sazonal, do intervalo entre 2009 e 2015, podem ser observados na Tabela 10 e na Figura 20.

Tabela 10. Valores médios, máximos, mínimos e coeficiente de variação (CV) anual e sazonal do Flashiness.

	F_{anual} (%)	F_{seco} (%)	F_{chuvoso} (%)
Média	47	27	55
Maior	78	47	85
Menor	28	11	34
CV %	34,2%	55,4%	28,1%

Os resultados obtidos de F indicam valores médios similares entre os períodos anual e sazonal chuvoso. O maior valor médio de F, encontrado na série histórica analisado, é referente ao período sazonal chuvoso. Os coeficientes de variação foram classificados como alto, para o período sazonal chuvoso, e muito altos, para os períodos anual e sazonal seco.

Com relação a amplitude de variação dos valores de F, foram encontrados resultados similares para os períodos anual (50%) e sazonal chuvoso (51%), ambos relativos à diferença entre os anos de 2009 e 2014. Essas amplitudes de variação foram observadas nas condições de escoamento direto, de 408 e 50 mm, e escoamento de base, 169 e 93 mm, para o período anual; e escoamento direto, 370 e 36 mm, e escoamento de base, 108 e 52, para o período sazonal chuvoso. Em relação ao período sazonal seco, foi obtida uma amplitude de variação de F, igual a 36%, referente a diferença entre os anos de 2009 e 2010.

Sobre as características específicas dos anos de 2009 e 2014, vale destacar que, o valor médio de precipitação no período anual observado no ano de 2009, foi 38% maior que o valor de precipitação anual média da região, e que, o valor de precipitação observado para o período chuvoso do ano de 2014, foi 30% menor que a média obtida para o período no intervalo dos anos avaliados neste estudo. Assim, acredita-se que esses fatos também tenham influenciado a tendência dos valores de F encontrados neste estudo.

A literatura indica diferentes valores de flashiness encontrados para os estudos realizados em áreas com percentuais diferentes de cobertura florestal nativa. Cassiano (2017), avaliando comparativamente três anos hidrológicos de três microbacias localizadas em áreas de transição entre Mata Atlântica e Cerrado, encontrou maiores valores anuais médios de flashiness (40%) para a microbacia caracterizada por um maior percentual de florestas plantadas (80,2%), em relação as florestas nativas (12,5%). Chiles (2019), avaliando 11 anos hidrológicos referentes a duas microbacias

localizadas no domínio Mata Atlântica, observou maiores valores de flashiness (22%) para microbacia composta por 82,6% de florestas plantadas e 15% por florestas nativas.

De acordo com Baker (2004), diversos fatores contribuem para a variação das respostas do flashiness, entre os quais: presença de barragens, condições topográficas, tipos de solo e área da bacia. Considerando os efeitos da área da bacia na magnitude do índice, o autor propôs diferentes intervalos de classificação para os valores de flashiness, variando de estável (<45%), a instáveis (>75)%, conforme o tamanho da bacia. Assim, foi possível classificar os valores de F anual encontrados neste estudo, em instável para o ano de 2009, transição ($45\% < F < 75\%$) para os anos de 2012 e 2013, e estáveis para os anos de 2010, 2011, 2014 e 2015.

As tendências de respostas dos para os valores de F (Figura 20), obtidas entre os anos de 2009 e 2015, para a microbacia do Ribeirão das Posses, foram semelhantes: ajustes quadráticos, nos períodos anual ($R^2 = 0,54$) e sazonal chuvoso ($R^2 = 0,50$), e linear para o período seco ($R^2 = 0,0562$). Foram realizados os testes de Mann Kendall e Pettit, que não identificaram variações de tendências significativas nas séries de dados de F desenvolvidas neste estudo.

Para a compreensão dos fatores que podem ter influenciado na tendência de resposta de F, foram desenvolvidas regressões simples entre as categorias “Vegetação” e “Floresta”, e os valores de precipitação versus os valores de F para os períodos anual e sazonal (Figura 21).

Em relação as categorias “Vegetação” e “Floresta”, foram obtidos ajustes lineares, não significativos, com maior valor de $R^2 = 0,35$, para a categoria “Vegetação” no período anual. Sobre os valores de Precipitação, foram encontrados ajustes lineares (positivos), para os períodos anual e sazonal, sendo significativos para o período anual ($R^2 = 0,55$). Ou seja, no período anual, o aumento nos valores de precipitação ocasiona o aumento dos valores da resposta de F, resultados esses que também foram encontrados por Baker et al. (2004).

Além disso, segundo o autor, o flashiness é negativamente correlacionado com o escoamento de base; esse efeito pode ser verificado pela tendência de resposta apresentada pelo BFI neste estudo (Figura 16).

Figura 20. Variação dos valores de escoamento de base e escoamento direto, e respostas do índice flashiness anual e sazonal

A composição do deflúvio (escoamento de base + escoamento direto) é um produto da integração de fatores como o clima, a geologia, os tipos e as coberturas de solo (PRICE & LEIGH, 2006). A cobertura florestal possibilita o aumento das taxas de infiltração do solo, diminuindo assim a ocorrência com que eventos de precipitação produzam fluxo terrestre (EISENBIES et al., 2007). Com isso, a maior quantidade da água de eventos de precipitação, é conduzida por fluxos subterrâneos (escoamento de base), que é mais lento que o fluxo terrestre (escoamento direto), provocando o aumento do escoamento de base (Qb) e a diminuição do escoamento direto (Qd), justificando a diminuição dos valores de F para os anos avaliados neste estudo (SUN et al., 2006).

Figura 21. Valores do índice Flashiness (F) anual e sazonal em relação a precipitação e aos incrementos das categorias de cobertura do solo “Vegetação” e “Floresta”. As relações em que estão indicadas as equações, apresentaram relações significativas para um valor $p < 0,05$.

6. CONCLUSÃO

A avaliação da série de dados hidrológicos e da cobertura do solo da bacia do Ribeirão das Posses, entre os anos de 2009 e 2015, possibilitou a verificação de tendências de alterações na provisão dos serviços hidrológicos de disponibilidade hídrica e de proteção da região, quais sejam:

- a) A mudança do uso do solo na região contribui para a tendência de redução da quantidade de água total produzida pela microbacia (Rendimento hídrico), confirmada no período sazonal chuvoso, e o potencial aumento da estabilidade da água produzida, principalmente nos períodos de estiagem (Índice de escoamento de base).
- b) Houve tendência de redução do fluxo escoamento terrestre, reduzindo a possibilidade de danos ambientais (Coeficiente de escoamento direto), e para a tendência de redução da velocidade de resposta hidrológica da bacia (Flashiness), diminuindo o risco de enchentes.
- c) A tendência de redução dos valores de precipitação anual e sazonal, apresentada nos anos avaliados neste estudo, provocou efeitos sobre a resposta dos indicadores de serviços hidrológicos da região.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual operativo do Programa Produtor de Água. Brasília, 2008. 60 p.
- AMAZONAS, M. de C. Valor e meio ambiente: Elementos para uma Abordagem Evolucionista. Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- ANA. Nota informativa - Programa Produtor de Água <https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sip/produtor-de-agua/documentos-relacionados/1-nota-informativa-programa-produtor-de-agua.pdf> Brasília, agosto de 2018.
- ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, v. 291, p. 1–27, 2004.
- ANDRÉASSIAN, V., 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientificdebate. *J. Hydrol.* 291, 1–27,.
- AZEVEDO, THIAGO SALOMÃO DE. Legislação e geotecnologias na definição das áreas de preservação permanente e das reservas legais: Aplicação à Bacia do Córrego das Posses, Município de Extrema-MG. 2008.
- BAKER, D. B.; RICHARDS, R. P.; LOFTUS, T. T.; KRAMER, J. W. A new flashiness index: Characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 40, n. 2, p. 503–522, 2004.
- BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) *Matas ciliares: conservação e recuperação*. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- BATES, B.C.; KUNDZEWICZ, Z.W.; WU, S.; PALUTIKOF, J.P. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 2008. 210p.
- BICUDO, C.E.M.; TUNDISI, J.G.; SCHEUENSTUHL, M.C.B., orgs.B 583 a *Águas do Brasil: análises estratégicas* / Carlos E.de M. Bicudo; José G. Tundisi; Marcos C. Barnsley Scheuenstuhl – São Paulo, Instituto de Botânica, p. 224, 2010.
- BIRKEL, C., SOULSBY, C., TETZLAFF, D., 2012a. Modelling the impacts of land-cover change on streamflow dynamics of a tropical rainforest headwater catchment. *Hydrol. Sci. Journal- Journal Des Sci. Hydrol.* 57, 1543–1561.
- BIRKEL, C., SOULSBY, C., TETZLAFF, D., 2012b. Modelling the impacts of land-cover change on streamflow dynamics of a tropical rainforest headwater catchment. *Hydrol. Sci. J.* 57, 1543– 1561.

- BOGGS, J.; SUN, G.; JONES, D.; MCNULTY, S. G. Effect of Soils on Water Quantity and Quality in Piedmont Forested Headwater Watersheds of North Carolina 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 49, n. 1, p. 132-150, 2013. <https://doi.org/10.1111/jawr.12001>
- BOGGS, J.; SUN, G.; MCNULTY, S. "Effects of timber harvest on water quantity and quality in small watersheds in the Piedmont of North Carolina." Journal of Forestry, v. 114, n. 1, p. 27-40, 2015.
- BONELL, M., PURANDARA, B.K., VENKATESH, B., KRISHNASWAMY, J., ACHARYA, H.A.K., SINGH, U. V., JAYAKUMAR, R., CHAPPELL, N., 2010. The impact of forest use and reforestation on soil hydraulic conductivity in the Western Ghats of India: Implications for surface and sub-surface hydrology. J. Hydrol. 391, 47–62.
- BORN, R.H.; TALOCCHI, S. Proteção do capital social e ecológico por meio de Compensações por Serviços Ambientais (CSA). São Paulo: Petrópolis; São Lourenço da Serra: Vitae Civilis, 2002. 150 p.
- Bosch, J. M. M., & Hewlett, J. D. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Journal of Hydrology, 55(1–4), 3–23.
- BRAUMAN, K. A.; DAILY, G. C.; DUARTE, T. K.; MOONEY, H. A. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. Annual Review of Environment and Resources, v. 32, p. 67-98, 2007.
- BROGNA, D.; VINCKE, C.; BROSTAUX, Y.; SOYEURT, H.; DUFRÊNE, M.; DENDONCKER, N. How does forest cover impact water flows and ecosystem services? Insights from “real-life” catchments in Wallonia (Belgium). Ecological indicators, v. 72, p. 675-685, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.011>
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. Journal of Hydrology, 310, 28–61.
- BROWN, A. E.; ZHANG, L.; MCMAHON, T. A.; WESTERN, A. W.; VERTESSY, R. A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. Journal of Hydrology, v. 310, p. 28–61, 2005.
- BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 104, n. 1, p. 185-228, 2004.
- BRUIJNZEEL, L.A., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agric. Ecosyst. Environ. 104, 185–228.
- CALDER, I.R., 2002. Forests and hydrological services: reconciling public and science perceptions. Land Use Water Resour. Res. 2, 1–12.
- CALDER, I.R., 2007. Forests and water-Ensuring forest benefits outweigh water costs. For. Ecol.Manage. 251, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.015>.

- CALIJURI, M. C.; BUBEL, A. P. M. Conceituação de Microbacias. In: LIMA, W de P.; ZAKIA, M.J.B. (Orgs.) As florestas plantadas e a água. Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. São Carlos: Ed. RiMA, 2006. 226p.
- CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; MARTINS, S. V.; SOARES, C. P. B. Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 249-256, mar. 2006.
- CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; MARTINS, S. V.; SOARES, C. P. B. Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 249-256, mar. 2006.
- CASSIANO, C. C. (2017). Efeitos hidrológicos da composição da paisagem em microbacias com florestas plantadas de *Eucalyptus*.
- CASSIANO, C. C. Efeitos hidrológicos da composição da paisagem em microbacias com florestas plantadas de *Eucalyptus*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2017.
- CHILES, C. R. (2019). Geração de escoamento direto em microbacias hidrográficas com coberturas florestais na região subtropical. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. doi:10.11606/D.11.2019.tde-07052019-182123. Recuperado em 2019-12-12, de www.teses.usp.br
- CIRILO, J. A. Crise hídrica: Desafios e superação. *Revista USP*, Brasil, n. 106, p.45-58, sep. 2015. ISSN 2316-9036. Disponível em: <<http://www.revista.usp.br/revusp/article/view/110102/108685>>. Acesso em : 27 jan. 2018.
- DUKU, C.; RATHJENS, H.; ZWART, S. J.; HEIN, L. Towards ecosystem accounting: a comprehensive approach to modelling multiple hydrological ecosystem services. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, v. 12, n. 3, 2015.
- EISENBIEN, M.H., AUST, W.M., BURGER, J.A., ADAMS, M.B. 2007. Forest operations, extreme flooding events, and considerations for modeling in the Appalachians—a review. *Forest Ecology and Management* 424: 77–98.
- ELLISON, D., FUTTER, M.N., BISHOP, K., 2012. On the forest cover–water yield debate:from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biol.* 18, 806–820.
- EUCLYDES, H.P.; FERREIRA, P.A.; FARIA FILHO, R.F.; SANTOS, A.P. Regionalização hidrológica na região hidrográfica Capixaba compreendida entre os limites da bacia do rio Doce e do rio Itabapoana. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste- Cuiabá - MT:2007a.
- FARLEY, K. A., JOBBÁGY, E. G., JACKSON, R. B. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, v. 11, n. 10, p. 1565-1576, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01011.x>
- FAUSTINO, J. Planificación y gestión de manejo de cuencas. Turrialba: CATIE, 1996. 90p

- FIDALGO, E. C. C.; PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; SCHULER, A. E. Manual para Pagamento por Serviços Ambientais Hídricos. Técnicas. Brasília-DF. 2017. 84p.
- FILOSO, S.; BEZERRA, M. O.; WEIS, K. C. B. PALMER, M. A. Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. Plos One, v. 12, n. 8, e0183210, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183210>
- FUNDAÇÃO AGÊNCIA DAS BACIAS PCJPLANO MUNICIPAL DE RECURSOS HÍDRICOS EXTREMA / MG 2013 – 2020.
- GARCIA, J.I.B. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela. 2005. 164p. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Rio grande do Sul, 2005.
- GARCIA, L. G. Composição e configuração da cobertura florestal na bacia hidrográfica e seus efeitos nos serviços hidrológicos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2018.
- GERMER, SONJA ET AL. Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: undisturbed forest to pasture. Journal of hydrology, v. 380, n. 3-4, p. 473-480, 2010 .
- GONÇALVES, C. S. A disposição a pagar pela água como fundamento para investimento na proteção e recuperação de unidades de conservação: o caso do Parque Estadual da Pedra Branca no Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. UFF, 2003.
- GONÇALVES, H. Pagamentos por serviços ambientais segundo a ótica da comunidade envolvida – o caso do projeto “Conservador das Águas”, Extrema/MG, 2013. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013.
- GONZALEZ, A. M. G. O. Modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. 2010. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.
- HADDADIN, M. J. Water: triggering cooperation between former enemies. Water International, v. 36, n. 2, p. 178-185, 2011. doi
- HASCIC, I.; WU, J. Land use and watershed health in the United States. Land Economics. Vol. 82, n. 2, pp. 214-239, 2006.
- HONDA, E. A.; DURIGAN, G. A restauração de ecossistemas e a produção de água. Hoehnea, v. 44, n. 3, p. 315-327, 2017.
- HUFF, D.D., HARGROVE, B., THARP, M.L., GRAHAM, R., 2000. Managing Forests for Water Yield: The Importance of Scale. J. For. 98, 15–19.
- HUNTINGTON, K. W.; WERNICKE, B. P.; EILER, J. M. Influence of climate change and uplift on Colorado Plateau paleotemperatures from carbonate clumped isotope thermometry. Tectonics, v. 29, n. 3, p. 1-19, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009TC002449>

- IDOWU, O. A. (2003). Hydrological processes of interaction between surface water and groundwater- a review Towards developing a comprehensive Water Security Policy and Strategies in Nigeria View project. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/267686780>
- JACKSON, R. B.; JOBBÁGY, E. G.; AVISSAR, R.; ROY, S. B.; BARRETT, D. J.; COOK, C. W.; MURRAY, B. C. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* (New York, N.Y.), v. 310, n. 5756, p. 1944-1947, 2005.
- JORDAN, P.; MENARY, W.; DALY, K.; KIELY, G.; MORGAN, G.; BYRNE, P.; MOLES, R. Patterns and processes of phosphorus transfer from Irish grassland soils to rivers - Integration of laboratory and catchment studies. *Journal of Hydrology*, v. 304, n. 1-4, p. 20-34, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.021>
- KFOURI, A.; FAVERO, F. Projeto Conservador das Águas Passo a Passo. Brasília: The Nature Conservancy do Brasil, 2011.
- KFOURI, A.; FAVERO, F.: Projeto Conservador das Águas: Passo a Passo, vol. iv, The Nature Conservancy TNC, Brasília - DF, série Água , 2011.
- Lei nº 2.100 De 21 de dezembro de 2005. "Cria o Projeto Conservador das Águas, autoriza o executivo a prestar apoio financeiro aos proprietários rurais e dá outras providências." Prefeitura Municipal de Extrema.
- LEITE, P. A. M., SOUZA, E. S. DE, SANTOS, E. S. DOS, GOMES, R. J., CANTALICE, J. R., & WILCOX, B. P. (2018). The influence of forest regrowth on soil hydraulic properties and erosion in a semiarid region of Brazil. *Ecohydrology*, 11(3), e1910.
- Li, Q., Wei, X., Zhang, M., Liu, W., Fan, H., Zhou, G., ... & Wang, Y. (2017). Forest cover change and water yield in large forested watersheds: A global synthetic assessment. *Ecohydrology*, 10(4), e1838.
- LIMA, G. C. Avaliação de atributos indicadores da qualidade do solo em relação à recarga de água na sub-bacia das Posses, Extrema (MG), Lavras: UFLA, 2010. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, 2010.
- LIMA, G. C. Avaliação de atributos indicadores da qualidade do solo em relação à recarga de água na sub-bacia das Posses, Extrema (MG). 2010. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- LIMA, GABRIELA CAMARGOS et al. Estimativa do potencial de recarga na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG), em função dos atributos fisiográficos, pedológicos e topográficos. *Geosciences= Geociências*, v. 32, n. 1, p. 51-62, 2013.
- LIMA, W. P. Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas. 2ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. 245 p.

- LIMA, W. P.; ZÁKIA, M. J. B. Indicadores hidrológicos em áreas florestais. *Série Técnica IPEF*, v.12, n.31, 1998. p.53-64.
- LYNE, V.; HOLLICK, M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. In: *Institute of Engineers Australia National Conference*. Canberra: Institute of Engineers Australia, 1979. p. 89–92.
- MALMER, A., MURDIYARSO, D., (SAMPURNO) BRUIJNZEEL, L.A., ILSTEDT, U., 2010. Carbon sequestration in tropical forests and water: a critical look at the basis for commonly used generalizations. *Glob. Change Biol.* 16, 599–604. doi:http://dx. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01984.x.
- MAPBIOMAS, 2018 "Projeto MapBiomas – Coleção 4 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, acessado em [23/11/2018] através do link: [http://mapbiomas.org/]"
- MENDONÇA, M. C. S.; SENA, I. M. N.; SANTOS, M. R. A. Comparação dos métodos da média aritmética e de Thiessen para a determinação da pluviosidade média da sub-bacia do Rio Siriri. In: *II Congresso Internacional RESAG Gestão da água e monitoramento ambiental*, 2015.
- OGDEN, F. L., CROUCH, T. D., STALLARD, R. F., & HALL, J. S. (2013). Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. *Water Resources Research*, 49(12), 8443– 8462.
- OLIVEIRA, R. E.; SOUZA, A. M.; MEIRE, M. L. R.; RODRIGUES, C. L. Aspectos da recuperação e uso de florestas em propriedades e paisagens rurais no Estado de São Paulo, In: *SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. Fundação para Conservação e Produção Florestal do Estado de São Paulo. Recuperação florestal: Um olhar social*. São Paulo, p. 45-78, 2008.
- PAGIOLA, S.; PLATAIS. G. "Implementing Systems of Payments for Environmental Services: Initial Lessons of Experience." Trabajo presentado en el Workshop on Ecosystem Services in the Tropics: Challenges to Marketing Forest Function, Spring. Meeting of the International Society of Tropical Foresters, Yale University, p. 5–6, 2003.
- PIMENTEL GOMES, F. *Curso de Estatística Experimental*. São Paulo: Nobel, 1985. 467 p.
- PRICE K, LEIGH D. 2006. Morphological and sedimentological responses of streams to human impact in the southern Blue Ridge Mountains, USA. *Geomorphology* 78: 142–160.
- PRICE, K., 2011. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review. *Prog. Phys. Geogr.* 35,465–492, <http://dx.doi.org/10.1177/0309133311402714>.
- R. STERLING, H. ADMIRAAL, N. BOBYLEV, H. PARKER, J.P. GODARD, I. VÄHÄÄHO, C.D. ROGERS, X. SHI, T. HANAMURA Sustainability issues for underground space in urban areas vProc. ICE-Urban Des. Plan., 165 (2012), pp. 241-254.

- REIS, L. C. Avaliação hidrobiogeoquímica na bacia do Ribeirão das Posses no âmbito do programa Conservador das Águas, Extrema, MG. 2017. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.
- REIS, L. V. S. Cobertura florestal e custo do tratamento de águas em bacias hidrográficas de abastecimento público: caso do manancial do município de Piracicaba. 2004. 215 p. Tese Doutorado— Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2004.
- RODRIGUES, C. B. Efeitos do manejo de florestas plantadas de Eucalyptus sobre os recursos hídricos superficiais na escala de microbacias hidrográficas. 2017. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.
- RODRIGUES, C. B. Efeitos do manejo de florestas plantadas de Eucalyptus sobre os recursos hídricos superficiais na escala de microbacias hidrográficas. 2017. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.
- RODRIGUES, MARJORIE DELGADO ALVES et al. Decision-making and motivation to conserve ecosystems= the " Water Conservation" Project case study= Tomada de decisão e motivação para conservação de ecossistemas: estudo de caso do " Conservador das Águas". 2016.
- SALEMI, L. F., GROPPPO, J. D., TREVISAN, R., MORAES, J. M. DE, FERRAZ, S. F. DE B., VILLANI, J. P., et al. (2013). Land-use change in the Atlantic rainforest region: consequences for the hydrology of small catchments. *Journal of Hydrology*, 499,
- SALEMI, LUIZ FELIPPE et al. Land-use change in the Atlantic rainforest region: Consequences for the hydrology of small catchments. *Journal of Hydrology*, v. 499, p. 100-109, 2013.
- SANTOS, C. P. Indicadores de qualidade de água em sistema de pagamentos por serviços ambientais. Estudo de caso: Extrema – MG. 2014. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2014.
- SANTOS, D. G. dos. Programa Produtor de Água. In: O Pagamento por Serviços Ambientais: o mercado de carbono promove a inclusão social / Markus Brose (organizador). Ed. Da UCG, Goiânia, 2009. 358p.
- SANTOS, P., B. BRITO, F. MASCHIETTO, G. OSÓRIO, M. MONZONI. 2012. Marco regulatório sobre pagamento por SA no Brasil. IMAZON/FGV, Belém.
- SEEHUSEN, S. E.; PREM, I. Porque pagamento por serviços ambientais? In: Pagamentos por serviços ambientais na Mata Atlântica: Lições apreendidas e desafios. Brasília: MMA, p. 15-53, 2011.
- SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, v. 240, p. 147–186, 2001.
- SOPHOCLEOUS, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 52–67. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>
- SORIANO, É. LONDE, L. D. R.; DI GREGORIO, L. T.; COUTINHO, M. P.; SANTOS, L. B. L. Crise hídrica em São Paulo sob o ponto de vista dos desastres. *Ambiente & Sociedade*, v. 19, n. 1, p. 21-42, 2016.

- STONESTROM, D. A.; SCANLON, B. R.; ZHANG, L. Introduction to special section on impacts of land use change on water resources: *Water Resources Research*, v. 45, 2009.
- SUN G, VOSE JM, AMATYA DM, MCNULTY SG. 2006a. Dynamics of the variable source areas in two contrasting headwater forested watersheds and their implications to forest buffer designs in the Southeastern US. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*
- Sun G, Zhou G, Zhang Z, Wei X, McNulty SG, Vose JM. 2006b. Potential Water Yield Reduction due to Reforestation across China. *Journal of Hydrology* 328: 548–558.
- TRANCOSO, R. (2006), Mudanças na cobertura da terra e alterações na resposta hidrológica de bacias hidrográficas da Amazônia, Masters thesis, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e aplicação*. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2000, 943p.
- TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas*. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.
- ULIANA, E. M.; REIS, E. F.; SILVA, J. G. F.; XAVIER, A. C. Precipitação Mensal e Anual Provável para o Estado do Espírito Santo. *Irriga, Botucatu*, v. 18, n. 1, p. 139-147, 2013. <http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/493/344>
- UN-WATER. The United Nations World Water Development Report 2018: nature-based solutions for water. United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). Paris, UNESCO, 2018.
- VÁSQUEZ VÁSQUEZ, KATHERINE; FERRAZ, SÍLVIO FROSINI DE BARROS. *Hidrologia de microbacias em função da dinâmica da cobertura florestal*. 2019. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.
- VASQUÉZ, K. V. *Hidrologia de microbacias em função da dinâmica da cobertura florestal*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2019.
- VEIGA NETO, F. C. DA. *A construção dos mercados de serviços ambientais e suas implicações para o desenvolvimento sustentável no Brasil*. Tese de Doutorado, UFRRJ, 2008.
- VON SPERLING, M. Estudo e modelagem da qualidade da água de rios. *Série: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, Editora UFMG. v.7, n.2, p. 64-71, 2014.
- VOSE, J. M.; SUN, G.; FORD, C. R.; BREDEMEIER, M.; OTSUKI, K.; WEI, X.; Zhang, Z.; ZHANG, L. Forest ecohydrological research in the 21st century: what are the critical needs? *Ecohydrology*, v. 4, n. 2, p. 146-158, 2011. <https://doi.org/10.1002/eco.193>
- WAHREN, A., K. SCHWÄRZEL, AND K.-H. FEGER, 2012: Potentials and limitations of natural flood retention by forested land in headwater catchments: evidence from experimental and model studies. *J. Flood Risk Manag.*, 2012.
- WHATELY, M.; HERCOWITZ, M. *Serviços ambientais: Conhecer, valorizar e cuidar: Subsídios para a proteção dos mananciais de São Paulo*. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2008. 119 p.
- WUNDER, S. *Payments for environmental services: Some nuts and bolts*. Jakarta: Center for International Forestry Research, 2005. 24 p. (CIFOR Occasional Paper, 42).

- YUE, S; PILON, P; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho test for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2012.
- ZHANG, L., DAWES, W. R., WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*. v. 37, n. 3, p. 701–708, 2001.
- ZHANG, W; YAN, Y; ZHENG, J; LI, L; DONG, X; CAI, H. Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. *Global and Planetary Change* 69:35-47. 2009.
- ZIMMERMANN, B., ELSENBEER, H., & DE MORAES, J. M. (2006). The influence of land- use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management*, 222(1–8).<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.070>
- ZOLIN, C. A. Análise e otimização de projetos de pagamentos por serviços ambientais (PSA) utilizando sistemas de informações geográficas (SIG): O caso de município de Extrema, MG. 2010. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.

ANEXOS

ANEXO A.

Tabela 11. Valores de evapotranspiração (Evpt), em mm; e Evpt%, para o período anual e sazonal nos anos de 2009 a 2015.

Ano	Evpt(mm) _{anual}	Evpt% _{anual}	Evptseco (mm)	Evpt% _{seco}	Evptchuvoso (mm)	Evpt% _{chuvoso}
2009	1468	72	347	78	1121	70
2010	1067	71	167	66	900	72
2011	1013	63	105	38	908	68
2012	1050	66	248	48	803	75
2013	813	64	98	35	715	73
2014	1020	88	278	83	742	89
2015	1404	84	292	73	1112	87

Tabela 12. Valores referentes a precipitação, deflúvio, escoamento direto e escoamento de base, em mm; nos anos de 2009 a 2015, para o período anual.

Ano	P seco (mm)	Q seco (mm)	Qb seco (mm)	Qd seco (mm)
2009	447	99	62	38
2010	253	86	52	33
2011	277	172	139	32
2012	511	263	153	110
2013	283	185	113	71
2014	333	55	42	13
2015	401	109	79	30

Tabela 13. Valores referentes a precipitação, deflúvio, escoamento direto e escoamento de base, em mm; nos anos de 2009 a 2015, para o período sazonal seco

Ano	P chuvoso (mm)	Q chuvoso (mm)	Qb chuvoso (mm)	Qd chuvoso (mm)
2009	1598	478	108	370
2010	1244	344	168	176
2011	1328	419	175	244
2012	1077	274	128	146
2013	984	269	105	164
2014	830	88	52	36
2015	1278	166	53	113

Tabela 14. Valores referentes a precipitação, deflúvio, escoamento direto e escoamento de base, em mm; nos anos de 2009 a 2015, para o período sazonal chuvoso.

Ano	P_{anual} (mm)	Q_{anual} (mm)	Qb_{anual} (mm)	Qd_{anual} (mm)
2009	2045	577	169	408
2010	1496	429	221	209
2011	1604	591	314	277
2012	1588	537	281	257
2013	1267	453	218	236
2014	1163	143	93	50
2015	1679	275	131	143

Tabela 15. Valores dos indicadores de serviços hidrológicos de; disponibilidade hídrica: Rendimento hídrico (RH) e Índice de escoamento de base (BFI); e proteção: Coeficiente de escoamento direto (Ca) e Flashiness (F); para o período anual.

Ano	RH_{anual} (%)	BFI_{anual} (%)	Ca_{anual} (%)	F_{anual} (%)
2009	28	29	20	78
2010	29	51	14	43
2011	37	53	17	36
2012	34	52	16	48
2013	36	48	19	51
2014	12	65	4	28
2015	16	48	9	40

Tabela 16. Valores dos indicadores de serviços hidrológicos de; disponibilidade hídrica: Rendimento hídrico (RH) e Índice de escoamento de base (BFI); e proteção: Coeficiente de escoamento direto (Ca) e Flashiness (F); para o período sazonal seco.

Ano	RH_{seco} (%)	BFI_{seco} (%)	Ca_{seco} (%)	F_{seco} (%)
2009	22	62	8	47
2010	34	61	13	11
2011	62	81	12	13
2012	52	58	22	40
2013	65	61	25	39
2014	17	76	4	19
2015	27	72	8	18

Tabela 17. Valores dos indicadores de serviços hidrológicos de; disponibilidade hídrica: Rendimento hídrico (RH) e Índice de escoamento de base (BFI); e proteção: Coeficiente de escoamento direto (Ca) e Flashiness (F); para o período sazonal chuvoso.

Ano	RH chuvoso (%)	BFI chuvoso (%)	Ca chuvoso (%)	F chuvoso (%)
2009	30	23	23	85
2010	28	49	14	51
2011	32	42	18	46
2012	25	47	14	56
2013	27	39	17	60
2014	11	59	4	34
2015	13	32	9	55

Figura 22. Tendência de resposta dos valores de precipitação, para os anos de 2009 a 2015.

ANEXO B.

Figura 23. Uso e cobertura do solo da microbacia do Ribeirão das Posses, para os anos de 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015