

UILSON RICARDO VENÂNCIO AIRES

**UTILIZAÇÃO DE NDVI PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO
DA COBERTURA VEGETAL NO REGIME DE VAZÕES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A298u
2018

Aires, Uilson Ricardo Venâncio, 1989-
Utilização de NDVI para análise da influência da
modificação da cobertura vegetal no regime de vazões / Uilson
Ricardo Venâncio Aires. – Viçosa, MG, 2018.
xii, 83f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Inclui apêndices.

Orientador: Demetrius David da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.59-67.

1. Cobertura do solo. 2. Geoprocessamento.
3. Sensoriamento remoto. 4. Recursos hídricos. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.


CDD 22. ed. 631.4

UILSON RICARDO VENÂNCIO AIRES

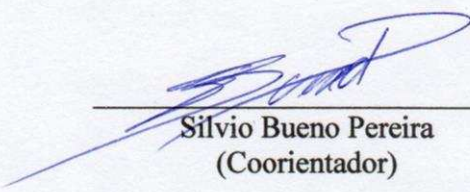
**UTILIZAÇÃO DE NDVI PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO
DA COBERTURA VEGETAL NO REGIME DE VAZÕES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2018.



Celso Bandeira de Melo Ribeiro



Silvio Bueno Pereira
(Coorientador)



Demetrius David da Silva
(Orientador)

*À minha família pelo apoio e
incentivo para continuar em meus
estudos, dedico.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de aperfeiçoamento da minha formação acadêmica.

Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Demetrius David da Silva, pela confiança e orientação ao longo do curso de mestrado e pelo valioso direcionamento para a realização desta pesquisa.

Aos professores e coorientadores Michel Castro Moreira, Silvio Bueno Pereira e Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro, pelas ideias, críticas e sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Gilberto Chohaku Sedyama e Elpídio Inácio Fernandes Filho pelo tempo disponibilizado e sugestões fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha família pelo incentivo na continuação da minha formação acadêmica e compreensão pelas horas em que estive ausente para a realização deste trabalho.

Ao Roberto Filgueiras e Cleber Assis pelas diversas conversas e ideias sugeridas sobre a metodologia abordada nesta pesquisa.

À Jasmine pela amizade e diversas ideias discutidas que resultaram em vários trabalhos desenvolvidos em parceria.

Aos amigos de pós-graduação do Centro de Referências em Recursos Hídricos, em especial, Eduardo, Micael, Clívia, José Leôncio e Luna, pela convivência e por dividirem as dificuldades e conquistas.

E a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

Uilson Ricardo Venâncio Aires, filho de Ilson Benedito Venâncio Aires e Elisabete de Oliveira Venâncio Aires, nasceu em Angatuba, SP, em 10 de julho de 1989.

Em março de 2007, ingressou-se no curso de Agronegócios na Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC), em Itapetininga, SP, concluindo-o em dezembro de 2009.

Em março de 2011, ingressou-se no curso de Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG, concluindo-o em fevereiro de 2016. Foi bolsista de Iniciação Científica por dois anos pelo programa PIBIC/FAPEMIG no laboratório de hidrologia florestal do departamento de Engenharia de Água e Solo da UFLA.

Em março de 2016, ingressou-se no Programa de Pós Graduação, em Nível de Mestrado, no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, na área de concentração de Planejamento e Manejo Integrado dos Recursos Hídricos, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2018.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Geral	3
2.2 Específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1 Comportamento não estacionário dos dados hidrológicos	4
3.2 Efeitos da modificação da cobertura vegetal sobre o regime fluviométrico	6
3.2.1 Impactos da alteração da cobertura vegetal sobre a vazão média	6
3.2.2 Impactos da alteração da cobertura vegetal sobre as vazões máximas	7
3.2.3 Impactos da alteração da cobertura vegetal sobre as vazões mínimas	8
3.3 Mapeamento da cobertura vegetal a partir do satélite Landsat	9
3.3.1 Índices de Vegetação - IVs.....	12
3.4 Plataforma Google Earth Engine - GEE.....	14
4. METODOLOGIA	16
4.1 A bacia hidrográfica do rio Manhuaçu	16
4.2 Obtenção e tratamento da base de dados hidrológicos	17
4.2.1 Preenchimento de falhas dos dados hidrológicos.....	19
4.2.2 Individualização das áreas de drenagem das estações fluviométricas	20
4.2.3 Definição do ano hidrológico da bacia do rio Manhuaçu	22
4.3 Análise da estacionariedade das séries de vazão e precipitação.....	22
4.4 Obtenção e classificação das imagens de NDVI	24
4.4.1 Processamento dos dados na plataforma GEE	25
4.4.2 Classificação dos valores de NDVI.....	27
4.5 Obtenção dos valores de Evapotranspiração real (ET) a partir do sensor MODIS	30
4.6 Análise da influência da alteração da cobertura vegetal no regime de vazões	32
4.6.1 Avaliação dos modelos de regressão múltipla	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1 Análise de tendência das séries de vazão e precipitação	38
5.2 Análise da obtenção e classificação das imagens de NDVI	44
5.2.1 Avaliação da acurácia da classificação do uso e cobertura do solo	44
5.2.2 Dinâmica da cobertura vegetal na bacia do rio Manhuaçu	47

5.3	Valores de Evapotranspiração real (ET) obtidos a partir do sensor MODIS	50
5.4	Análise da influência da alteração da cobertura vegetal no regime de vazões	52
5.4.1	Ajuste dos modelos de regressão múltipla	52
5.5	Considerações acerca dos resultados observados na bacia do rio Manhuaçu	56
6.	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICES	68
	APÊNDICE A.....	69
	APÊNDICE B.....	71
	APÊNDICE C.....	73
	APÊNDICE D.....	76
	ANEXOS	81
	ANEXO A	82
	ANEXO B.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cronologia de lançamento e período de funcionamento dos satélites Landsat.....	10
Figura 2 – Interface de programação do Google Earth Engine - GEE.....	15
Figura 3 – Localização da bacia hidrográfica do rio Manhuaçu; estações pluviométricas com influência na área de estudo e estações fluviométricas; hidrografia gerada a partir do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC).....	16
Figura 4 – Mapa dos solos predominantes na bacia do rio Manhuaçu.....	17
Figura 5 – Individualização da área de drenagem a montante de cada uma das estações fluviométricas utilizadas no estudo.	20
Figura 6 – Localização das estações fluviométricas na bacia do rio Manhuaçu.	21
Figura 7 – Composição das imagens Landsat 8 sem (a) e com (b) a aplicação do procedimento para a remoção de nuvens considerando o período de junho a agosto de 2014.	26
Figura 8 – Exemplo de execução de script para o cálculo do NDVI na plataforma GEE para a bacia do rio Manhuaçu.	27
Figura 9 – Exemplo de execução do script para obtenção de ET real na plataforma GEE para a bacia do rio Manhuaçu.	31
Figura 10 – Estações fluviométricas que apresentaram comportamento não estacionário do regime de variação de vazões na bacia do rio Manhuaçu.....	38
Figura 11 – Período de mudança nos dados hidrológicos das estações fluviométricas que apresentaram comportamento não estacionário ao longo do tempo, identificados pela aplicação do teste de Pettitt.....	39
Figura 12 – Área de influência das estações pluviométricas, com destaque para a estação que apresentou comportamento não estacionário.....	41
Figura 13 – Usos outorgados na bacia do rio Manhuaçu.	42
Figura 14 – Mapeamento de espelhos de água na bacia do rio Manhuaçu, com destaque para a PCH Pipoca que pode ter influência no regime de variação de vazões da estação 56976000.	43
Figura 15 – Valores médios mensais de NDVI e a precipitação média mensal nas estações pluviométricas com maior influência na bacia do rio Manhuaçu.....	46
Figura 16 – Evolução da área de pastagem e vegetação com alto vigor no período de 1986 a 2014 na bacia do rio Manhuaçu.....	47
Figura 17 – Evolução da área de pastagem e de vegetação com alto vigor no período de 1986 a 2014 nas áreas de drenagem de cada uma das oito estações fluviométricas da bacia do rio Manhuaçu.	48
Figura 18 – Valores médio de evapotranspiração real para cada uma das áreas de drenagem das oito estações fluviométricas da bacia do rio Manhuaçu.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas espectrais das bandas do Landsat 5 e 8	11
Tabela 2 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo	18
Tabela 3 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo.....	18
Tabela 4 – Intervalos de NDVI utilizados para a classificação, e intervalo de meses em que foram obtidas as imagens	29
Tabela 5 – Interpretação dos valores de K	30
Tabela 6 – Variáveis dependentes e independentes dos modelos de regressão múltipla ajustados para fins de análise da influência da alteração da cobertura vegetal no regime de vazões na bacia do rio Manhuaçu.....	33
Tabela 7 – Estações pluviométricas utilizadas para obtenção dos valores de precipitação utilizadas nas variáveis explicativas dos modelos.....	35
Tabela 8 – Avaliação da acurácia da classificação do uso e ocupação do solo para a bacia do rio Manhuaçu	45
Tabela 9 – Modelos de regressão múltipla que apresentaram melhor ajuste aos dados de vazão e respectivas estatísticas	53

RESUMO

AIRES, Uilson Ricardo Venâncio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Utilização de NDVI para análise da influência da modificação da cobertura vegetal no regime de vazões.** Orientador: Demetrius David da Silva. Coorientadores: Michel Castro Moreira, Silvio Bueno Pereira e Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro.

As alterações climáticas e a intensificação das atividades antrópicas nas bacias hidrográficas têm alterado expressivamente o regime de vazões, o que se configura como um problema para os sistemas de gerenciamento dos recursos hídricos, pois estes são operados considerando a hipótese de estacionariedade, ou seja, a não ocorrência de mudanças significativas nos dados hidrológicos ao longo do tempo. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da modificação temporal e espacial da cobertura vegetal no regime de vazões na bacia do rio Manhuaçu, MG. A análise da dinâmica da cobertura vegetal, no período de 1986 a 2014, foi realizada utilizando-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). O NDVI foi calculado a partir de imagens Landsat com resolução espacial de 30 m, sendo o seu processamento realizado na plataforma Google Earth Engine (GEE). Para avaliar a relação da dinâmica da cobertura vegetal com o regime de vazões, os valores de NDVI foram classificados em áreas de vegetação com alto vigor (floresta nativa, plantada, formação arbustiva e culturas perenes) e pastagem. Para a caracterização do comportamento hidrológico foram utilizados os dados de oito estações fluviométricas e 18 estações pluviométricas que apresentam influência na área de estudo. A verificação da hipótese de estacionariedade nos dados hidrológicos foi feita com a aplicação dos testes de Mann Kendall e Pettitt, ao nível de significância de 5%. Foram ajustados modelos de regressão múltipla utilizando como variáveis explicativas o uso do solo (β_1), a precipitação (β_2) e a evapotranspiração (β_3). A Evapotranspiração foi extraída do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), do produto Global Evapotranspiration Project (MOD16A2), a partir de 2000, com resolução espacial de 1 km. Em relação à dinâmica da cobertura vegetal, observou-se uma variação pouco expressiva ao longo do tempo, com pequeno aumento na cobertura vegetal com alto vigor e redução na área de pastagem. Verificou-se, também, que seis estações fluviométricas localizadas na área de estudo apresentaram comportamento não estacionário, com tendência de redução da vazão mínima e aumento da vazão máxima. Em geral, os dados pluviométricos apresentaram variabilidade natural. Dois modelos de regressão múltipla se destacaram por apresentar o melhor ajuste aos dados, um com duas variáveis explicativas (média de cinco anos de dados de uso do solo e precipitação) e outro com três, incluindo a evapotranspiração como variável explicativa adicional. De maneira geral, foram obtidos ajustes satisfatórios em grande parte das estações

fluviométricas, sendo que os valores de R_a^2 ajustado dos modelos de regressão múltipla variou de 0,59 a 0,96. A utilização de NDVI mostrou ser um bom indicativo para avaliação da dinâmica da cobertura vegetal; no entanto, a alta variabilidade dos dados, dificultou estabelecer um intervalo para a separação das classes de uso do solo de interesse. Os resultados observados confirmaram a importância do estudo do regime de vazões na bacia do rio Manhuaçu visando a adequação dos sistemas de gestão de recursos hídricos à variabilidade do comportamento hidrológico ao longo do tempo.

ABSTRACT

AIRES, Uilson Ricardo Venâncio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Use of NDVI to analyze the influence of vegetation cover change on the stream flow.** Adviser: Demetrius David da Silva. Co-advisers: Michel Castro Moreira, Silvio Bueno Pereira and Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro.

Climate change and the intensification of anthropogenic activities in river basins have significantly altered the stream flow regime, which is a problem for water resources management systems, since these are operated considering the stationarity hypothesis; that is, significant changes in hydrological data over time. In this context, the aim of this work was to evaluate the influence of the temporal and spatial modification of the vegetation cover on the stream flow regime in the Manhuaçu river basin, Minas Gerais state, Brazil. An analysis of vegetation cover dynamics, from 1986 to 2014, was performed using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The NDVI was calculated from Landsat images with spatial resolution of 30 m and was processed in the Google Earth Engine (GEE) platform. In order to evaluate the relationship between the vegetation cover dynamics and the stream flow regime, NDVI values were classified in high vegetation areas (native forest, planted, shrub and perennial) and pasture. For the characterization of hydrological behavior, the data from eight fluviometric ground stations and 18 pluviometric ground stations were used, which influence the study area. Verification of the stationarity hypothesis in the hydrological data was carried out with the Mann Kendall and Pettitt tests, at a significance level of 5%. Multiple regression models were adjusted using soil (β_1), rainfall (β_2) and evapotranspiration (β_3) as explanatory variables. The evapotranspiration data were extracted from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor, of the Global Evapotranspiration Project (MOD16A2), since 2000, with spatial resolution of 1 km. In relation to the vegetation cover dynamics, there was a little variation over time, with a small increase in the vegetation cover with high vigor and a reduction in the pasture area. It was also verified that six fluviometric stations located in the study area presented non-stationary behavior, with a tendency to reduce the minimum stream flow and increase the maximum stream flow. In general, rainfall data presented natural variability. Two models of multiple regression showed the best fit for the data, one with two explanatory variables (mean of five years of land use and precipitation) and one with three, including evapotranspiration as an additional explanatory variable. In general, satisfactory adjustments were obtained in most fluviometric stations, and adjusted values of the multiple regression models ranged from 0.59 to 0.96. The use of NDVI proved to be a good indicator for the evaluation of vegetation cover dynamics; however, the high variability of the data made

it difficult to establish an interval for the separation of the land use classes of interest. The results confirmed the importance of studying the flow regime in the Manhuaçu river basin, aiming to make the management of water resource systems appropriate to the variability of hydrological behavior over time.

1. INTRODUÇÃO

As alterações climáticas e a intensificação das atividades antrópicas têm resultado em modificações no ciclo hidrológico, em especial na amplitude e ocorrência de eventos hidrológicos extremos (ISHAK et al., 2013; LENG et al., 2015; LIU et al., 2017). Isto tem sido um problema para os sistemas de gerenciamento dos recursos hídricos, pois esses são operados considerando-se a hipótese de estacionariedade, ou seja, da não ocorrência de mudanças significativas nas séries de dados hidrológicos ao longo do tempo (MILLY et al., 2008; VILLARINI et al., 2011).

Diversos estudos recentes têm confirmado o comportamento não estacionário da precipitação em diversas partes do globo (ISHIDA et al., 2017; SALVIANO et al., 2016; WESTRA; SISSON, 2011), no entanto, o regime de vazões apresenta maior sensibilidade, pois é influenciado, além das alterações climáticas (VILLARINI et al., 2011), por ações antrópicas nas bacias hidrográficas como obras de infraestrutura, modificações nos canais do rio, drenagem e, em especial, alterações no uso e cobertura do solo (MILLY et al., 2008).

A redução da cobertura florestal nas bacias hidrográficas tendem a resultar em um aumento do escoamento superficial, o que favorece a ocorrência de maiores vazões máximas, devido à redução da infiltração da água no solo, estando ainda o aumento do escoamento intimamente ligado à diminuição das vazões mínimas (BAYER, 2014; COE et al., 2011; FARLEY et al., 2005; KHANNA et al., 2017).

A análise das alterações do regime de vazão devido às modificações na cobertura vegetal em escala temporal e espacial é de fundamental importância para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, uma vez que a disponibilidade hídrica pode comprometer o desenvolvimento socioeconômico de toda a bacia hidrográfica.

Considerando a abrangência e os diferentes usos do solo em uma bacia hidrográfica, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto orbital é imperativa no monitoramento das mudanças na cobertura vegetal, fornecendo informações em larga escala permitindo identificar as alterações por meio da análise de componentes agrometeorológicos, como albedo, índice de vegetação e evapotranspiração (GOMES et al., 2009; GU et al., 2017; SALLO et al., 2014).

Índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), têm sido utilizados para a modelagem dos efeitos da dinâmica da cobertura vegetal em bacias hidrográficas sobre o escoamento superficial, como fizeram Ohana-Levi et al. (2015), que obtiveram excelente ajuste entre a modificação temporal dos valores de NDVI e o escoamento superficial.

O cálculo dos valores de NDVI requer o processamento de imagens derivadas de sensor orbital e, dependendo da abrangência espacial e temporal da análise, necessita-se de processadores robustos e espaço para o armazenamento de um enorme volume de dados.

Neste cenário, a plataforma de processamento de dados Google Earth Engine (GEE), lançada em 2013, configura-se como uma ferramenta com grande potencial para auxiliar na obtenção de informações de sensoriamento remoto, permitindo o processamento de dados em nuvem, o que diminui consideravelmente o tempo de processamento e de armazenamento das informações (GORELICK et al., 2017).

Diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando esta plataforma, com destaque para mudanças na cobertura vegetal utilizando o NDVI (HUANG et al., 2017; HUNTINGTON et al., 2016; KELLEY et al., 2017). Apesar das diversas aplicações e análises possíveis de serem realizadas utilizando-se a plataforma GEE, verifica-se que ainda é incipiente o uso desta ferramenta no país.

Deste modo, considerando que na bacia do rio Manhuaçu, localizada no Estado de Minas Gerais, é verificado uma intensificação do uso antrópico na bacia, em especial na agricultura com a cultura do café, e tendo em vista a potencialidade do uso do Google Earth Engine para o estudo de mudanças na cobertura vegetal, o presente trabalho teve como hipótese verificar se a dinâmica na cobertura vegetal resultou em modificações o regime de vazões.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a influência da modificação temporal e espacial da cobertura vegetal no regime de vazões na bacia hidrográfica do rio Manhuaçu, MG, utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) obtido com o processamento de imagens Landsat na plataforma Google Earth Engine (GEE).

2.2 Específicos

- Obter e analisar a base de dados hidrológicos da bacia do rio Manhuaçu;
- Verificar a hipótese de estacionariedade das séries de vazão e precipitação por meio da aplicação dos testes de Man Kendall e Pettitt;
- Obter e classificar as imagens de NDVI em áreas de pastagem e vegetação com alto vigor para a bacia do rio Manhuaçu;
- Obter os valores de evapotranspiração a partir do sensor MODIS, produto MOD16A2 para a bacia do rio Manhuaçu; e
- Analisar a influência da alteração da cobertura vegetal no regime de vazões.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Comportamento não estacionário dos dados hidrológicos

A hipótese de estacionariedade dos dados hidrológicos pode ser entendida como a flutuação natural dos dados, sem a ocorrência de alterações que possam resultar em uma mudança nos padrões conhecidos das séries de dados, ou seja, não apresentam tendências de redução ou aumento ao longo do tempo (MILLY et al., 2008).

A não estacionariedade das séries de dados é uma resposta direta às mudanças climáticas e intensificação das ações antrópicas sobre o ambiente natural (VILLARINI et al., 2011). Os impactos das mudanças climáticas têm alterado os sistemas hidrológicos, afetando a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos, tornando-se um tema de grande preocupação mundial, ainda mais com as projeções de aumento da temperatura global em torno de 2°C até o final deste século (IPCC, 2014).

Com o aumento das temperaturas globais, tem sido observada uma intensificação da ocorrência de fenômenos naturais, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), que influencia diretamente no volume pluviométrico na América do Sul (KAYANO; CAPISTRANO, 2014). As mudanças climáticas geram alterações no comportamento da precipitação em diversas partes do globo, dificultando a sua previsibilidade ocasionando a intensificação de eventos extremos, acarretando inundações e secas mais severas (BAJRACHARYA et al., 2018).

Ishida et al. (2017), ao analisarem o comportamento da precipitação em bacias hidrográficas considerando diversos cenários das condições climáticas futuras, constataram que a precipitação média anual tende a não apresentar mudanças significativas. Os autores, no entanto, verificaram tendência de aumento da precipitação anual máxima de 72 horas, a qual exerce grande influência em termos de inundações.

Por outro lado, Kahsay et al. (2018), considerando diversos cenários de mudanças climáticas futuras, identificaram forte tendência de redução na precipitação média anual na Etiópia.

Salviano et al. (2016) verificaram, ao realizar um estudo sobre o comportamento da precipitação e temperatura média no território brasileiro, que a precipitação apresentou tendência de aumento no período mais chuvoso e diminuição no período mais seco na Amazônia ocidental. Já para o Nordeste brasileiro, em especial no semiárido, observou-se uma tendência de aumento do volume pluviométrico para os meses mais secos. Isso foi também observado nos estados de Mato Grosso e Goiás. Para o mês de janeiro, constatou-se uma

tendência de crescimento do volume pluviométrico na faixa litorânea situada entre o Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro.

Em estudos concentrados na detecção de tendências em dados diários de precipitação, tem sido verificado, em diversas regiões do globo, aumento no volume da precipitação máxima, inclusive em muitos locais onde a precipitação média anual apresenta diminuição ao longo do tempo (ALLAN; SODEN, 2008; WESTRA; SISSON, 2011).

Lehmann et al. (2015) também encontraram padrões crescentes para a precipitação máxima diária, com acréscimo de 12% na ocorrência de eventos extremos para o período de 1981 a 2010. Essas mudanças foram associadas a uma tendência de aumento nas temperaturas globais durante o período de análise.

O efeito destas mudanças é mais perceptível ainda no regime de vazões pois este, além de apresentar alta sensibilidade em relação ao volume pluviométrico (VILLARINI et al., 2011), sofre interferência direta das ações antrópicas nas bacias hidrográficas, com destaque para as obras de infraestrutura, uso dos recursos hídricos, modificações nos canais naturais dos rios, drenagem e alterações no uso e cobertura do solo (COE et al., 2011; MILLY et al., 2008).

Martins et al. (2011) observaram tendência de redução nas vazões máximas e de aumento nas vazões mínimas após a construção da barragem da usina hidroelétrica de Sobradinho. Resultado semelhante foi observado por Li et al. (2017), quando analisaram a construção das barragens de Xiaowan e Nuozhadu em 2010 e 2014, respectivamente, no rio Mekong, localizado no Sudoeste Asiático, comprovando os efeitos do aumento da evaporação no lago e de regularização das vazões à jusante de grandes barragens.

Contrariamente, Do et al. (2017) não observaram influência significativa da construção de grandes barragens no regime de vazões máximas analisadas em grandes bacias hidrográficas. O resultado observado pode ser explicado pelo fato de que bacias com área de drenagem maiores são tipicamente mais afetadas por eventos de precipitação com durações mais longas do que em bacias hidrográficas menores e em diferentes partes da bacia.

Os usos múltiplos dos recursos hídricos também geram efeitos sobre o regime de vazões. Dale et al. (2015) verificaram, em bacias hidrográficas com o uso intensivo da água para irrigação, tendência de redução na vazão média anual. Já Pruski et al. (2007) verificaram os efeitos do uso da água para irrigação e abastecimentos humano e animal sobre o regime de vazão na bacia hidrográfica do rio Paracatu e constataram que a demanda total por água não teve influência significativa na vazão média de longo termo; porém, apresentou impactos na vazão mínima de sete dias de duração com período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$).

O crescimento urbano também tende a resultar em impactos expressivos no regime de vazão, em especial, nas vazões máximas, principalmente devido ao processo de impermeabilização do solo, o que resulta em aumento expressivo do volume do escoamento superficial, o que muitas vezes também está associado com os riscos de inundação (DIEM et al., 2018; WEI et al., 2017).

A modificação na cobertura vegetal também exerce grande influência sobre o comportamento não estacionário dos dados hidrológicos. Os efeitos do reflorestamento ou desmatamento sobre o regime de vazões são discutidos nos tópicos a seguir.

3.2 Efeitos da modificação da cobertura vegetal sobre o regime fluviométrico

Grande parte dos estudos visando avaliar os impactos das alterações da cobertura vegetal sobre o regime de vazões foram realizados em pequenas bacias experimentais. As principais metodologias empregadas nos estudos podem ser classificadas em três tipos: estudo de correlação; estudos em uma única bacia; e metodologia das bacias pareadas (BAYER, 2014).

Com o aprimoramento das técnicas de sensoriamento remoto e o desenvolvimento de modelos hidrológicos mais robustos, que permitem obter boa representatividade das variáveis analisadas, diversos estudos buscaram entender os impactos da alteração na cobertura vegetal sobre o regime fluviométrico no contexto de grandes bacias hidrográficas (BAYER, 2014; COE et al., 2011; COSTA et al., 2003; DO et al., 2017; KHANNA et al., 2017).

3.2.1 Impactos da alteração da cobertura vegetal sobre a vazão média

Diversos trabalhos foram desenvolvidos para identificar os impactos da modificação da cobertura vegetal sobre o regime de vazões, sendo o estudo de Bosch e Hewlett (1982), referência na área. Os autores analisaram diversos trabalhos em todo o mundo que avaliaram a resposta do regime fluviométrico em relação ao desmatamento ou reflorestamento. Constataram para a vazão média anual, que o desmatamento tende a resultar em acréscimo na vazão, enquanto que o reflorestamento, em decréscimo. Os autores apontam ainda que a redução da vazão é proporcional ao período de desenvolvimento da vegetação.

Resultado semelhante foi obtido por Trimble et al. (1987), que verificaram, para redução entre 9% a 28% na cobertura florestal, tendência de aumento na vazão média anual em função do percentual de área de vegetação que sofreu alteração. Considerando uma bacia composta por cobertura florestal, os autores obtiveram uma relação em que, para o desmatamento na ordem de 40% da área, ocorreu um incremento de 130 mm no deflúvio anual.

Sahin e Hall (1996) utilizaram a base de dados compilada por Bosch e Hewlett (1982), e acrescentando outros estudos desenvolvidos posteriormente, constataram que, para redução de 10% na área de florestas de coníferas, foi observado aumento de cerca de 20 mm a 25 mm no deflúvio anual. Os autores verificaram ainda que esta mesma alteração na cobertura vegetal é menos significativa para áreas ocupadas por eucalipto, com um aumento de 6 mm. Resultado semelhante foi observado por Molina et al. (2012), que constataram um acréscimo de 25 mm sobre no deflúvio anual após a conversão de floresta nativa em pastagem na bacia hidrográfica de Jardan, no Equador.

Farley et al. (2005), estudando os efeitos do reflorestamento sobre o deflúvio anual, constataram que a conversão de pastagem naturais em eucalipto resultou numa redução no deflúvio anual de 75%, nas condições específicas locais. Para a modificação de formação arbustiva para eucalipto, a redução observada foi de até 40%. Os autores destacaram, também, que a diminuição do deflúvio anual é variável ao longo do tempo de crescimento das espécies reflorestadas.

É importante ressaltar que os efeitos do desmatamento ou reflorestamento sobre o regime de vazões médias observados pelos autores referem-se a condições específicas locais, não sendo possível realizar uma generalização. Tanto que as características do solo como a textura, teor de matéria orgânica, condutividade hidráulica, porosidade, entre outras, e as condições da cobertura vegetal anteriores a perturbação da área podem influenciar na relação observada (PINHEIRO et al., 2009).

A título de exemplo, a conversão de pastagem degradada para floresta, empregando-se técnicas para melhorar a estrutura do solo, como subsolagem, tende a resultar em uma melhoria na infiltração da água no solo, favorecendo a retenção da água no solo e a disponibilidade hídrica no período da estação seca (PRUSKI, 2009).

3.2.2 Impactos da alteração da cobertura vegetal sobre as vazões máximas

Apesar da importância dos estudos de vazões máxima, visto que as mesmas podem resultar em perdas econômicas e sociais, grande parte dos estudos é destinada a avaliar os efeitos das alterações da cobertura vegetal sobre o regime de vazões médias, isto porque os fatores que influenciam as vazões máximas apresentam alta complexidade (EISENBIES et al., 2007).

Andréassian (2004) desenvolveu um estudo revisando diversos trabalhos desta natureza e constatou que os efeitos das alterações da cobertura vegetal nas vazões máximas apresentaram

grande variabilidade, com tendências de redução, aumento e, até mesmo, efeitos nulos sobre este regime de vazão.

Molina et al. (2012) verificaram tendência de redução de até 54% na ocorrência das vazões máximas para a bacia hidrográfica de Jardan, no Equador, enquanto que não foram verificadas modificações significativas no volume pluviométrico no período de análise. Desta forma, os autores associaram esta redução na vazão ao reflorestamento de áreas degradadas na bacia e à recuperação espontânea da vegetação nas áreas com remanescentes de pastagens.

Beschta et al. (2000) identificaram que os efeitos do reflorestamento resultaram em redução das vazões máximas para pequenos eventos de precipitação, com período de retorno de um ano. Porém, para precipitações mais intensas, com período de retorno de cinco anos, os efeitos do reflorestamento mostraram-se não significativos sobre a atenuação das vazões máximas. A explicação para este fato pode estar relacionada à capacidade de interceptação da precipitação pela vegetação e de infiltração da água no solo, que é limitada após certo período de saturação, sendo excedida para grandes eventos de precipitação (PRUSKI, 2009; ROBINSON et al., 1991).

Os impactos da alteração da cobertura vegetal sobre as vazões máximas podem ser mais perceptíveis em escala local. Em áreas maiores, os efeitos da precipitação e das mudanças no uso do solo ocorrem em diferentes localidades na bacia, o que dificulta associar os impactos destes efeitos sobre as vazões máximas (BAYER, 2014; ROBINSON et al., 2003).

Tal comportamento é corroborado pelo estudo de Do et al. (2017) que, avaliando os impactos das mudanças na cobertura vegetal sobre o regime de vazões máxima em grandes bacias, constataram que as mudanças identificadas não foram significativas para influenciar o comportamento das vazões máximas.

3.2.3 Impactos da alteração da cobertura vegetal sobre as vazões mínimas

O estudo das vazões mínimas é essencial para assegurar o suprimento de água para abastecimento urbano, industrial e atividades agropecuárias, bem como para garantir a qualidade do ambiente aquático, sendo, portanto, de fundamental importância para fins de planejamento e gestão dos recursos hídricos (BAZZO et al., 2017).

Diversos estudos indicam que os efeitos, a curto prazo, do desmatamento ou reflorestamento sobre a vazão mínima segue o mesmo comportamento esperado para as vazões médias, ou seja, tendência de redução da vazão com o aumento da cobertura vegetal e de aumento da vazão com a supressão da vegetação (ANDRÉASSIAN, 2004).

Este comportamento das vazões mínimas pode ser explicado pelo fato de o reflorestamento gerar um aumento substancial da evapotranspiração (ET), em decorrência dos maiores Índices de Área Foliar, resultando, conseqüentemente, num aumento da demanda hídrica das plantas (CALDER, 1986). Outro ponto a destacar é que a cobertura florestal apresenta maior capacidade de retirada da água do solo, principalmente em períodos em que há déficit hídrico, o que pode afetar substancialmente as vazões mínimas (ENGEL et al., 2005; FARLEY et al., 2005; ZHANG et al., 2001).

Apesar do reflorestamento adotando-se medidas para melhorias nas propriedades do solo resultarem em um aumento da capacidade e retenção e infiltração da água no solo (PRUSKI, 2009), o aumento do consumo de água pelas plantas é maior, pois a evapotranspiração representa cerca de 70% do ciclo hidrológico (MELLO; SILVA, 2013).

McGuinness e Harrold (1971) verificaram, através de experimentos com reflorestamento, que ocorreu uma redução das vazões mínimas em função do tempo de crescimento da vegetação, indicando que o reflorestamento tende a diminuir o regime de vazões. Esse resultado também foi observado por Robinson et al. (1991), que verificaram a redução da vazão mínima a medida que ocorreu a regeneração da vegetação nativa.

Tendência similar foi observada por Swank e Miner (1968), com redução da vazão mínima após o reflorestamento com *pinus* de uma bacia experimental. Farley et al. (2005), também verificaram redução da vazão mínima após o reflorestamento, sendo que os maiores impactos observados foram na conversão de pastagem naturais para eucalipto. Fahey e Payne (2017) verificaram esta mesma relação na conversão de pastagem para eucalipto, representando dois terços da área da bacia, no período de 1991 a 2013, na região montanhosa do leste de Otaco, Nova Zelândia, e constaram redução de 26% da vazão mínima.

Ressalta-se que o efeito do reflorestamento natural sobre o regime de vazões mínimas tende a seguir comportamento semelhante, porém os impactos podem ser menos perceptíveis a curto prazo, uma vez que a vegetação natural apresenta um tempo de crescimento maior que as florestas plantadas (CHAZDON, 2012).

3.3 Mapeamento da cobertura vegetal a partir do satélite Landsat

Atualmente diversos satélites disponibilizam dados derivados de sensoriamento remoto, com uma vasta gama de resolução espacial e temporal, sendo que dentre eles destaca-se o Landsat, que fornece uma base de dados de imagens em escala temporal mais longa disponível para a comunidade científica, com 40 anos de dados produzidos em escala global (ROY et al., 2016).

O Landsat teve sua primeira versão lançada em 1972 (Figura 1), no entanto, grande parte dos trabalhos desenvolvidos a partir das imagens deste satélite são da versão Landsat 5 sensor *Thematic Mapper* (TM), por apresentar abrangência temporal maior, e do Landsat 8 sensor *Operational Land Imager* (OLI), a versão mais recente deste satélite. Ambos os satélites apresentam resolução espacial de 30 m e temporal de 16 dias, com órbita polar síncrona (WULDER et al., 2016).

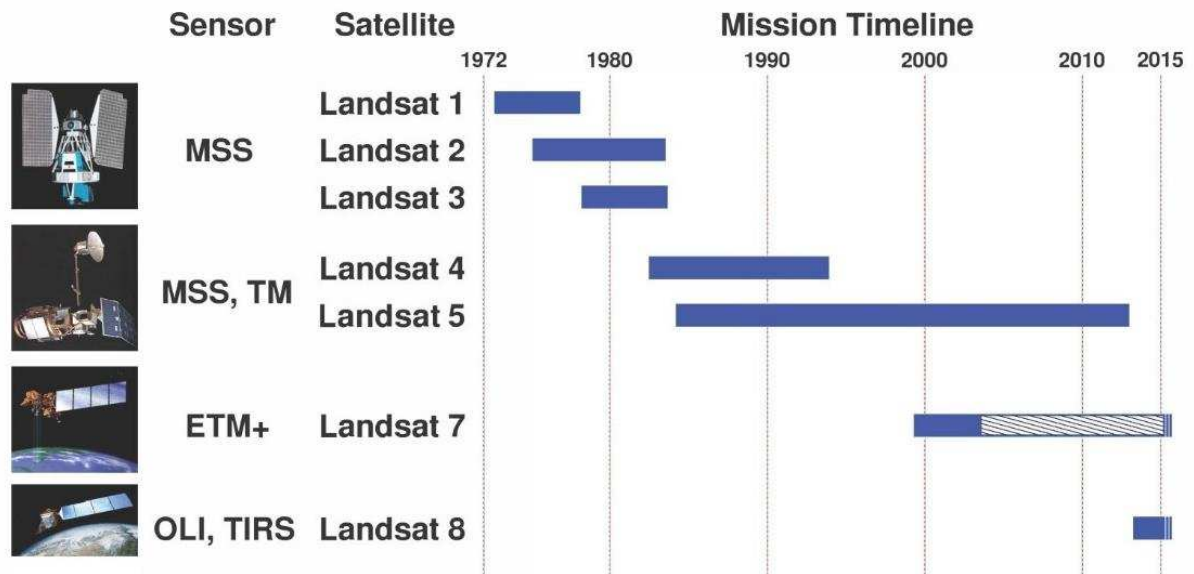


Figura 1 – Cronologia de lançamento e período de funcionamento dos satélites Landsat.

Fonte: Warren et al. (2015)

O Landsat 7 sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) continua em operação e oferece imagens no período de defasagem temporal entre o Landsat 5 e 8, pois grande parte das regiões do globo possuem imagens de Landsat 5 até 2012. No entanto, o sensor *Scan Line Corrector* (SLC) desse satélite apresentou falha em 2003, ocasionando falhas nos dados obtidos, o que muitas vezes inviabiliza a sua utilização (LI et al., 2013).

Destaca-se, ainda, que o Landsat 6 apresentou problemas logo após o seu lançamento, não sendo possível a sua utilização para coleta de dados, e os satélites Landsat 1, 2 e 3 utilizavam apenas o sensor MSS (*Multispectral Scanner*), que realizava a coleta dos dados com uma resolução espacial de 60 m (NASA, 2018).

O Landsat 8 apresenta bandas adicionais às do Landsat 5, além de a abrangência espectral de cada banda ser diferente, conforme se apresenta na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixas espectrais das bandas do Landsat 5 e 8

Bandas	Landsat 5 TM	
	Faixa espectral (μm)	Resolução espacial
B1 - Azul	0,45 - 0,52	30 m
B2 - Verde	0,52 - 0,60	30 m
B3 - Vermelho	0,63 - 0,69	30 m
B4 - Infravermelho próximo (NIR)	0,76 - 0,90	30 m
B5 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR - 1)	1,55 - 1,75	30 m
B6 - Infravermelho termal (TIR)	10,4 - 12,5	120 m
B7 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR - 2)	2,08 - 2,35	30 m

Bandas	Landsat 8 OLI	
	Faixa espectral (μm)	Resolução espacial
B1 - Aerossol, costeira*	0,43 - 0,45	30 m
B2 - Azul	0,45 - 0,51	30 m
B3 - Verde	0,53 - 0,59	30 m
B4 - Vermelho	0,64 - 0,67	30 m
B5 - Infravermelho próximo (NIR)	0,85 - 0,88	30 m
B6 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR - 1)	1,57 - 1,65	30 m
B7 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR - 2)	2,11 - 2,29	30 m
B8 - Pancromático	0,50 - 0,68	15 m
B9 - Cirrus**	1,36 - 1,38	30 m
B10 - Infravermelho termal (TIR - 1)	10,60 - 11,19	100 m
B11 - Infravermelho termal (TIR - 2)	11,50 - 12,51	100 m

* utilizada para estudo de aerossol e ambiente costeiro; ** usado para estudar as nuvens cirrus

Fonte: NASA (2018)

Como pode ser verificado na Tabela 1, há uma defasagem entre as bandas do Landsat 5 e do Landsat 8. Como exemplo, a banda do infravermelho próximo (B5) deste satélite corresponde à banda B4 do Landsat 5.

Diversos trabalhos recentes foram desenvolvidos utilizando as imagens Landsat para o mapeamento da dinâmica da cobertura vegetal em todo o mundo. Sulieman (2018) utilizou essas imagens para mapear as mudanças no uso e cobertura do solo no Sudão Oriental entre 1973 a 2015, registrando uma redução de 37% da cobertura florestal mais densa e aumento de 20% nas áreas com formação arbustivas. Já Minta et al. (2018) verificaram, ao combinarem o mapeamento de fotografias aéreas e imagens Landsat, que as terras destinadas à agricultura apresentaram uma expansão de 170% no período de 1957 a 2014 na região da Etiópia Central.

A partir da análise de mudanças na cobertura vegetal utilizando imagens de Landsat, importantes estudos foram desenvolvidos na região Amazônica visando mapear a expansão da atividade agropecuária sobre a área de florestas (JAKIMOW et al., 2018; RUFIN et al., 2015)

e de cerrado (BEUCHLE et al., 2015), assim como para fornecer parâmetros para adoção de políticas de preservação dos recursos naturais na região, como o controle de queimadas (ALENCAR et al., 2011) e a preservação da fauna (VILLAMARÍN et al., 2011).

Um dos trabalhos mais relevantes utilizando imagens Landsat para mapear as mudanças na cobertura vegetal foi realizado por Hansen et al. (2013), que desenvolveram mapas com alta resolução espacial (30 m) para avaliar a dinâmica da cobertura florestal em escala global. Os autores identificaram que no período de 2000 a 2012, ocorreu uma perda nas áreas de florestas de 2,3 milhões km², em contrapartida a um ganho de apenas 0,8 milhões de km².

Outro ponto a destacar é a utilização de índices de vegetação (IVs) como indicadores das mudanças no uso e cobertura do solo, em especial o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que pode ser obtido a partir de imagens Landsat (Li et al., 2013; SILVEIRA et al., 2017).

3.3.1 Índices de Vegetação - IVs

Os IVs podem ser descritos como transformações lineares de bandas espectrais, em que, geralmente, utiliza-se informações das faixas do vermelho (Ver) e infravermelho próximo (IPV) do espectro eletromagnético. Estas bandas correspondem a mais de 90% da variação da resposta espectral da vegetação (EIPHANIO et al., 1996). Estes índices têm sido amplamente empregados para o monitoramento da dinâmica da cobertura vegetal devido a refletância diferencial da clorofila nos comprimentos de onda do visível e infravermelho (MARCUSSE et al., 2010).

De acordo com Baret e Guyot (1991) os IVs podem ser agrupados em duas grandes classes, com destaque para os principais IVs encontrados na literatura: a primeira classe compreende os índices na forma da razão, os quais incluem o Índice de Vegetação por Razão Simples (RVI), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e Índice de Vegetação Realçado (EVI). Na segunda classe incluem os índices caracterizados pela distância ortogonal, onde destacam-se o Índice de Vegetação Perpendicular (PVI), Índice de Vegetação por Diferença Ponderada (WDVI) e Índice de Vegetação Global (GVI).

Neste sentido, o NDVI é um dos índices mais utilizados como indicador das alterações na cobertura vegetal principalmente por apresentar alta sensibilidade tanto para a vegetação esparsa quanto para a vegetação mais densa. A assinatura espectral da vegetação verde e sadia mostra evidente contraste entre a região do visível, principalmente na banda do vermelho, e do

infravermelho próximo. Quanto maior for este contraste, de maneira geral, maior o vigor da vegetação (MOREIRA, 2012; SHIMABUKURO et al., 1999).

O NDVI baseia-se neste princípio, o qual combina informações espectrais da banda do vermelho e do infravermelho próximo, conforme apresentado na expressão abaixo (ROUSE et al., 1974):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IVP} - \text{Ver}}{\text{IVP} + \text{Ver}}$$

em que: o NDVI corresponde ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (adimensional); o IVP é a energia refletida na região do infravermelho próximo (em μm); e o Ver a energia refletida na região do vermelho do espectro eletromagnético (em μm).

O NDVI apresenta variação de -1 a 1, em que áreas ocupadas por vegetação mais densa tendem a apresentar valores de NDVI próximos à unidade. Áreas compostas por recursos hídricos ou com presença de nuvens têm maior refletância na banda no vermelho em relação à banda do infravermelho próximo e, portanto, apresentam valores próximos a -1 (CORDEIRO et al., 2017). Em solo exposto ou vegetação mais rala obtêm-se valores positivos, em um intervalo entre 0,10 a 0,20, pois nesta condição ocorre maior absorção da radiação na faixa do infravermelho próximo, o que explica os baixos valores de NDVI nestas áreas (LIMA et al., 2013).

O uso do NDVI na diferenciação de diferentes usos do solo tem apresentado bons resultados. Silva et al. (2014) verificaram a predominância de valores de NDVI entre 0 e 0,61 em aproximadamente 66% da área estudada de uma sub bacia do rio Espinhas, entre 2000 e 2010. Os resultados foram coerentes com o aumento de área com vegetação mais rala e solo exposto na área.

Cordeiro et al. (2017) utilizaram a análise de agrupamento para definir regiões homogêneas que apresentam os mesmos valores de NDVI, visando quantificar o uso e cobertura do solo no estado do Rio Grande do Sul. O método empregado possibilitou mapear os principais grupos vegetais que ocorrem neste Estado, mostrando-se uma técnica de classificação de imagens simples e eficiente para a definição de regiões homogêneas com a mesma variação temporal de NDVI.

Janssen et al. (2018) utilizaram o NDVI para detectar as mudanças na cobertura florestal em Gana, no período de 1984 a 2015, a partir de dados históricos de imagens Landsat, constatando redução dos valores de NDVI nas áreas de floresta em decorrência do aumento do

desmatamento em áreas de preservação. Por outro lado, também foi verificado aumento dos valores de NDVI associados a áreas de silvicultura, em detrimento da redução da área de pastagem.

Nourani et al. (2017) utilizaram os valores de NDVI como parâmetros de entrada para a modelagem hidrológica, visando quantificar os efeitos da variação da cobertura vegetal na resposta hidrológica das bacias hidrográficas. Os resultados foram considerados aceitáveis para a previsão do escoamento superficial, com valores médios do coeficiente de Nash-Sutcliffe de até 0,87. Análise semelhante foi desenvolvida por Ohana-Levi et al. (2015), que obtiveram coeficiente de determinação (r^2) de 0,93 na relação entre os valores de NDVI com o volume do escoamento superficial.

3.4 Plataforma Google Earth Engine - GEE

Um dos grandes destaques na atualidade para o processamento de dados oriundos de sensoriamento remoto é a plataforma computacional de processamento de dados em nuvem Google Earth Engine (GEE). Lançada em 2013, o objetivo desta iniciativa é a realização de análises científicas em escala global (GEE, 2017).

O GEE possui um catálogo de dados disponíveis na própria interface. Alguns exemplos dos dados disponíveis são: produtos derivados de sensoriamento remoto do satélite Landsat, grande parte dos conjuntos de dados derivados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), dados dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2, informações de precipitação global, dados de elevação, entre outras (GORELICK et al., 2017).

O GEE trabalha com linguagens de programação JavaScript e Python, em que os usuários podem desenvolver os próprios scripts através do *Google Earth Engine Code Editor* (<https://code.earthengine.google.com>) (Figura 2) e realizar o upload da base de dados próprios ou podem também utilizar scripts já disponíveis na biblioteca e adaptá-los para as regiões de interesse. Apesar de todos os dados estarem na nuvem, as análises podem ser exportadas para serem armazenadas no computador do usuário (GEE, 2017).

O catálogo de dados é atualizado a cada 24 horas, com uma taxa de atualização de cerca de 6.000 imagens por dia, em conformidade com as novas aquisições de dados dos satélites em operação (GORELICK et al., 2017).

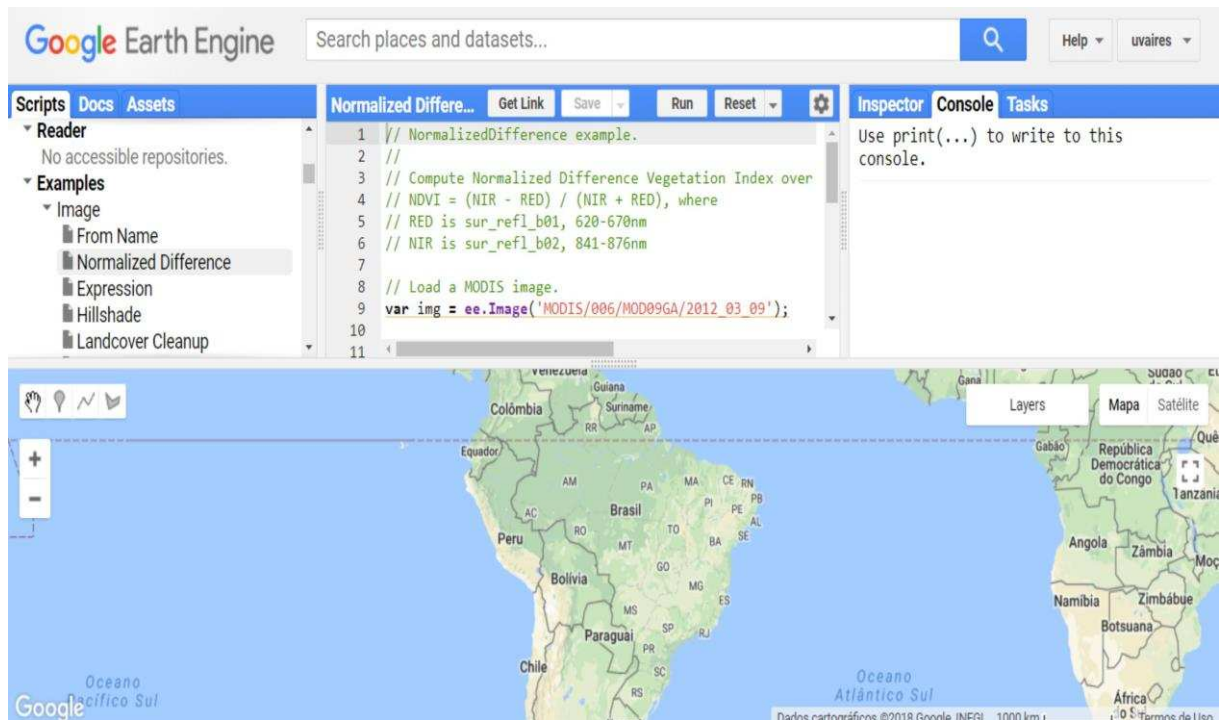


Figura 2 – Interface de programação do Google Earth Engine - GEE.

Fonte: GEE (2017)

As operações matemáticas passíveis de serem realizadas na interface da plataforma GEE variam de simples análises estatísticas até operações mais complexas, como a geoestatística, o aprendizado de máquina e o processamento de imagens. A grande vantagem do processamento de dados na plataforma GEE consiste na velocidade de processamento e rapidez de acesso a informações em escala global, além do armazenamento de dados em nuvem, que diminui a necessidade de espaço em computadores (GORELICK et al., 2017).

O GEE tem sido utilizado em uma ampla variedade de pesquisas científicas, abrangendo tópicos como a mudança na cobertura florestal em escala global (HANSEN et al., 2013), dinâmica da água doce superficial disponível no mundo (PEKEL et al., 2016), estimativa de produção agrícola (LOBELL et al., 2015), mapeamento da expansão urbana (ZHANG et al., 2015), mapeamento do risco de áreas susceptíveis a enchentes (COLTIN et al., 2016) e no uso de índices de vegetação para análises da dinâmica da cobertura vegetal (HUANG et al., 2017; HUNTINGTON et al., 2016; KELLEY et al., 2017).

4. METODOLOGIA

4.1 A bacia hidrográfica do rio Manhuaçu

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Manhuaçu, com área de drenagem de 9.189 km² (CBH, 2017), que constitui a Unidade de Gestão de Recursos Hídricos 6 (UGRH 6 - Manhuaçu) na divisão hidrográfica estabelecida pelo Estado de Minas Gerais, pertencendo à bacia hidrográfica do rio Doce (Figura 3).

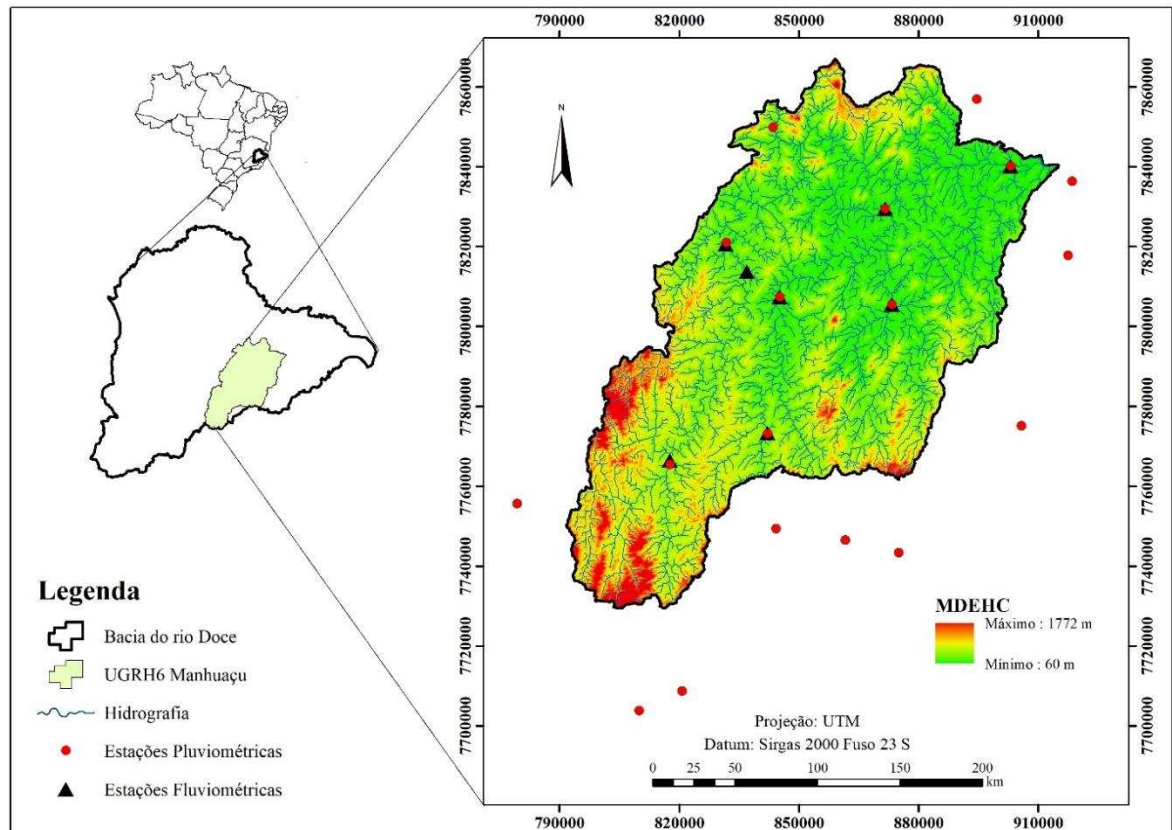


Figura 3 – Localização da bacia hidrográfica do rio Manhuaçu; estações pluviométricas com influência na área de estudo e estações fluviométricas; hidrografia gerada a partir do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC).

Localizada nas regiões da Zona da Mata e Vale do Rio Doce, a bacia do rio Manhuaçu apresenta como seus principais afluentes os rios Mutum, São Luís, Pocrane, Itueto, José Pedro e Capim. O rio Manhuaçu nasce na Serra da Seritinga, na divisa dos municípios de Divino e São João do Manhuaçu, possuindo uma extensão de 347 km (CBH, 2017).

A precipitação anual média da bacia é de 1.152 mm, sendo que no mês de dezembro é observado, em média, o maior volume pluviométrico, com 240 mm. Por outro lado, o menor volume pluviométrico é observado no mês de junho, com um valor acumulado médio de 15 mm (ANA, 2017).

De acordo com a classificação de Köppen, elaborado por Alvares et al. (2013), há a predominância na área de estudo dos climas: Aw (clima tropical com estação seca no período de inverno), CW_a (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente) e CW_b (clima temperado úmido com inverso seco e verão temperado).

A temperatura média da bacia do rio Manhuaçu é de 21,9 °C, enquanto as temperaturas máxima e mínima são de 28,5°C e 17,0°C, respectivamente, sendo que a temperatura máxima ocorre no mês de janeiro, e a mínima, no mês de julho (INMET, 2017).

Cerca de 51,3% da área de estudo é representada pelo Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd), seguido do Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (PVAe) com 28,9%. O Neossolo Litólico Eutrófico (RLe) e o Neossolo Litólico Distrófico (RLd) representam 11,2% e 2,7%, respectivamente, tendo-se ainda a presença do Latossolo Amarelo Distrófico (LAd), que ocupa 3,9% da área (Figura 4).

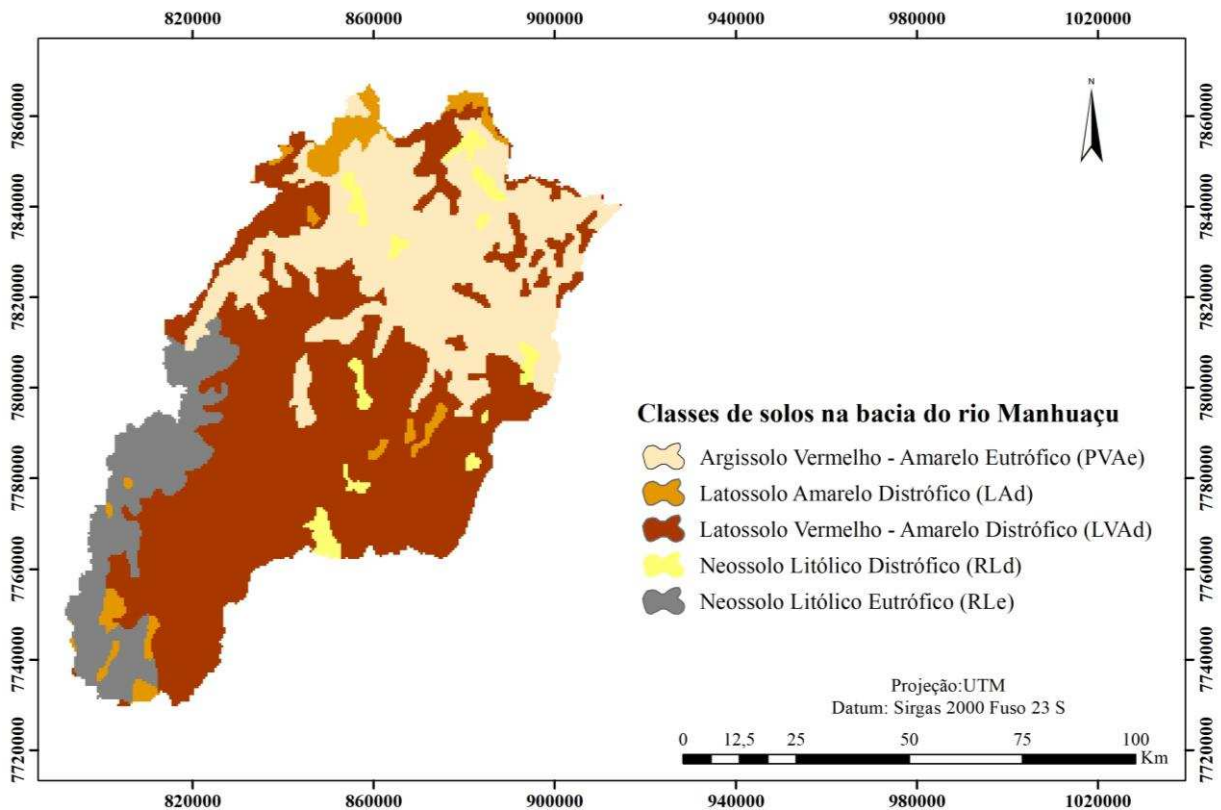


Figura 4 – Mapa dos solos predominantes na bacia do rio Manhuaçu.

Fonte: FEAM (2013).

4.2 Obtenção e tratamento da base de dados hidrológicos

Foram utilizadas no estudo oito estações fluviométricas (Tabela 2) e 18 pluviométricas (Tabela 3), sendo que 10 dessas, apesar de estarem localizadas fora do limite da bacia, possuem

influência na área de estudo. Os dados hidrológicos de cada estação foram obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb), da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017).

Tabela 2 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	Área (km ²)	Anos e nível de consistência	
			Bruto	Consistido
56960005	Fazenda Vargem Alegre	1.030	2006 - 2015	1984 - 2005
56976000	Fazenda Bragança	2.279	2006 - 2015	1974 - 2005
56978000	Santo Antônio do Manhuaçu	2.368	2006 - 2015	1966 - 2005
56983000	Dores de Manhumirim	112	2006 - 2014	1939 - 2005
56988500	Ipanema	1.106	2006 - 2013	1938 - 2005
56989001	Mutum	1.188	2006 - 2014	1974 - 2005
56989400	Assaraí - Montante	3.179	2006 - 2013	1977 - 2005
56990000	São Sebastião da Encruzilhada	8.814	2006 - 2014	1939 - 2005

Tabela 3 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	Anos e nível de consistência	
		Bruto	Consistido
02042000	Carangola*	2006 - 2015	1935 - 2005
02041005	Caiana*	2006 - 2015	1940 - 2005
02041018	Usina Fortaleza*	2003 - 2016	1956 - 2002
02041013	Iúna*	2003 - 2016	1954 - 2002
02041017	Santa Cruz - Caparaó*	2003 - 2016	1956 - 2002
02042017	Matipó*	2006 - 2015	1968 - 2005
02041048	Fazenda Vargem Alegre	2006 - 2016	1983 - 2005
02041008	Dores do Manhumirim	2006 - 2016	1946 - 2005
02041023	Afonso Claudio - Montante*	2006 - 2016	1967 - 2005
01941019	Mutum	2006 - 2016	1983 - 2005
01941000	Ipanema	2006 - 2016	1941 - 2005
01941009	Ibituba*	2006 - 2015	1968 - 2005
01941011	Santo Antônio do Manhuaçu	2006 - 2015	1970 - 2005
01941006	Assaraí - Montante	2006 - 2016	1946 - 2005
01941003	Baixo Guandu*	2006 - 2015	1941 - 2005
01941010	São Sebastião da Encruzilhada	2006 - 2016	1967 - 2005
01941021	Alvarenga	2006 - 2016	1995 - 2016
01941004	Resplendor - Jusante*	2006 - 2016	1941 - 2005

* Estações localizadas fora do limite da área de estudo.

As estações pluviométricas foram identificadas através da aplicação do método dos polígonos de Thiessen. Este método consiste em ligar os postos pluviométricos da bacia por uma reta e, posteriormente, são traçadas as mertrizes em todos os lados do polígono traçado

previamente. As áreas de influência de cada posto são então determinadas pelo encontro das mediatrizes e as divisas geográficas da bacia hidrográfica (MELLO e SILVA, 2013).

Com base na necessidade de utilização de séries históricas mais longas e atualizadas, principalmente para fins de aplicação dos testes de tendências, decidiu-se utilizar os dados brutos das estações fluviométricas e pluviométricas a partir de 2005, conforme as Tabelas 1 e 2, com exceção das estações pluviométricas de Usina Fortaleza, Iúna e Santa Cruz Caparaó, que apresentavam dados consistidos apenas até 2002.

A necessidade de utilização de séries históricas mais longas refere-se ao fato de que, em séries mais curtas, as flutuações naturais dos dados hidrológicos podem ser atribuídas como comportamento não estacionário (WMO, 1988).

Destaca-se, ainda, que, antes da utilização dos dados brutos, fez-se uma criteriosa análise de todos os dados visando à detecção de erros que pudessem afetar as análises hidrológicas a serem realizadas.

4.2.1 Preenchimento de falhas dos dados hidrológicos

O preenchimento de falhas dos dados pluviométricos e fluviométricos foi realizado empregando-se o método da regressão linear simples (Equação 1), conforme recomendado por Bier et al. (2017), sendo que no caso dos dados de vazão considerou-se apenas uma estação de apoio a montante ou a jusante da estação com falha. Para as séries de precipitação foi selecionada a estação de apoio mais próxima e, preferencialmente, com altitude semelhante em relação à estação com falhas a serem preenchidas.

$$y = a_0 + b_i x_i \quad (1)$$

em que: y representa os dados da estação que se deseja preencher as falhas, x_i são os dados da estação de apoio, a_0 e b_i são os coeficientes de ajuste do modelo linear.

Foi adotado, ainda, como critério mínimo para a escolha das estações de apoio, a obtenção de coeficiente de determinação (r^2) maior ou igual a 0,7 entre a estação com falha em seus registros e a estação de apoio selecionada para fins do preenchimento (PRUSKI et al., 2004)

O preenchimento de falhas dos dados pluviométricos foi feito na escala mensal e, para os dados fluviométricos, na escala anual, tendo sido feito o preenchimento das séries anuais das vazões máxima, mínima e média.

No Apêndice A estão apresentadas as estações de apoio adotadas para o preenchimento de falhas das estações pluviométricas e fluviométricas, bem como o valor de r^2 da regressão linear ajustada.

4.2.2 Individualização das áreas de drenagem das estações fluviométricas

Com o objetivo de avaliar a influência da alteração da cobertura vegetal no regime de vazões na bacia do rio Manhuaçu, foi realizada a individualização da área de drenagem a montante de cada uma das oito estações fluviométricas utilizadas no estudo, como apresentado na Figura 5.

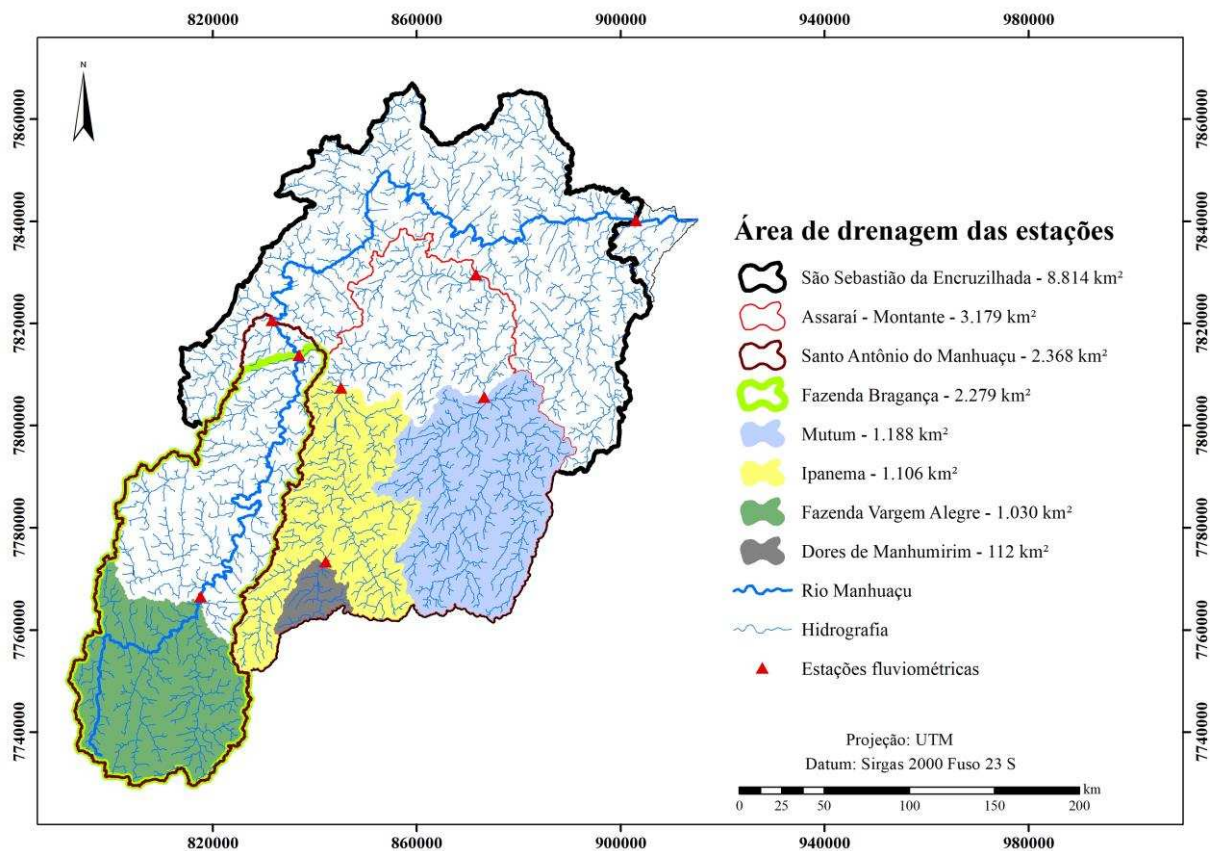


Figura 5 – Individualização da área de drenagem a montante de cada uma das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

A fim de se verificar os efeitos que a urbanização pode influenciar no registro dos dados de vazão, realizou-se a identificação, em imagens do Google Earth, dos locais de instalação das estações fluviométricas (Figura 6).

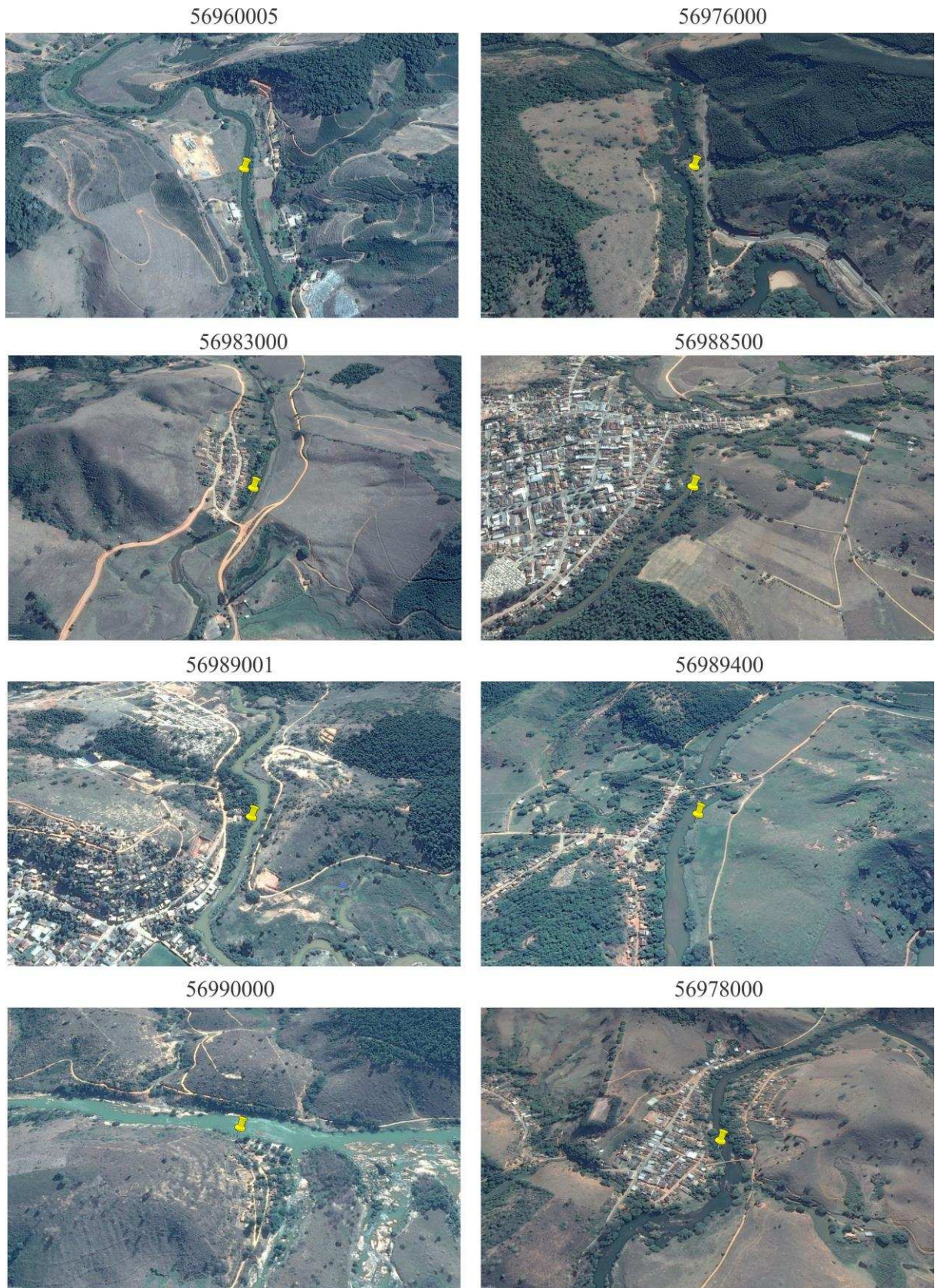


Figura 6 – Localização das estações fluviométricas na bacia do rio Manhuaçu.
Fonte: Google Earth (2018)

Também foram levantadas as informações dos diversos usos da água na bacia, em especial as outorgas para irrigação e abastecimento humano, e barramentos com regularização que podem afetar o regime de vazões.

4.2.3 Definição do ano hidrológico da bacia do rio Manhuaçu

O ano hidrológico foi definido, inicialmente, com base nos dados de precipitações e vazões médias mensais de cada uma das estações adotadas no estudo, tendo sido feito um refinamento com base na análise dos meses de ocorrência da Q_7 (vazão mínima de 7 dias consecutivos) para oito estações fluviométricas utilizadas neste estudo. Esta análise foi feita para toda a série histórica de dados disponível e também considerando apenas os últimos 10 anos de registro dos dados fluviométricos, com intuito de avaliar o comportamento mais recente da Q_7 .

A análise da Q_7 foi realizada com o auxílio do software SisCAH 1.0 (Sistema Computacional para Análise Hidrológica), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH), disponível gratuitamente no endereço eletrônico <http://www.gprh.ufv.br>. O software permite a obtenção de um relatório contendo a data de ocorrência da Q_7 para cada ano, o que auxilia na identificação do ano hidrológico (GPRH, 2017). No Apêndice B apresenta-se o percentual da ocorrência da Q_7 nos diferentes meses do ano para cada uma das oito estações fluviométricas localizadas na área de estudo.

Após a análise dos dados de ocorrência da Q_7 para a série histórica das estações fluviométricas, verificou-se maior incidência nos meses de setembro e outubro, porém observaram-se ocorrências isoladas em diversos outros meses do ano. O comportamento observado, considerando os dados mais recentes de Q_7 (últimos 10 anos), não foi diferente, com maior concentração nos meses de setembro e outubro. Desta forma, o ano hidrológico para a bacia do rio Manhuaçu foi definido como sendo de novembro a outubro, com semestre chuvoso concentrado nos meses de novembro a abril e o semestre seco de maio a outubro.

4.3 Análise da estacionariedade das séries de vazão e precipitação

Para verificação do comportamento dos dados hidrológicos ao longo do tempo, foram aplicados os testes não paramétricos de Mann Kendall e Pettitt, considerando-se o nível de significância de 5% (MUDBHATKAL et al., 2017).

Na aplicação do teste de Mann Kendall, a variável S , para uma série de n dados, é calculada a partir da somatória dos sinais sgn da diferença, par a par, de todos os valores da

série x_i em relação aos valores subsequentes da série dados x_j , expresso na Equação 2 (SALVIANO et al., 2016).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

Quando $n \geq 10$, a variável S pode ser comparada com uma distribuição normal, sendo que a variância $\text{Var}(S)$, pode ser expressa pela Equação 3.

$$\text{Var}(S) = n \frac{(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i (i-1)(2_i+5)}{18} \quad (3)$$

em que: t_i representa a quantidade de repetições de uma extensão i .

A tendência observada na série histórica é considerada crescente ou decrescente de acordo com os valores positivos e negativos do índice Z_{MK} , respectivamente. De acordo com o sinal de S , o índice Z_{MK} é calculado a partir da Equação 4.

$$\begin{aligned} Z_{MK} &= \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; \text{ para } S > 0 \\ Z_{MK} &= 0; \text{ para } S = 0 \\ Z_{MK} &= \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; \text{ para } S < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Rejeita-se a hipótese H_a , ou seja, a série apresenta tendência temporal, se o valor absoluto de Z_{MK} for superior ao valor tabelado $Z_{\alpha/2}$.

O teste de Pettitt, além de ser utilizado para a verificação da estacionariedade dos dados, permite, no caso das séries que não apresentarem estacionariedade, identificar o período de ocorrência da mudança no comportamento do regime de vazões e de precipitação. Esse teste não paramétrico é uma versão da estatística de Mann-Whitney $U_{t,N}$, aplicado para verificar se duas amostras x_1, \dots, x_t e x_{t+1}, \dots, x_n pertencem a uma mesma população, sendo a estatística do teste $U_{t,N}$ obtida através da Equação 5 (ULIANA et al., 2015).

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_t - x_j) \quad \text{para } t=2, \dots, N \quad (5)$$

O valor máximo absoluto de $|U_{t,N}|$ indica a posição da possível mudança no comportamento da série de dados. Desta forma, a estatística $k_{(t)}$ (Equação 6) representa o ponto de mudança t associado ao nível de significância p (Equação 7).

$$k_{(t)} = \max_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad (6)$$

$$\rho \cong 2 \exp \left\{ \frac{-6(k_t^2)}{(N^3 + N^2)} \right\} \quad (7)$$

em que: p representa o valor crítico associado ao nível de significância α e N é o número de amostras da série. Se p for menor que o nível de significância α adotado, a hipótese nula (H_0 = não há mudanças significativas nas séries de dados) é rejeitada.

A análise de tendência foi aplicada com o intuito de se estudar o comportamento da vazão e da precipitação nas áreas de drenagem de cada uma das oito estações fluviométricas ao longo do tempo. Para tanto, foi verificada a hipótese de estacionariedade anual, considerando ano hidrológico e sazonal (período seco e chuvoso) para as séries de vazões médias, e para as vazões máximas e mínimas apenas o ano hidrológico. Para as séries de precipitação foram aplicados os testes de análise de tendência para a precipitação anual (ano hidrológico) e sazonal, em cada uma das 18 estações pluviométricas com influência na área de estudo.

A análise de tendência nas séries de dados pluviométricos é fundamental para a verificação da influência da cobertura vegetal no regime de vazões, pois as precipitações constituem no principal fator que contribui para o aumento ou redução das vazões. Dessa forma, se a precipitação apresenta comportamento estacionário ao longo do tempo, pode-se atribuir a modificação do comportamento do regime de vazões a outros fatores, dentre os quais, a cobertura vegetal (MUDBHATKAL et al., 2017).

4.4 Obtenção e classificação das imagens de NDVI

Os valores de NDVI foram calculados com base em imagens Landsat *Surface Reflectance* (SR) desde 1984 pois, a partir deste ano, essa categoria das imagens Landsat apresenta resolução espacial de 30 m, além de correções radiométrica e atmosférica (USGS, 2017).

Essas correções são fundamentais para a representação real da superfície terrestre, pois eliminam as variações devido a erros na detecção dos sensores e na transmissão de dados, bem como aqueles devidos aos fenômenos de espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética (HE et al., 2018).

Foram utilizadas imagens Landsat 5 TM para o período de 1984 a 2010 e Landsat 8 OLI para os anos de 2013 e 2014, período correspondente à base de dados de vazão utilizada no

estudo. Apesar de as imagens Landsat 7 TM+ estarem disponíveis a partir de 1999 e existirem imagens correspondentes ao período de defasagem temporal entre o Landsat 5 e 8, não foi possível a sua utilização pois havia muitas falhas nas imagens causadas pelo problema com o *Scan Line Corrector* (SLC) a bordo do satélite, na região da área de estudo.

4.4.1 Processamento dos dados na plataforma GEE

O cálculo do NDVI e o processamento das imagens Landsat foram realizados na plataforma GEE. O *script* utilizado para obtenção das informações foi adaptado de Google Earth Engine API (GEE, 2017), que apresenta diversos exemplos de *scripts* para manipulação de dados no GEE, sendo possível a edição desses para obtenção de informações de uma área específica.

O *script* completo utilizado encontra-se no Anexo A, o qual exemplifica a obtenção dos dados para o ano de 2014 utilizando o Landsat 8, sendo que, para a obtenção dos dados para outros anos, modificam-se apenas o sensor e o período de interesse.

No *script* utilizado, podem-se destacar duas funções de grande auxílio para a obtenção das imagens, em especial devido à ocorrência de nuvens. Através da banda CFmask, disponível nas imagens de Landsat SR, a qual é derivada de um método desenvolvido por Zhu e Woodcock (2012), é possível detectar e remover as nuvens presentes nas imagens (Função 1).

```
var remover = Imagem.map(function(img) {
    var mask = img.select(['cfmask']).neq(4)
    return img.updateMask(mask)
});
```

Função (1)

Porém, este processo resulta em locais onde não há informações na imagem (NoData) e, desta forma, a segunda função adotada objetiva preencher estas lacunas. Para isto, utilizou-se todas as imagens de um período de interesse e gerou-se uma única imagem mediana pixel a pixel, conforme a Função 2. As imagens utilizadas para realizar este procedimento correspondem aquelas disponíveis no mesmo intervalo em foi calculado os valores de NDVI.

```
var median = ee.Image(remover.median())
```

Função (2)

Este procedimento permite o preenchimento das lacunas, pois, como se trabalha com imagens de diferentes períodos, há a possibilidade de obter imagens que, em um determinado período, não havia nuvens no local onde foi detectado o problema. Ressalta-se que quanto mais

longo o período de análise, maiores as chances de se obter uma imagem final sem a presença de falhas.

A Figura 7 exemplifica o resultado do procedimento da remoção de nuvens empregado.

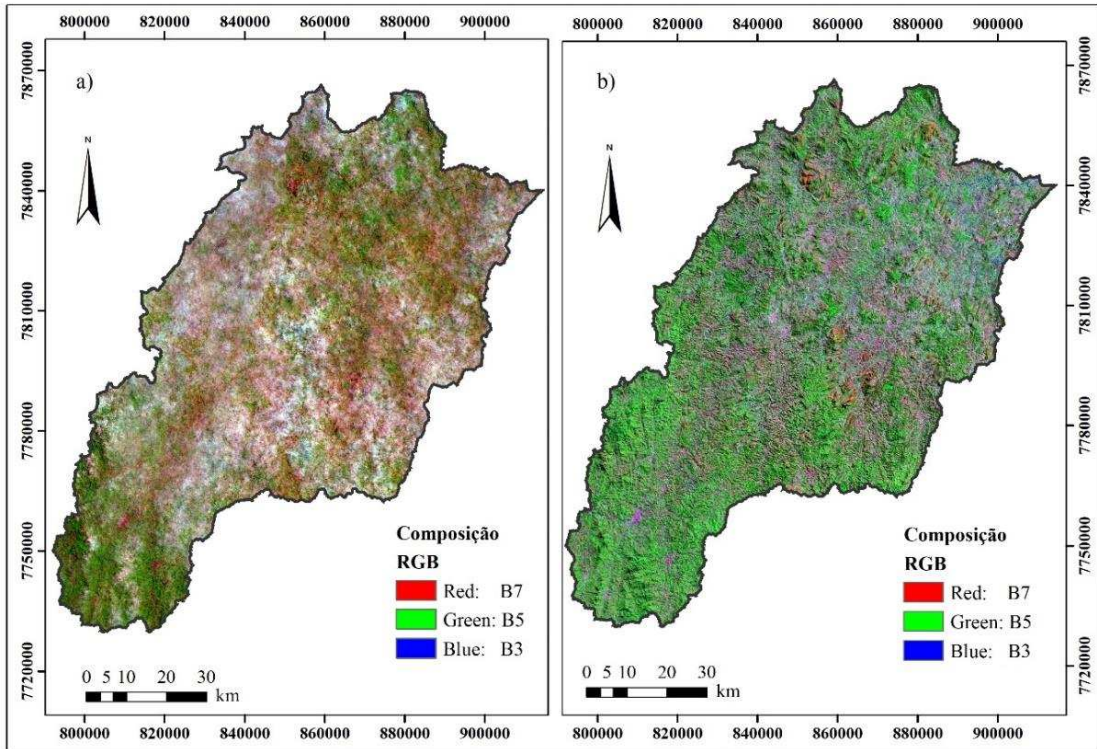


Figura 7 – Composição das imagens Landsat 8 sem (a) e com (b) a aplicação do procedimento para a remoção de nuvens considerando o período de junho a agosto de 2014.

Esse procedimento gera uma imagem mediana pixel a pixel dos valores de NDVI, portanto, quanto mais curto o intervalo utilizado de meses utilizado menor os problemas relacionados com a variabilidade dos dados de NDVI em função do regime pluviométrico.

O cálculo do NDVI foi feito conforme o apresentado na Função 3:

```
var NDVI = median.expression(
    '(NIR - RED) / (NIR + RED)', {
        'NIR': median.select('B5'),
        'RED': median.select('B4')
    });
```

Função (3)

Destaca-se que para executar o comando utilizando imagens Landsat 5, houve a necessidade de se modificar as bandas empregadas para o cálculo do NDVI, sendo que a banda NIR (infravermelho próximo) deste sensor é a B4 e a banda RED (banda do vermelho) é a banda B3.

Após o processamento dos dados, os valores de NDVI gerados no GEE foram exportados no formato *raster* para o Google Drive (Figura 8), conforme a Função 4 e classificados nas classes de interesse com apoio do software ArcGIS® Desktop 10.5:

```
Export.image.toDrive({image:ndvi,
                      description:'NDVI_2015_setembro',
                      scale:30,
                      region: area
});
```

Função (4)

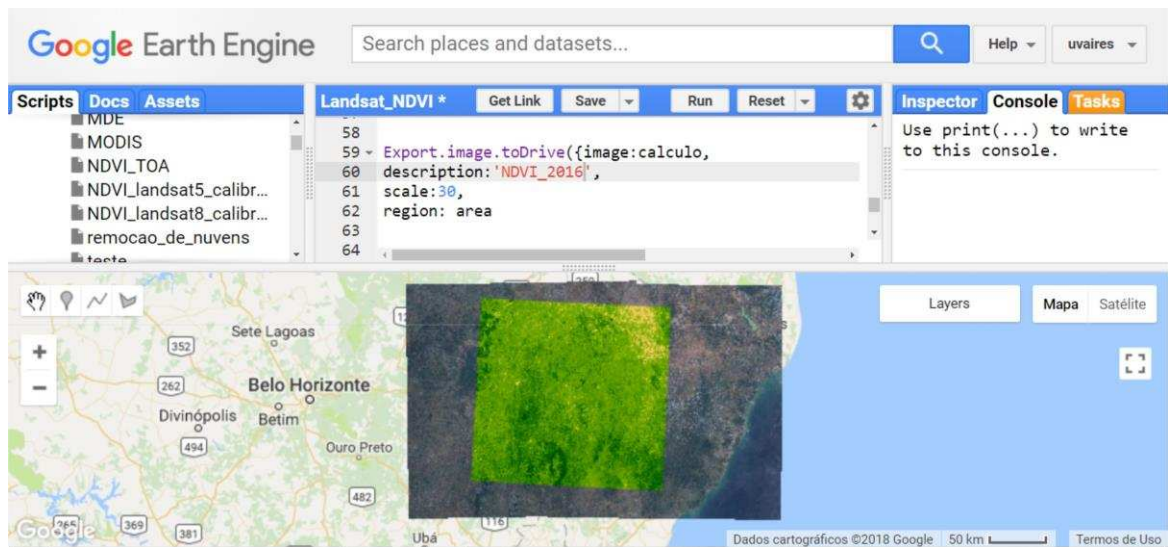


Figura 8 – Exemplo de execução de script para o cálculo do NDVI na plataforma GEE para a bacia do rio Manhuaçu.

4.4.2 Classificação dos valores de NDVI

Os valores de NDVI foram classificados nas classes de pastagem e vegetação com alto vigor devido à influência destes usos do solo no regime hidrológico em bacias hidrográficas. A área urbana não foi considerada devido à dificuldade de se estabelecer um intervalo de valores de NDVI que correspondesse adequadamente a essa classe, pois a resposta espectral dessa é similar às áreas com solo exposto (MOREIRA, 2012), além da sua pequena representatividade na área de estudo (Figura 4).

Como os valores de NDVI apresentam alta sensibilidade em relação aos índices pluviométricos, para melhorar a diferenciação entre vegetação com alto vigor (áreas de floresta nativa ou plantada, formação arbustiva, culturas perenes) e pastagem foi adotado como período para fins de cálculo do NDVI, os três meses mais secos do ano. Este procedimento foi adotado pois, no período chuvoso, áreas com gramíneas, como por exemplo a Braquiária (*Brachiaria*

decumbens), podem apresentar valores de NDVI similares aos da vegetação com alto vigor (HOTT et al., 2016). Também foi utilizado o critério mínimo de três meses para se obter um número razoável de imagens na área que possibilitasse a remoção das nuvens.

Os intervalos de NDVI que representam as classes de pastagem e vegetação com alto vigor na área de estudo foram definidos separadamente para cada ano devido à alta sensibilidade dos valores de NDVI em relação ao volume precipitado (OHANA-LEVI et al., 2015), que é diferente em cada período utilizado para compor o cálculo do NDVI.

Para a definição dos intervalos foram escolhidos locais onde as áreas com vegetação com alto vigor e pastagem não sofreram alterações expressivas ao longo do tempo, com base nas imagens de Landsat que foram utilizadas para o cálculo do NDVI. Para cada ano utilizaram-se 200 amostras na forma de polígonos, criados no software ArcGIS@ Desktop 10.5. Para cada amostra, os valores mínimos e máximos de NDVI de cada classe de uso do solo foram obtidos aplicando-se a função *Zonal Statistic As Table* do módulo *Spatial Analyst* do ArcGIS.

Essa função permite extrair os valores das imagens de NDVI que correspondem aos locais onde foram feitas as amostragens e gera um arquivo no formato *table* com a média dos valores máximo e mínimo de toda a amostragem. Estes valores foram utilizados como sendo os intervalos de NDVI para a classificação das áreas de vegetação com alto vigor e pastagem.

Na Tabela 4 apresenta-se o intervalo de NDVI utilizado para a classificação das áreas de interesse, bem como o trimestre mais seco de cada ano. A presença de anos faltantes na Tabela 4 foi devido à impossibilidade de se obter uma imagem média livre de nuvens, pois apesar de o *script* utilizado possibilitar a remoção das nuvens, ainda é necessário que existam partes nas outras imagens que estejam livres de nuvens para o preenchimento das falhas, como discutido no item 4.3.1, o que não foi possível nestes casos.

Tabela 4 – Intervalos de NDVI utilizados para a classificação, e intervalo de meses em que foram obtidas as imagens

Anos	Pastagem		Vegetação com alto vigor		Intervalo de meses utilizado	Precipitação * (mm)
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior		
1986	0,23	0,70	0,70	1,00	maio - jul	55,92
1987	0,27	0,71	0,71	1,00	maio - jul	42,12
1988	0,20	0,61	0,61	1,00	jul - set	13,41
1992	0,32	0,64	0,64	1,00	jun - ago	68,14
1996	0,31	0,68	0,68	1,00	jun - ago	21,49
1997	0,29	0,72	0,72	1,00	jun - ago	30,47
1998	0,29	0,73	0,73	1,00	maio - jul	50,47
1999	0,15	0,64	0,64	1,00	maio - jul	20,39
2002	0,21	0,60	0,60	1,00	jun - ago	31,30
2004	0,25	0,63	0,63	1,00	jul - set	49,04
2005	0,23	0,59	0,59	1,00	jun - ago	78,44
2006	0,20	0,55	0,55	1,00	jun - ago	27,04
2007	0,19	0,53	0,53	1,00	jun - ago	10,87
2009	0,26	0,65	0,65	1,00	jul - set	91,29
2013	0,20	0,72	0,72	1,00	jun - ago	44,51
2014	0,17	0,64	0,64	1,00	jun - ago	57,53

* Precipitação acumulada da área de estudo referente ao intervalo de meses utilizados.

Para a verificação da acurácia da classificação foi calculado o índice Kappa (K) (Equação 8). Coletaram-se, visualmente, 500 amostras pontuais nas imagens Landsat, para as classes de pastagem e vegetação com alto vigor, devido à grande representatividade das mesmas, e 100 amostras para outros usos. Estas amostras foram consideradas verdadeiras e utilizadas para o estabelecimento da matriz de confusão. Ressalta-se que as amostras utilizadas não são coincidentes com as amostras utilizadas para definir os intervalos de cada classe.

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^y x_{ii} - \sum_{i=1}^y (x_{i+} x_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^y (x_{i+} x_{+i})} \quad (8)$$

em que K é uma estimativa do coeficiente Kappa, adimensional, x_{ii} é o valor da linha i e coluna i; x_{i+} é a soma da linha i e x_{+i} é a soma da coluna i da matriz de confusão; n representa o número total de amostras que representam o uso e ocupação do solo observado, e y o número total de classes.

A interpretação dos valores obtidos para K foi realizada com base na classificação apresentada na Tabela 5, proposta por Landis e Koch (1977).

Tabela 5 – Interpretação dos valores de K

K	Classificação
< 0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito Boa
0,80 – 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977)

Após a verificação da acurácia da classificação, as imagens foram convertidas para o formato *Shapefile* para a quantificação da área, em km², ocupada por pastagem e vegetação com alto vigor.

4.5 Obtenção dos valores de Evapotranspiração real (ET) a partir do sensor MODIS

A variável independente evapotranspiração (ET) utilizada neste estudo foi obtido da base de dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que disponibiliza o produto *MODIS Global Evapotranspiration Project* (MOD16A2), contendo os valores de evapotranspiração real com resolução espacial de 1 km e temporal de 8 dias, e está disponível a partir do ano 2000 (SRIVASTAVA et al., 2017).

O produto MOD16A2 é derivado do algoritmo desenvolvido por Mu et al. (2013), o qual combina informações da superfície terrestre, como a umidade do solo e evaporação, a partir de sensoriamento remoto e dados diários meteorológicos provenientes de reanálise do *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO). O MOD16A2 é uma revisão do algoritmo proposto por Cleugh et al. (2007), que por sua vez, é uma adaptação da equação de Penman-Monteith para aplicação com dados derivados de sensoriamento remoto.

A obtenção dos dados de ET real foi feita a partir da plataforma GEE, em que o script completo utilizado foi adaptado de GEE (2017). No Anexo B apresenta-se o script utilizado e a representação da obtenção dos dados de ET para o ano hidrológico de 2014. Para os outros anos, e também para a obtenção dos valores de ET real para os semestres seco e chuvoso as modificações foram feitas na Função 5, referente ao período de análise.

```
var evap = ee.ImageCollection('MODIS/NTSG/MOD16A2/105')
    .filterDate("2013-11-01", "2014-10-31")
```

Função (5)

```
.filterBounds(local);
```

Os dados de ET real disponíveis no GEE estão em kg.m^{-2} sendo necessário realizar um somatório dos dados diários para a obtenção do valor anual e do período sazonal, e também a utilização do fator de conversão de 0,1 para transformar em mm, conforme apresentado na Função 6.

```
var EVP = ee.Image(evap.sum());
var ET = ee.Image(EVP).select(['ET']).clip(local);
var calculo = ET.expression(
    '(BAND * 0.1)', {
    'BAND': ET.select('ET')
});
```

Função (6)

O comando *var ET* foi utilizado para selecionar a banda de evapotranspiração do sensor MODIS, pois o produto MOD16A2 fornece outras bandas contendo informações, por exemplo, do fluxo de calor latente (LE).

Os valores de ET foram exportados para o Google Drive (Figura 9) no formato *raster*, conforme apresentado na Função 7.

```
Export.image.toDrive({image:calculo,
    description:'evapo_2014_anual',
    scale:1000,
    region: local
});
```

Função (7)

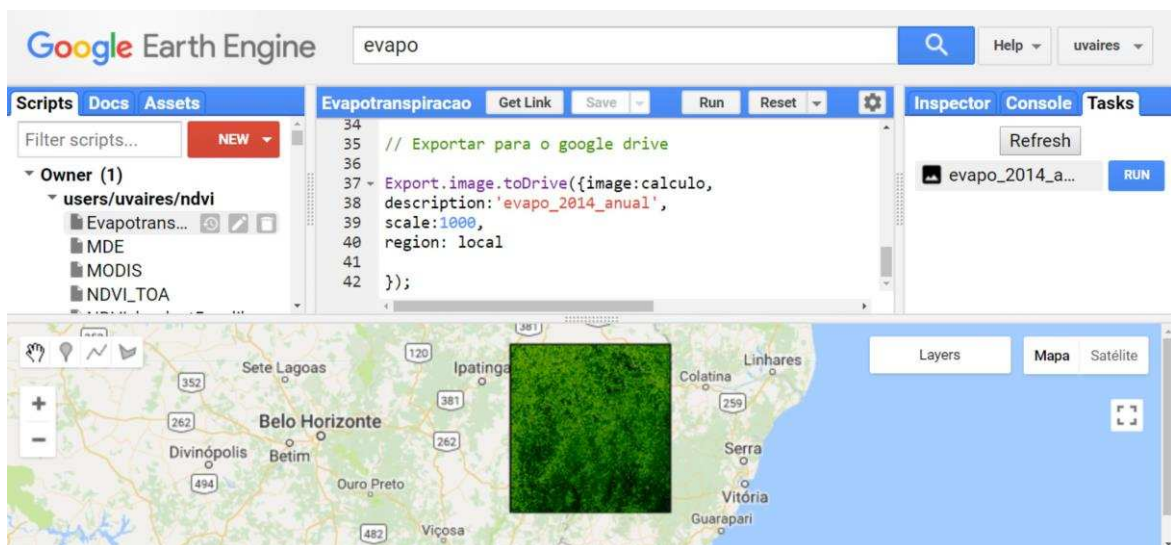


Figura 9 – Exemplo de execução do script para obtenção de ET real na plataforma GEE para a bacia do rio Manhuaçu.

O *raster* com valores de ET real gerados foi recortado para cada uma das áreas de drenagem das estações fluviométricas com apoio do Software ArcGIS® Desktop 10.5, sendo que os valores utilizados nos modelos de regressão múltipla representam o valor médio de ET real na área de drenagem de cada uma das oito estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

Optou-se pela utilização dos valores de evapotranspiração derivados de sensoriamento remoto devido a pouca cobertura das estações meteorológicas que realizam medições as variáveis necessárias para o cálculo de ET real na região de estudo, sendo que existe apenas uma estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada na bacia do rio Manhuaçu, instalada no município de Caparaó, MG.

4.6 Análise da influência da alteração da cobertura vegetal no regime de vazões

As séries temporais de valores de áreas com pastagem e vegetação com alto vigor foram confrontadas com o regime de vazões por meio de análise de regressão múltipla, conforme a Equação 10.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

em que x_{i1} , x_{i2} , ..., x_{ip} são os valores das variáveis explicativas conhecidas e β_0 , β_1 , ..., β_p são os coeficientes da regressão.

As variáveis explicativas (x) empregadas no ajuste dos modelos da regressão múltipla, bem como as vazões que foram utilizados como variável dependente (y), são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Variáveis dependentes e independentes dos modelos de regressão múltipla ajustados para fins de análise da influência da alteração da cobertura vegetal no regime de vazões na bacia do rio Manhuaçu

Variável dependente (y)	Variáveis independentes (x)		
	Variável independente 1	Variável independente 2	Variável independente 3
Q _{máx} anual	Área de pastagem (%) (Ap)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	
	Área de pastagem (%) (Ap)	P mês mais chuvoso (mm) (Pmc)	
	Área de pastagem (%) (Ap)	P máxima diária (mm) * (Pma)	
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P mês mais chuvoso (mm) (Pmc)	
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P máxima diária anual (mm) * (Pmd)	
	Área de pastagem (%) (Ap)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	ET semestre chuvoso (mm) (ETsc)
	Área de pastagem (%) (Ap)	P mês mais chuvoso (mm) (Pmc)	ET semestre chuvoso (mm) (ETsc)
	Área de pastagem (%) (Ap)	P máxima diária anual (mm) * (Pmd)	ET semestre chuvoso (mm) (ETsc)
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	ET semestre chuvoso (mm) (ETsc)
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P mês mais chuvoso (mm) (Pmc)	ET semestre chuvoso (mm) (ETsc)
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P máxima diária anual (mm) (Pmd) *	ET semestre chuvoso (mm) (ETsc)
Q _{máx} anual média de 3 anos	Área de pastagem média de 3 anos (%) (Ap _{3 anos})	P semestre chuvoso média de 3 anos (mm) (Psc _{3anos})	
	Área de pastagem média de 3 anos (%) (Ap _{3 anos})	P mês mais chuvoso média de 3 anos (mm) (Pmc _{3anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 3 anos (%) (Av _{3 anos})	P semestre chuvoso média de 3 anos (mm) (Psc _{3anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 3 anos (%) (Av _{3anos})	P mês mais chuvoso média de 3 anos (mm) (Pmc _{3anos})	
Q _{máx} anual média de 5 anos	Área de pastagem média de 5 anos (%) (Ap _{5 anos})	P semestre chuvoso média de 5 anos (mm) (Psc _{5anos})	
	Área de pastagem média de 5 anos (%) (Ap _{5 anos})	P mês mais chuvoso média de 5 anos (mm) (Pmc _{5anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 5 anos (%) (Av _{5anos})	P semestre chuvoso média de 5 anos (mm) (Psc _{5anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 5 anos (%) (Av _{5anos})	P mês mais chuvoso média de 5 anos (mm) (Pmc _{5anos})	
Q _{mín} anual	Área de pastagem (%) (Ap)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	
	Área de pastagem (%) (Ap)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	ET semestre seco (mm) (ET _{ss})
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	ET semestre seco (mm) (ET _{ss})
Q _{mín} anual média de 3 anos	Área de pastagem média de 3 anos (%) (Ap _{3 anos})	P semestre chuvoso média de 3 anos (mm) (Psc _{3anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 3 anos (%) (Av _{3 anos})	P semestre chuvoso média de 3 anos (mm) (Psc _{3anos})	
Q _{mín} anual média de 5 anos	Área de pastagem média de 5 anos (%) (Ap _{5 anos})	P semestre chuvoso média de 5 anos (mm) (Psc _{5anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 5 anos (%) (Av _{5anos})	P semestre chuvoso média de 5 anos (mm) (Psc _{5anos})	
Q _{méd}	Área de pastagem (%) (Ap)	P total anual (mm) (Pa)	
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P total anual (mm) (Pa)	
	Área de pastagem (%) (Ap)	P total anual (mm) (Pa)	ET anual (mm) (ETa)
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P total anual (mm) (Pa)	ET anual (mm) (ETa)

Continua...

Tabela 6 – Continuação...

Q _{méd} média de 3 anos	Área de pastagem média de 3 anos (%) (Ap _{3 anos})	P total anual média de 3 anos (mm) (Pa _{3anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 3 anos (%) (Av _{3 anos})	P total anual média de 3 anos (mm) (Pa _{3anos})	
Q _{méd} média de 5 anos	Área de pastagem média de 5 anos (%) (Ap _{5 anos})	P total anual média de 5 anos (mm) (Pa _{5anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 5 anos (%) (Av _{5anos})	P total anual média de 5 anos (mm) (Pa _{5anos})	
Q _{méd} semestre chuvoso	Área de pastagem (%) (Ap)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	
	Área de pastagem (%) (Ap)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	ET semestre chuvoso (mm) (ETsc)
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	ET semestre chuvoso (mm) (ETsc)
Q _{méd} do semestre chuvoso média de 3 anos	Área de pastagem média de 3 anos (%) (Ap _{3 anos})	P semestre chuvoso média de 3 anos (mm) (Psc _{3anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 3 anos (%) (Av _{3anos})	P semestre chuvoso média de 3 anos (mm) (Psc _{3anos})	
Q _{méd} do semestre chuvoso média de 5 anos	Área de pastagem média de 5 anos (%) (Ap _{5 anos})	P semestre chuvoso média de 5 anos (mm) (Psc _{5anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 5 anos (%) (Av _{5anos})	P mês mais chuvoso média de 5 anos (mm) (Pmc _{5anos})	
Q _{méd} semestre seco	Área de pastagem (%) (Ap)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	
	Área de pastagem (%) (Ap)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	ET semestre seco (mm) (ET _{ss})
	Área de vegetação com alto vigor (%) (Av)	P semestre chuvoso (mm) (Psc)	ET semestre seco (mm) (ET _{ss})
Q _{méd} do semestre chuvoso média de 3 anos	Área de pastagem média de 3 anos (%) (Ap _{3 anos})	P semestre chuvoso média de 3 anos (mm) (Psc _{3anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 3 anos (%) (Av _{3 anos})	P semestre chuvoso média de 3 anos (mm) (Psc _{3anos})	
Q _{méd} do semestre chuvoso média de 5 anos	Área de pastagem média de 5 anos (%)	P semestre chuvoso média de 5 anos (mm) (Psc _{5anos})	
	Área de vegetação com alto vigor média de 5 anos (%)	P semestre chuvoso média de 5 anos (mm) (Psc _{5anos})	

* utilizado nas estações que apresentaram picos de vazão

Ressalta-se que a variável independente precipitação máxima diária anual (P_{md}) foi utilizada apenas nas estações 5696005 e 56976000, as quais registraram vazões máximas inconsistentes quando comparado com estações de apoio localizadas a montante e a jusante, conforme pode ser analisado no Apêndice C, que apresenta os fluviogramas das vazões máxima, mínima e média de cada uma das oito estações pluviométricas utilizadas neste estudo. Neste caso, a utilização da variável precipitação na escala mensal certamente não representaria o pico de vazão por já apresentar um processo natural de suavização dos dados em decorrência da utilização da média de todos os dados de precipitações diárias.

As estações pluviométricas das quais foram extraídas as informações dos volumes precipitados utilizados nas variáveis explicativas dos modelos de regressão podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Estações pluviométricas utilizadas para obtenção dos valores de precipitação utilizadas nas variáveis explicativas dos modelos

Estação pluviométrica		Estações pluviométricas	
Código	Nome	Código	Nome
56988500	Ipanema	01941000	Ipanema
		02041008	Dores de Manhumirim
56976000	Fazenda Bragança	01941000	Ipanema
		02041048	Fazenda Vargem Alegre
56960005	Fazenda Vargem Alegre	02041048	Fazenda Vargem Alegre
		02042017	Santa Cruz Caparão
		02041017	Matipó
56983000	Dores de Manhumirim	02041008	Dores de Manhumirim
56989001	Mutum	01941019	Mutum
		02041008	Dores de Manhumirim
		02041023	Afonso Claudio - Montante
56978000	Santo Antônio do Manhuaçu	01941011	Santo Antônio do Manhuaçu
		01941000	Ipanema
		02041008	Dores de Manhumirim
		02041048	Fazenda Vargem Alegre
56989400	Assaraí - Montante	02042017	Matipó
		01941006	Assaraí - Montante
		01941019	Mutum
		01941000	Ipanema
		02041008	Dores de Manhumirim

Continua...

Tabela 7 – Continuação...

		01941010	São Sebastião da Encruzilhada
		01941006	Assaraí - Montante
		01941011	Santo Antônio do Manhuaçu
56990000	São Sebastião da Encruzilhada	01941000	Ipanema
		01941019	Mutum
		02041008	Dores de Manhumirim
		02041048	Fazenda Vargem Alegre

As estações pluviométricas utilizadas foram aquelas que apresentaram maior influência na área de drenagem de cada uma das oito estações pluviométricas utilizadas neste estudo, identificadas através da aplicação do método dos polígonos de Thiessen. Foram utilizados os valores médios do volume pluviométrico das estações, com exceção da variável precipitação máxima diária anual, em que se utilizou o maior valor observado nas estações.

4.6.1 Avaliação dos modelos de regressão múltipla

A verificação do ajuste dos modelos de regressão múltipla (MRL) foi feita considerando os valores obtidos para o coeficiente de determinação ajustado (R_a^2), que varia de 0 a 1, sendo que o valor unitário representa ajuste perfeito dos dados.

O uso do R_a^2 permite uma melhor interpretação da exatidão do modelo, principalmente em equações que envolvam um número maior de variáveis independentes. Isto porque a inclusão de variáveis explicativas no modelo, mesmo que tenham pouca relação explicativa com a variável dependente, aumenta o valor do coeficiente de determinação (R^2). Este problema foi contornado com a utilização do R_a^2 , pois esse faz um ajuste considerando a inclusão de mais variáveis, conforme a Equação 10 (HAIR et al., 2009).

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-(k+1)} \right) (1 - R^2) \quad (10)$$

em que, n representa o tamanho da amostra; k é a quantidade de variáveis explicativas do modelo; e R^2 é o coeficiente de determinação. Nota-se que a inclusão de mais variáveis com pouco poder explicativo resulta em uma diminuição do R_a^2 , pois aumenta a quantidade de variáveis k, sem aumentar substancialmente o R^2 .

Na avaliação dos MRL também foi realizada a análise de variância (ANOVA), para estudo da significância do modelo, e o teste t student para analisar quais variáveis explicativas

(parâmetros β) acrescentaram informações relevantes aos modelos que apresentaram o melhor desempenho.

Foi adotado o nível de significância (α) de 10%, por representar um risco aceitável, devido à grande variabilidade natural entre as variáveis utilizadas nos modelos (SUN et al., 2017).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise de tendência das séries de vazão e precipitação

Os resultados da aplicação dos testes de Mann Kendall e Pettitt para fins de análise do comportamento dos dados de vazão e precipitação ao longo do tempo na bacia do rio Manhuaçu, para todas as estações analisadas, estão apresentados no Apêndice D.

Na Figura 10 são apresentadas as estações fluviométricas com comportamento não estacionário na bacia do rio Manhuaçu.

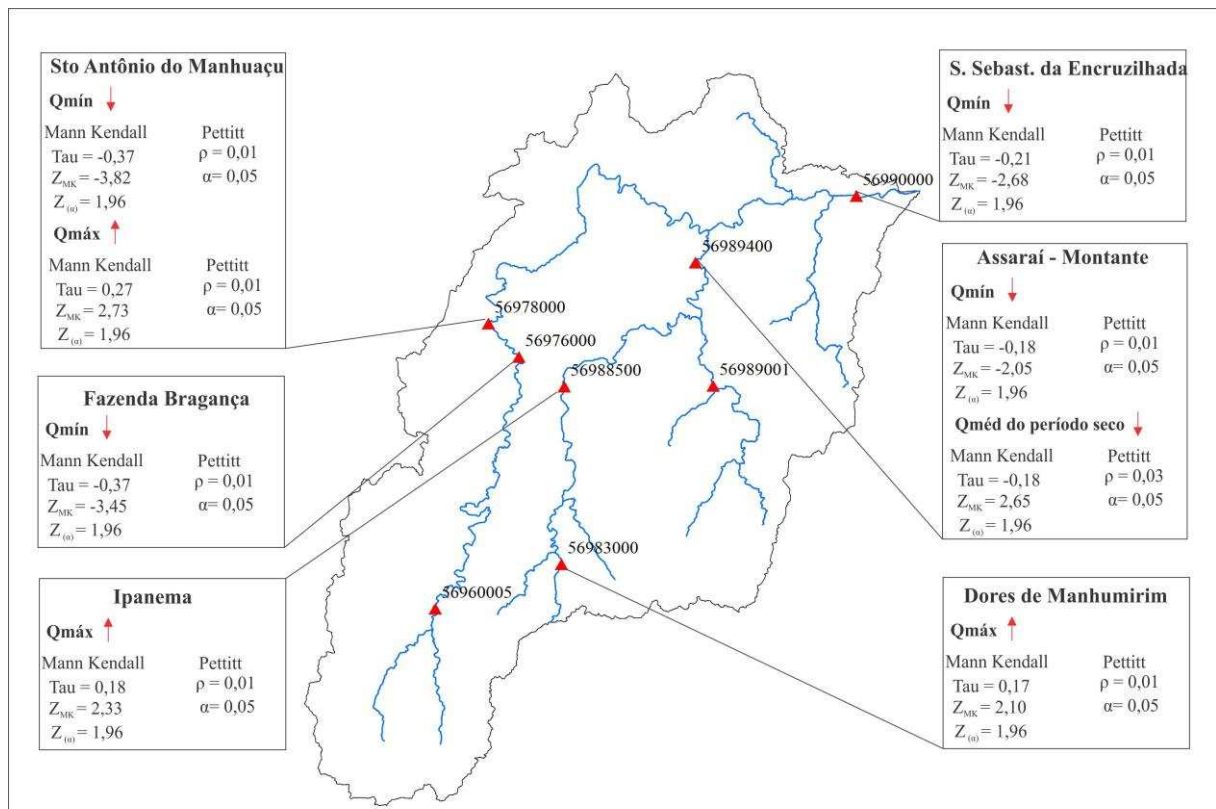


Figura 10 – Estações fluviométricas que apresentaram comportamento não estacionário do regime de variação de vazões na bacia do rio Manhuaçu.

Observa-se, na Figura 10, que seis estações fluviométricas apresentaram comportamento não estacionário ao longo do tempo, sendo que o regime de vazões máxima e mínima foram os que mais apresentaram modificações ao longo do tempo, com tendências de aumento e redução, respectivamente.

A estação 56989400, além de apresentar tendência de redução da vazão mínima, também apresentou tendência de redução da vazão média do período seco. Além desta estação, somente a estação 56978000 apresentou comportamento não estacionário em dois regimes de vazões (máxima e mínima).

A Figura 11 apresenta o período de mudança do comportamento dos dados hidrológicos das estações fluviométricas que apresentaram comportamento não estacionário, identificados pelo teste de Pettitt.

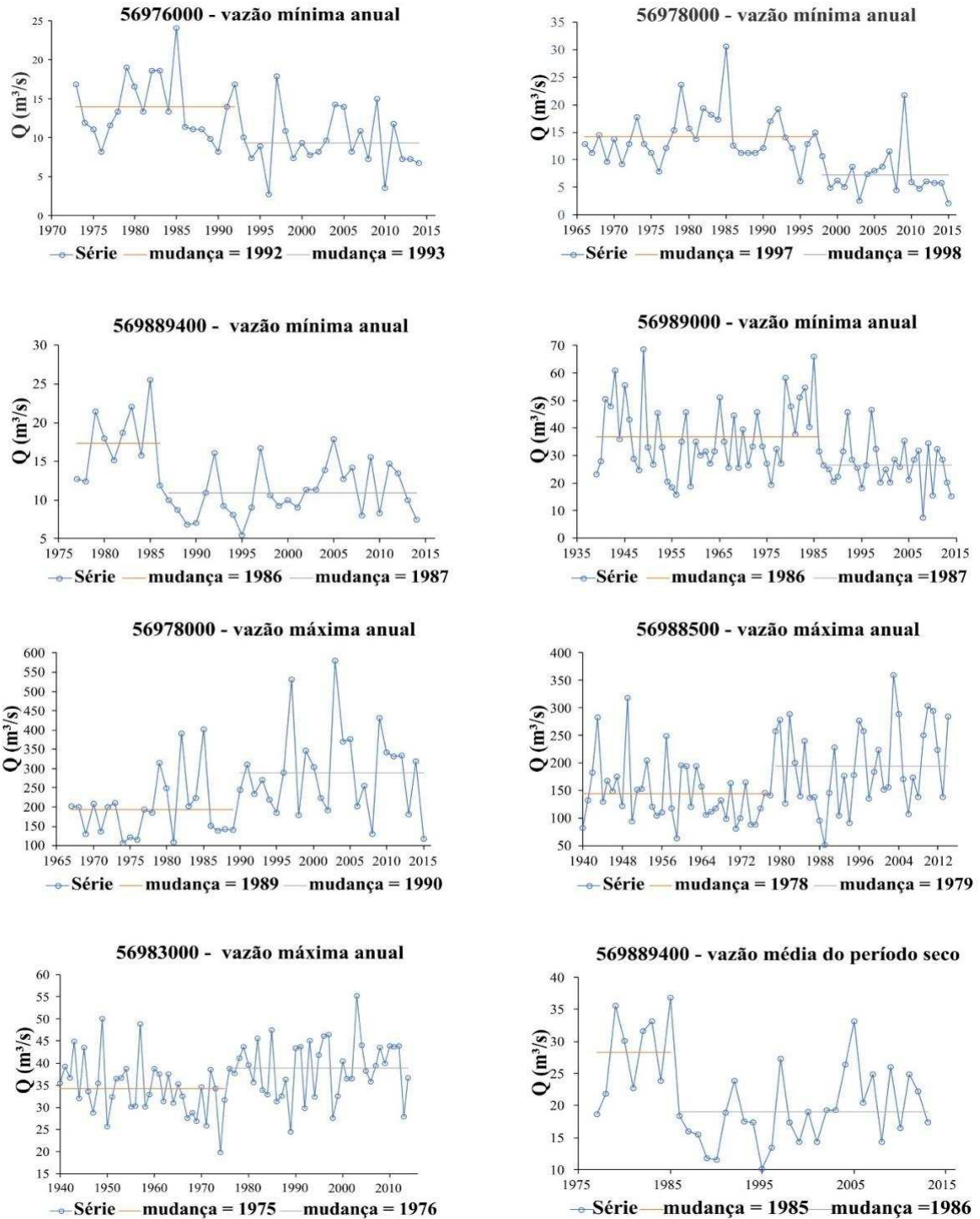


Figura 11 – Período de mudança nos dados hidrológicos das estações fluviométricas que apresentaram comportamento não estacionário ao longo do tempo, identificados pela aplicação do teste de Pettitt.

Como pode ser verificado na Figura 11, o período de ocorrência das mudanças do comportamento das séries de dados de vazões é bastante distinto. Apenas as estações 569889400 (regime de vazões máxima e mínima) e 56989000 (regime de vazão mínima) apresentaram período de mudança semelhante (1985/86).

A estação 56978000, que apresentou comportamento não estacionário das séries de dados de vazões máxima e mínima, observa-se que o período de mudança foi em 1989/90 para a vazão máxima e 1997/98 para a vazão mínima. Isto pode ser um indicativo que as causas que afetaram o comportamento destes regimes de vazões foram distintas.

Os períodos de mudança no comportamento dos dados hidrológicos, referentes ao regime de vazões máxima, para as estações 56988500 e 5698300 ocorreram em 1978/79 e 1975/76, respectivamente, anterior à criação da base de dados de NDVI utilizadas neste estudo.

Os resultados indicam a importância de estudos do comportamento hidrológicos ao longo do tempo para a gestão e planejamento dos recursos hídricos, principalmente em relação as vazões mínimas, em que baseia-se a outorga de direito do uso da água, fundamental para evitar conflitos do uso atual e futuros da água em bacias hidrográficas (ALMEIDA e CURI, 2016). Como tem sido observado tendência de redução desse regime de vazão, a disponibilidade hídrica também está diminuindo ao longo do tempo, em contrapartida, o volume de água outorgado para os diversos usos na bacia se mantém o mesmo. Isso além de afetar a disponibilidade hídrica na bacia, pode prejudicar substancialmente a qualidade do ambiente aquático (SILVA et al., 2015).

Diversos fatores podem influenciar o comportamento do regime de variação de vazões, sendo que as alterações no regime pluviométrico, o uso antrópico dos recursos hídricos (barramentos, agricultura irrigada, abastecimento urbano, entre outros) e a dinâmica no uso e cobertura do solo são os grandes responsáveis pelo comportamento não estacionário das séries de dados de vazão observado em diversos estudos (BAYER, 2014; COE et al., 2011; FARLEY et al., 2005; MILLY et al., 2008; MUDBHATKAL et al., 2017).

Em relação ao regime pluviométrico foi constatado, através da aplicação dos testes de Mann Kendall e Pettitt (Apêndice D) nas estações pluviométricas com influência na bacia do rio Manhuaçu, que apenas a estação 01941006 apresentou comportamento não estacionário ao longo do tempo. O resultado obtido indicou tendência de aumento ($\tau = 0,18$) referente à precipitação total anual, com período de mudança em 1978/79.

Na Figura 12 pode-se observar a localização e a área de influência da estação pluviométrica que apresentou comportamento não estacionário na bacia do rio Manhuaçu.

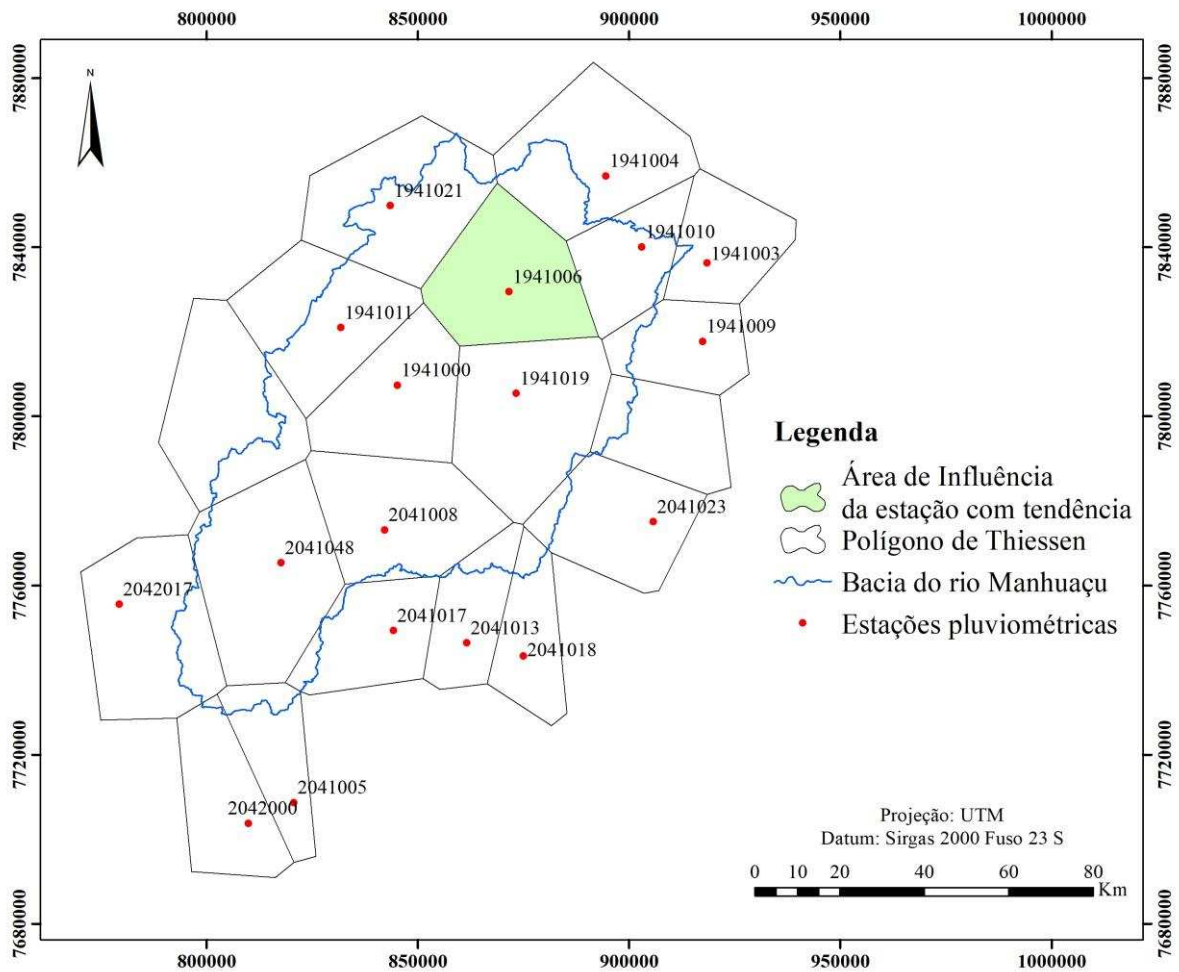


Figura 12 – Área de influência das estações pluviométricas, com destaque para a estação que apresentou comportamento não estacionário.

O fato de apenas uma estação apresentar tendência pode ser um indicativo que outros fatores podem ter influenciado no registro dos dados desta estação. Ávila et al. (2014) apontam que nas análises da estacionariedade, fatores como mudanças na localização dos postos de observação, erros sistemáticos das medições ou até mesmo o crescimento da vegetação ou a urbanização no entorno das estações podem afetar a medição dos dados.

Verifica-se também que a estação fluviométrica (56989400), localizada na área de influência desta estação pluviométrica, apresentou tendência de redução nas vazões mínima e média do período seco, enquanto que os demais regimes de vazões em que foi analisado a hipótese de estacionariedade apresentaram comportamento natural dos dados, o que não correspondendo à tendência de aumento na precipitação registrado.

Desta forma, o regime pluviométrico da bacia do rio Manhuaçu pode auxiliar no entendimento e modelagem do comportamento do regime de vazões, porém, não é possível

concluir que as alterações observadas tenham influência sobre o comportamento não estacionário identificado em algumas estações fluviométricas.

A demanda de água para irrigação pode apresentar influência no regime de vazões, especialmente no regime de vazões mínimas (PRUSKI et al., 2007). Na bacia do rio Manhuaçu o uso da água para irrigação representa 59% da água usada para as diversas atividades humanas na bacia. Tanto que essa bacia está inclusa na segunda etapa do programa de incentivo ao uso racional de água na agricultura (P22) (FUNARBE, 2014).

As áreas com irrigação se concentram na região a jusante da bacia (Figura 13), com outorgas concentradas no rios Itueto e do Capim (IGAM, 2010a). O uso da água para irrigação pode ter influenciado na tendência de redução das vazões mínimas identificada na estação fluviométrica São Sebastião da Encruzilhada (56990000) (Figura 10), pois a demanda por água para esta finalidade é maior no período de estiagem, e também os rios do Capim e Itueto são importantes afluentes do rio principal.

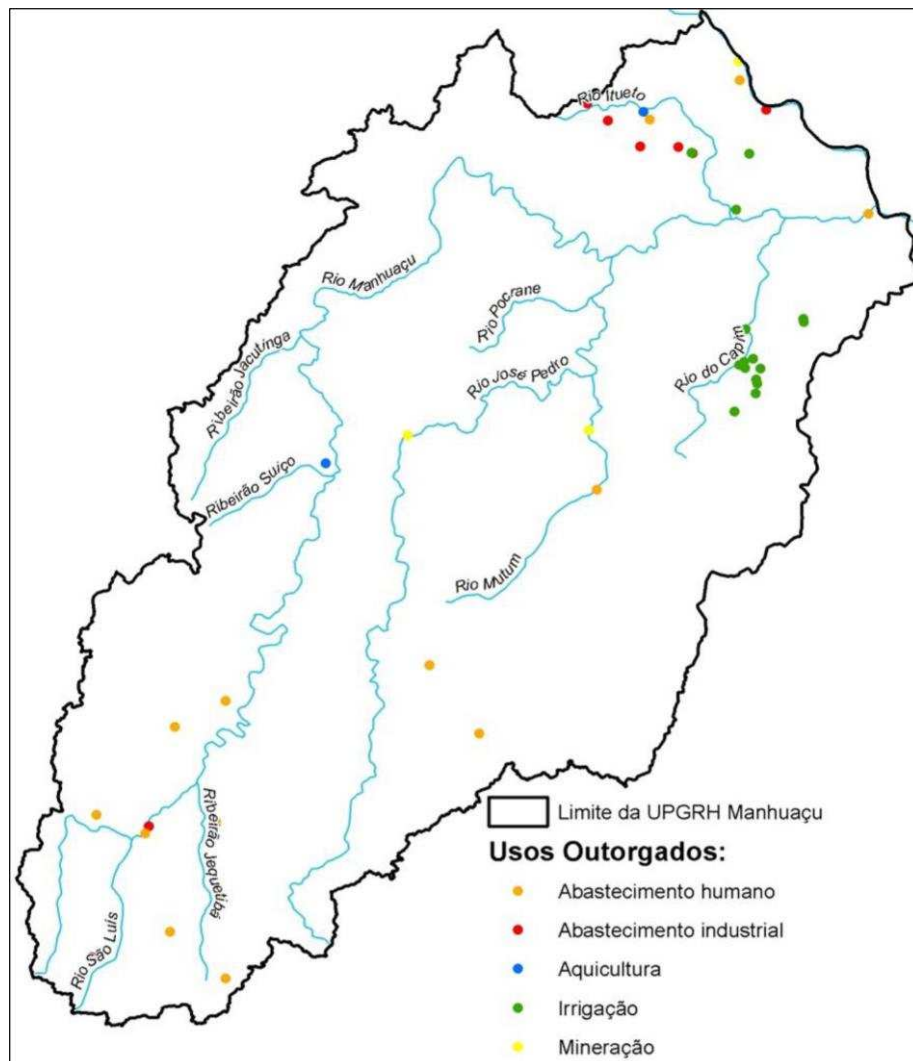


Figura 13 – Usos outorgados na bacia do rio Manhuaçu.
Fonte: IGAM (2010a)

A bacia do rio Manhuaçu possui diversas Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), sendo que a Figura 14 destaca a PCH que pode ter influência nos dados hidrológicos na área de estudo.

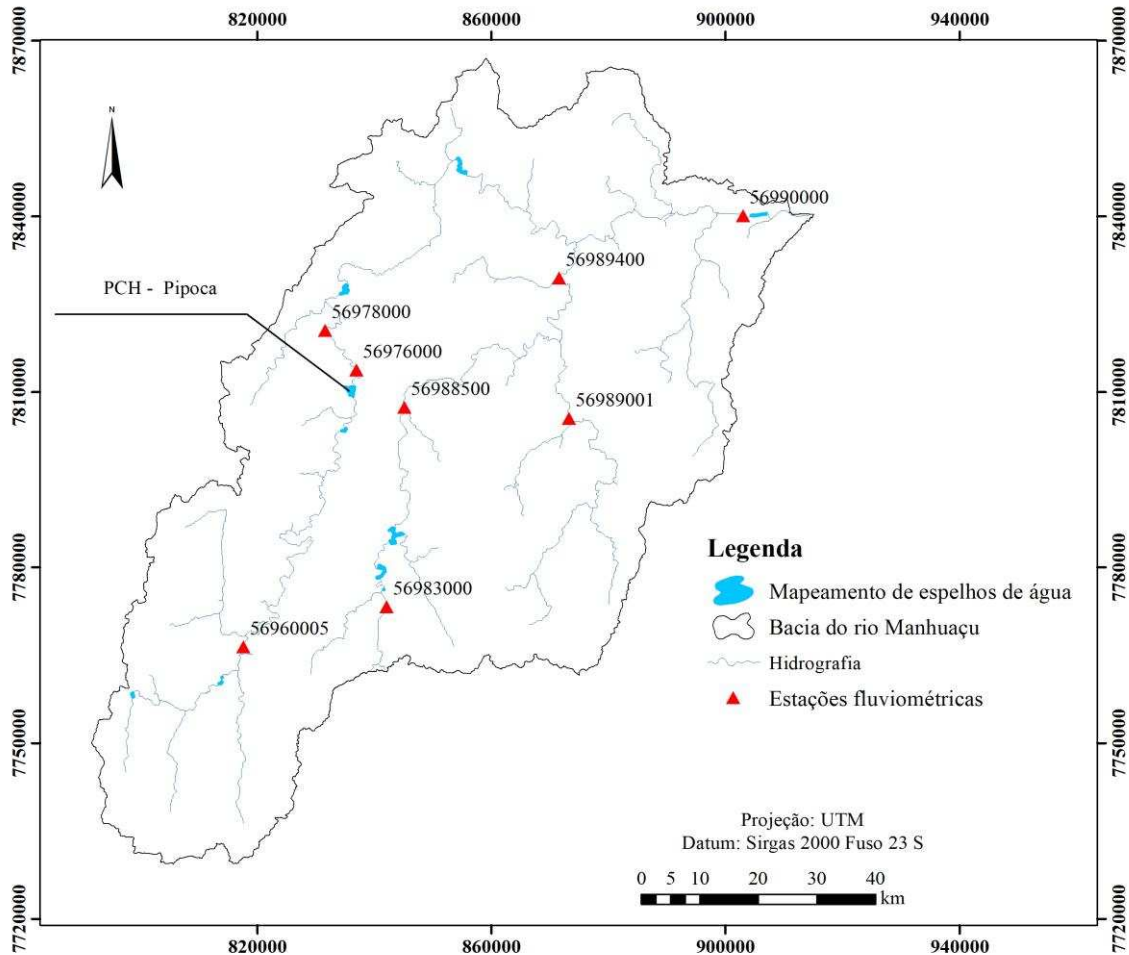


Figura 14 – Mapeamento de espelhos de água na bacia do rio Manhuaçu, com destaque para a PCH Pipoca que pode ter influência no regime de variação de vazões da estação 56976000.

Fonte: ANA (2008)

A PCH Pipoca é a que mais apresenta proximidade com a estação fluviométricas Fazenda Bragança (56976000) e, por consequência, é a que mais pode exercer influência sobre o regime de vazões registrado nesta estação, além se tratar de um barramento com regularização (MINHONI, 2013). No entanto, o início de operações da PCH foi em 2010, desta forma, os impactos no regime de vazões decorrentes da construção da PCH pode necessitar de um período maior de observação de dados para serem identificados, uma vez que a estação fluviométrica instalada a jusante da PCH apresentou tendência de redução da vazão mínima, o que difere do efeito esperado com a construção de barramentos para esta finalidade nos cursos de água.

O uso da água destinado ao abastecimento humano representa 28% na bacia do rio Manhuaçu (IGAM, 2010a), o que não deve resultar em grandes impactos sobre o regime de vazões, pois a população total da bacia é de 300.320 habitantes, distribuída em 26 municípios, sendo a população urbana de 191.797 habitantes, tendo sido observado uma diminuição de 12,3% na população total da bacia entre 1970 e 2010 (IBGE, 2018). Além disso Diem et al. (2018) analisaram bacias hidrográficas que apresentaram aumento na densidade demográfica, com valores de até 377% entre o período de 1990 a 2010, e verificaram que os efeitos do consumo de água urbano não foram perceptíveis, apenas os processos de urbanização foram que afetaram os regimes de vazões.

As localidades onde estão instaladas as estações fluviométricas sofrem pouca influência da expansão urbana, conforme pode ser analisado na Figura 6. Apenas as estações Ipanema (56988500) e Fazenda Vargem Alegre (56960005) podem sofrer alguma interferência do processo de urbanização nos registros dos dados de vazões. Nos estudos de Diem et al. (2018) e Wei et al. (2017) foi constatado que o aumento da área urbana tende a resultar em um acréscimo na ocorrência das vazões máximas, principalmente devido à impermeabilização do solo, acarretando um aumento do escoamento superficial.

Neste sentido, foi verificado que a estação 56988500 apresentou comportamento não estacionário, com tendência de crescimento na vazão máxima, o que pode estar relacionado com a sua proximidade com a área urbana da cidade de Ipanema, MG.

5.2 Análise da obtenção e classificação das imagens de NDVI

A utilização da plataforma GEE para a obtenção dos valores de NDVI se mostrou como uma ferramenta de grande auxílio para o processamento dos dados, uma vez que foi necessário o uso de diversas imagens de Landsat para cada ano, objetivando-se a remoção das nuvens e posterior cálculo do NDVI. Procedimento que levaria muito mais tempo se fosse necessário a obtenção de todas as imagens, pré tratamento (remoção das nuvens), e posteriormente efetuar o cálculo do NDVI.

5.2.1 Avaliação da acurácia da classificação do uso e cobertura do solo

A avaliação da acurácia da classificação do uso e cobertura do solo obtida a partir do cálculo do NDVI, para cada ano em que foi possível a obtenção de imagens da Landsat sem a presença de nuvens na área de estudo, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Avaliação da acurácia da classificação do uso e ocupação do solo para a bacia do rio Manhuaçu

Classificação do uso do solo*	Índice Kappa (K)
1986	0,86
1987	0,80
1988	0,85
1992	0,83
1996	0,88
1997	0,80
1998	0,84
1999	0,80
2002	0,85
2004	0,87
2005	0,80
2006	0,77
2007	0,77
2009	0,79
2013	0,89
2014	0,82

*Não foram realizadas classificações nos anos de 1984, 1985, 1989, 1990, 1991, 1993, 1994, 1995, 2000, 2001, 2003, 2008 e 2010 devido a existência de nuvens nas imagens do Landsat, e para o ano de 2011 e 2012 devido ao problema com as imagens do Landsat 7.

De maneira geral, a acurácia da classificação pode ser considerada excelente, com grande parte dos valores de K acima de 0,8, com exceção apenas dos anos de 2006, 2007 e 2009, que apresentaram valores na categoria considerada muito bom (valores de K entre 0,60 a 0,80). O índice Kappa tem sido amplamente empregado como indicador da acurácia da classificação do uso e cobertura do solo e, apesar da simples aplicação, tem apresentado boa representatividade na verificação da acurácia da classificação do uso e cobertura do solo (RAMACHANDRA et al.; 2018).

Apesar da acurácia relativamente alta obtida para a classificação do uso e cobertura do solo, obteve-se grande dificuldade de estabelecer os intervalos de valores de NDVI para representação das classes de interesse (Tabela 4). Isto ocorreu devido à alta variabilidade de valores de NDVI, que são influenciados diretamente pelo regime pluviométrico em cada período de análise, pois a vegetação apresenta uma resposta imediata em seu vigor após o início das chuvas (BHAVANI et al., 2017).

Para exemplificar, na Figura 15, pode-se analisar os efeitos da precipitação mensal sobre os valores médios de NDVI das estações pluviométricas com maior influência na área de estudo, referente ao ano hidrológico de 2015/16, período em que foi possível a obtenção de imagens Landsat em escala mensal sem a presença de nuvens.

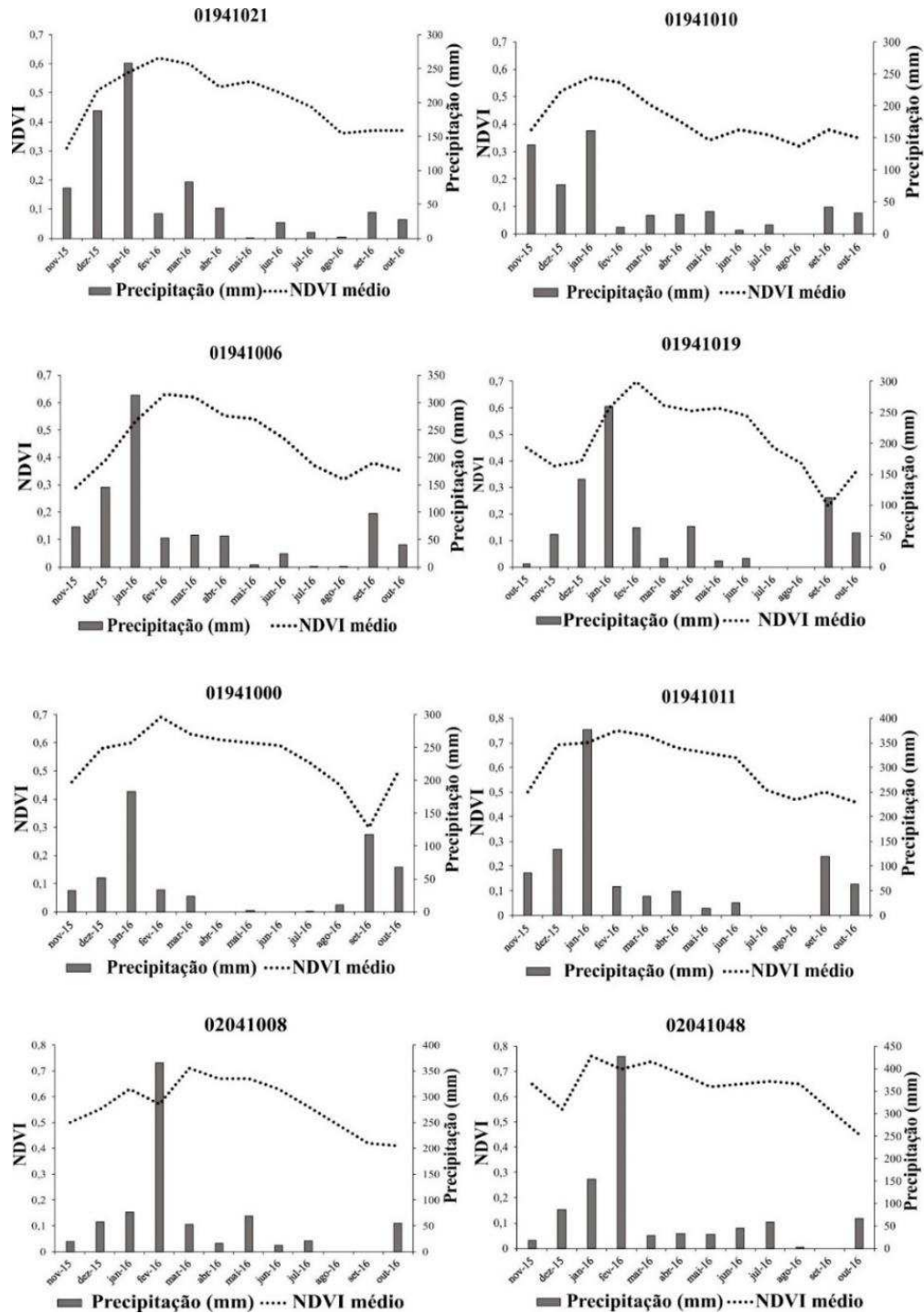


Figura 15 – Valores médios mensais de NDVI e a precipitação média mensal nas estações pluviométricas com maior influência na bacia do rio Manhuaçu.

Nota-se que, após o início da estação chuvosa ocorreu um aumento do valor médio de NDVI e um decaimento gradativo à medida que o volume precipitado foi diminuindo. O NDVI tende a atingir o seu valor máximo, em geral, subsequentemente ao pico do volume precipitado e, dependendo da capacidade de armazenamento de água na planta e do solo, a vegetação tende a manter o vigor mesmo após o término da estação chuvosa (SOUZA et al., 2016).

5.2.2 Dinâmica da cobertura vegetal na bacia do rio Manhuaçu

A Figura 16 apresenta a dinâmica das classes de uso e cobertura do solo compostas por vegetação com alto vigor e pastagem na bacia do rio Manhuaçu no período de 1986 a 2014.

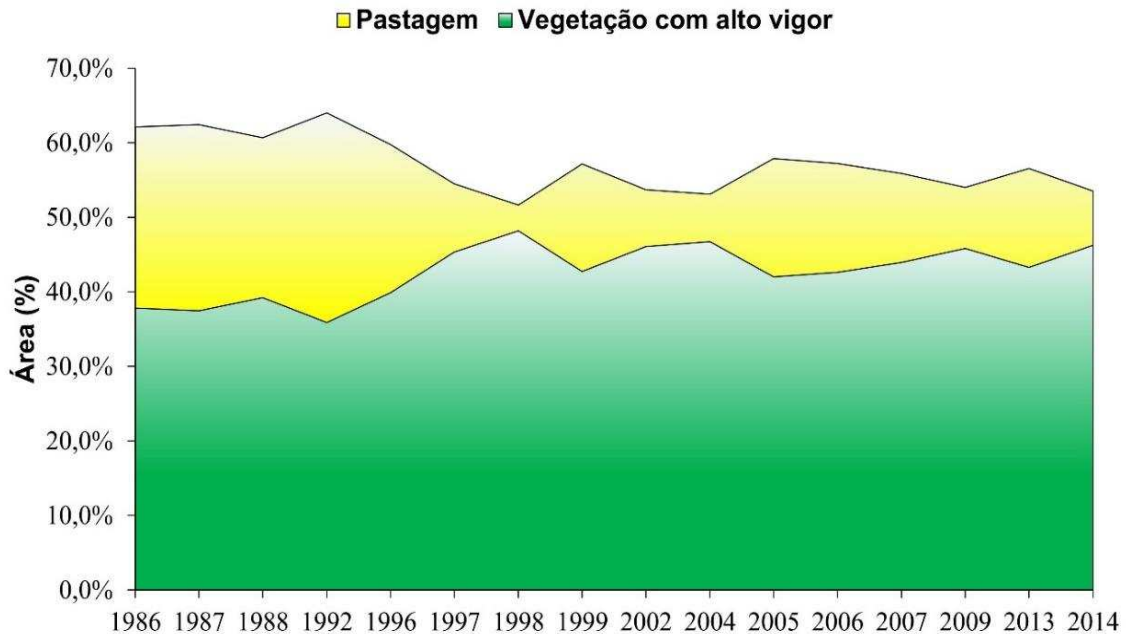


Figura 16 – Evolução da área de pastagem e vegetação com alto vigor no período de 1986 a 2014 na bacia do rio Manhuaçu.

Verifica-se que a área de vegetação com alto vigor, que contempla floresta nativa ou plantada, formação arbustiva e culturas perenes, apresentou aumento entre 1986 a 2014, com acréscimo de 8,46%, o equivalente a 861,2 km², ao passo que se observa redução da área de pastagem, com variação de 8,6% (892,6 km²), para o mesmo período. Observou-se um pico de crescimento de 12,3% da área com alto vigor vegetativo entre 1992 a 1998, o que pode ter sido motivado pela expansão da área com a cultura do café e da silvicultura com a cultura do eucalipto na bacia do rio Manhuaçu, como verificado nas imagens de Landsat referentes a este período.

A alteração pouco expressiva nas classes de uso e cobertura do solo analisadas é compatível com o comportamento da fronteira agrícola dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, onde está inserida a bacia do rio Manhuaçu, caracterizado pela exploração agropecuária de longa data, ou seja, com uso antrópico bastante consolidado. Essa característica acaba por limitar grandes alterações no uso e cobertura do solo, diferente do que ocorre nos estados da região Norte e Centro Oeste, cuja a exploração do setor primário é mais recente (IGAM, 2010b).

NA Figura 17 apresenta-se a dinâmica da cobertura vegetal na área de drenagem de cada uma das oito estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Manhuaçu.



Figura 17 – Evolução da área de pastagem e de vegetação com alto vigor no período de 1986 a 2014 nas áreas de drenagem de cada uma das oito estações fluviométricas da bacia do rio Manhuaçu.

De maneira geral, em todas as áreas de drenagem das estações fluviométricas verificou-se redução das áreas de pastagem em resposta ao aumento das áreas de vegetação com alto vigor, apesar de estas mudanças serem pouco expressivas. A maior modificação observada foi na estação 56989400, com redução de 10,8% na área de pastagem e um aumento de 10,7% na área de vegetação com alto vigor entre 1986 a 2014. Entretanto, a estação 56989001 foi a que menos apresentou variação, com aumento de 4,7% na área de vegetação com alto vigor e redução de 4,5% na área de pastagem.

Nas áreas de drenagem das estações 56960005 e 56983000 as áreas com alto vigor vegetativo superaram de forma mais expressiva as áreas compostas por pastagem entre o período de 2004 a 2007 e 1998 a 2005, respectivamente. Foi verificado, utilizando-se imagens de Landsat, que este aumento foi motivado principalmente pelo incremento nas áreas com a cultura do café. Segundo dados do IGAM (2010a), ocorreu um incremento de 169,1% na área destinada ao cultivo do café em toda a bacia no período de 2000 a 2006.

Apesar da pouca variação nas classes de uso do solo analisadas na bacia do rio Manhuaçu, Bosch e Hewlett (1982) destacam que alterações de 10% na cobertura florestal compostas por coníferas e eucalipto podem resultar em uma modificação de 40 mm no deflúvio anual. Desta forma, as modificações observadas na área de estudo podem ter influência sobre o regime de variação de vazões.

De maneira geral, tem sido observado redução na magnitude das vazões de pico em decorrência do reflorestamento (BAYER, 2014). No entanto, os processos que envolvem a modelagem da vazão máxima são bem mais complexos quando comparado aos de vazões média e mínima (EISENBIES et al., 2007). Em função disso, na discussão apresentada por Andréassian (2004) os efeitos da modificação da cobertura vegetal, decorrente do desmatamento sobre a vazão máxima, são extremamente variáveis, ocorrendo situações de aumento, redução e, até mesmo, de efeitos nulos sobre a vazão máxima.

Os efeitos do reflorestamento sobre a vazão máxima têm sido mais perceptíveis para eventos de precipitação com menor duração comparativamente àqueles mais longos (ROBINSON et al., 1991). Esta associação pode ser atribuída ao papel das florestas no ciclo hidrológico, com a interceptação e armazenamento da água no dossel e favorecimento da infiltração da água no solo, sendo que para eventos de longa duração este efeito das florestas pode ser limitado (BAYER, 2014).

No caso específico da bacia do rio Manhuaçu, os efeitos do aumento da cobertura vegetal com alto vigor, oriundos principalmente da expansão das culturas do café e eucalipto,

os quais apresenta baixa interceptação de precipitação pelo dossel, podem não proporcionar uma redução da vazão de pico.

Em relação ao regime de vazões mínimas, considerando os cenários em que as bacias foram totalmente ou parcialmente reflorestadas, podem resultar em reduções (ANDRÉASSIAN, 2004; ROBINSON et al., 1991; ZHAO et al., 2012). Tal comportamento decorre do aumento da retirada da água do solo pelas plantas que apresentam maior vigor vegetativo e, conseqüentemente, do processo de evapotranspiração ser mais intenso (COE et al., 2011; FARLEY et al., 2005).

Desta forma, a tendência de redução das vazões mínimas identificados em grande parte das estações fluviométricas da bacia do rio Manhuaçu (Figura 11) pode ter sido motivada pelo aumento da área de vegetação com alto vigor.

5.3 Valores de Evapotranspiração real (ET) obtidos a partir do sensor MODIS

Na Figura 18 pode-se analisar os valores médios de evapotranspiração real anual (ETa), evapotranspiração real do semestre chuvoso (ETsc) e evapotranspiração real do semestre seco (ETss), para cada uma das áreas de drenagem das oito estações fluviométricas da bacia do rio Manhuaçu.

Foi utilizado o período de 2000 a 2014 pois corresponde à disponibilidade dos dados de ET extraídos do sensor MODIS e a base de dados fluviométricos, respectivamente, com exceção das estações 56989400 e 56988500 em que os dados de vazões estavam disponíveis até 2013. Já os anos faltantes na figura, são referentes aqueles em não foi possível a obtenção dos valores de NDVI devido à problemas com as imagens do Landsat.

De maneira geral, os valores de evapotranspiração aparentaram pouca variação no período de análise, em concordância principalmente com o regime pluviométrico, em que no ano de 2006 onde foi verificado os menos valores de ET para os períodos anuais e sazonais, também foi observado o ano com os menores valores da precipitação anual na bacia do rio Manhuaçu, no período de análise.

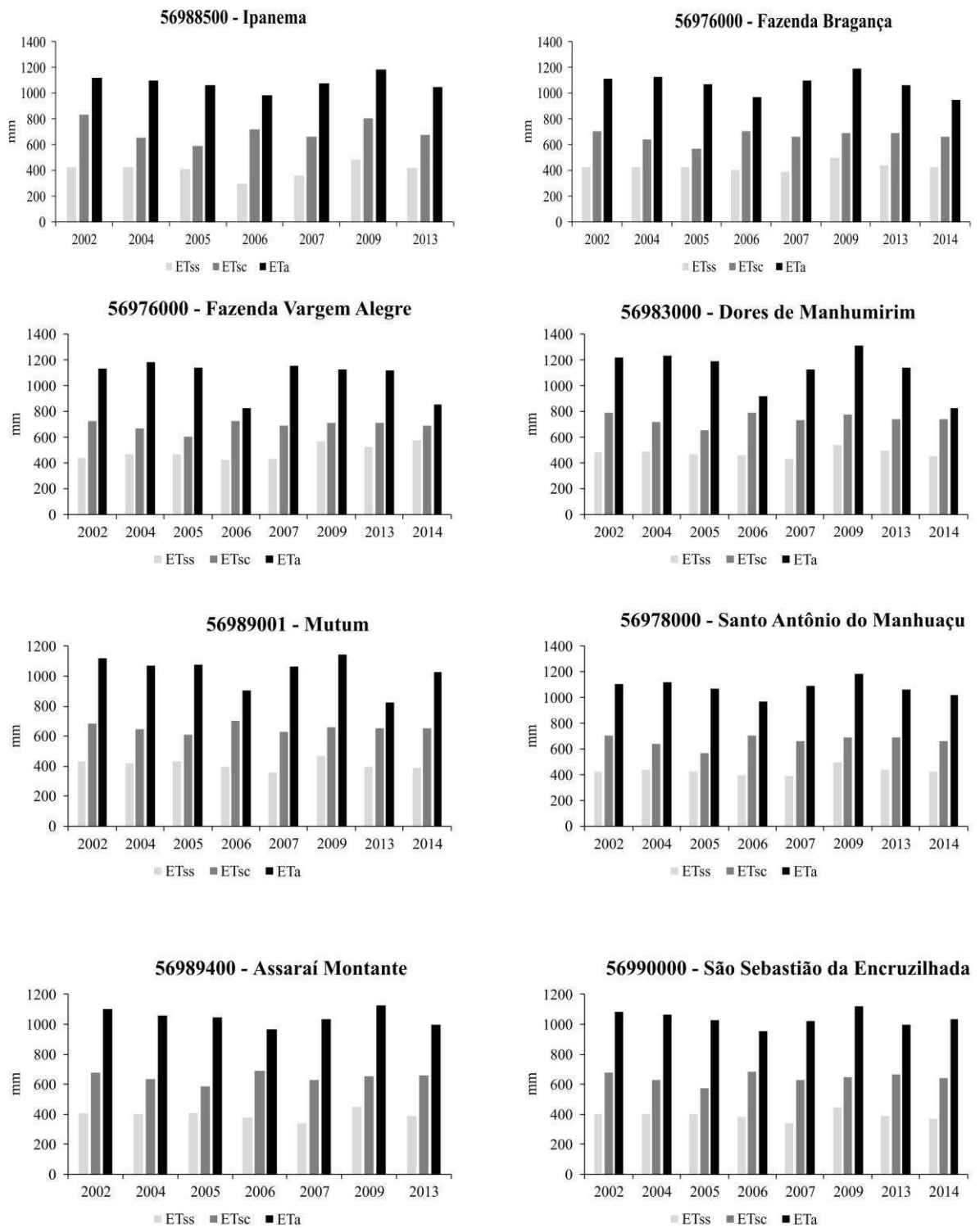


Figura 18 – Valores médio de evapotranspiração real para cada uma das áreas de drenagem das oito estações fluviométricas da bacia do rio Manhuaçu.

5.4 Análise da influência da alteração da cobertura vegetal no regime de vazões

5.4.1 Ajuste dos modelos de regressão múltipla

Os modelos de regressão múltipla que apresentaram melhor ajuste para descrever o regime de vazões da bacia do rio Manhuaçu podem ser analisados na Tabela 9. Nessa tabela foram apresentados os modelos de regressão apenas para as vazões onde foi possível se obter ajuste satisfatório e também aqueles em que todas as variáveis explicativas foram significativas, uma vez que em diversos casos foi obtido o R_a^2 com valores acima de 0,7, porém apenas uma variável explicativa foi significativa. Em função disso, não se tem em cada uma das estações fluviométricas analisadas os modelos para todos os regimes de vazões avaliados ($Q_{m\acute{a}x}$, $Q_{m\acute{i}n}$, $Q_{m\acute{e}d}$, $Q_{m\acute{e}d}$ semestre chuvoso e $Q_{m\acute{e}d}$ semestre seco).

Tabela 9 – Modelos de regressão múltipla que apresentaram melhor ajuste aos dados de vazão e respectivas estatísticas

Estação	Vazões	Variáveis Explicativas			R_a^2	$F_{\text{calculado}} \text{ (ANOVA)}$	Parâmetros ($t_{\text{calculado}}$)		
		x_1	x_2	x_3			β_1	β_2	β_3
56988500	$Q_{\text{máx}}$	$AP_{5\text{anos}}$	$Pmc_{5\text{anos}}$	-	0,96	59,83	-2,78	2,23	-
		$AV_{5\text{anos}}$	$Pmc_{5\text{anos}}$	-	0,96	59,36	2,77	2,19	-
	$Q_{\text{mín}}$	AV	Psc	ET_{ss}	0,73	7,44	-3,63	-2,95	-2,10
		AP	Psc	ET_{ss}	0,74	7,69	3,69	-2,99	-2,09
	$Q_{\text{méd}} \text{ semestre seco}$	$AP_{5\text{anos}}$	$Psc_{5\text{anos}}$	-	0,86	15,94	-4,17	4,37	-
		$AV_{5\text{anos}}$	$Psc_{5\text{anos}}$	-	0,86	15,98	4,18	4,36	-
56983000	$Q_{\text{máx}}$	AV	Psc	ET_{sc}	0,79	9,70	1,84	5,27	1,96
		AP	Psc	ET_{sc}	0,79	9,68	-1,84	5,27	1,95
	$Q_{\text{mín}}$	AP	Psc	ET_{ss}	0,60	4,53	1,88	2,46	2,60
		AV	Psc	ET_{ss}	0,59	4,32	-1,80	2,40	2,55
	$Q_{\text{méd}}$	AV	Pa	ETa	0,86	15,19	-3,83	1,67	3,25
		AP	Pa	ETa	0,86	15,35	3,86	1,60	3,28
56989400	$Q_{\text{méd}}$	$AV_{5\text{anos}}$	$Pa_{5\text{anos}}$	-	0,80	11,02	-1,95	4,47	-
		$AP_{5\text{anos}}$	$Pa_{5\text{anos}}$	-	0,80	11,10	1,96	4,49	-
	$Q_{\text{méd}} \text{ semestre chuvoso}$	$AV_{5\text{anos}}$	$Psc_{5\text{anos}}$	-	0,79	10,62	-2,40	4,23	-
		$AP_{5\text{anos}}$	$Psc_{5\text{anos}}$	-	0,80	10,91	2,45	4,29	-
56990000	$Q_{\text{máx}}$	$AV_{5\text{anos}}$	$Pmc_{5\text{anos}}$	-	0,71	7,09	-1,70	3,36	-
	$Q_{\text{mín}}$	$AV_{5\text{anos}}$	$Psc_{5\text{anos}}$	-	0,92	28,83	-2,82	-7,05	-

F_{tabelado} para o modelo com média de 5 anos dos dados = 5,43

F_{tabelado} para o modelo utilizando os dados de ET = 4,19

t_{tabelado} para o modelo utilizando a média de 5 anos de dados = 1,63

t_{tabelado} para o modelo utilizando os dados de ET = 1,53

De maneira geral, os modelos de regressão múltipla que apresentaram ajustes satisfatórios aos dados de vazão foram aqueles que utilizaram a média de cinco anos dos dados, empregando-se duas variáveis explicativas, e os modelos que utilizaram, além das informações de uso do solo e do volume pluviométrico, a evapotranspiração como uma terceira variável independente.

No caso de modelos com duas variáveis, aquelas que resultaram nos melhores ajustes foram a área de pastagem média de 5 anos ($AP_{5\text{anos}}$), área de vegetação com alto vigor média de 5 anos ($AV_{5\text{anos}}$), precipitação do mês mais chuvoso média de cinco anos ($Pmc_{5\text{anos}}$), precipitação do semestre chuvoso média de 5 anos ($Psc_{5\text{anos}}$) e precipitação anual média de 5 anos ($Pa_{5\text{anos}}$).

Para os modelos com três variáveis, aquelas que resultaram nos melhores ajustes foram os valores anuais da área de pastagem (AP), área de vegetação com alto vigor (AV), precipitação do semestre chuvoso (Psc), precipitação total anual (Pa), evapotranspiração do semestre seco (ETss), evapotranspiração do semestre chuvoso (ETsc) e evapotranspiração anual (ETa). Para este modelo os dados utilizados foram obtidos a partir do ano de 2000, período em que já estavam disponíveis as informações de evapotranspiração do sensor MODIS.

Como pode ser observado, na Tabela 9, grande parte dos valores de R_a^2 obtidos foi superior a 0,7. O melhor ajuste obtido foi para a estação 56988500, utilizando-se o modelo com a média de 5 anos, com as variáveis $AP_{5\text{anos}}$ ou $AV_{5\text{anos}}$ acrescida da $Pmc_{5\text{anos}}$, referente à vazão máxima, com R_a^2 igual a 0,96.

Considerando a complexidade das variáveis analisadas e os resultados obtidos em outros trabalhos, pode-se considerar que os valores de R_a^2 obtidos para a bacia do rio Manhuaçu são relativamente altos. Neste contexto, Trimble et al. (1987) consideraram satisfatório o ajuste do coeficiente de determinação (r^2) igual a 0,5 entre a redução da área de vegetação e o regime de vazão. Para grandes bacias hidrográficas, Bayer (2014) obteve uma relação de r^2 de até 0,89 nos resultados da simulação hidrológica, considerando a redução da área de vegetação e seu impacto sobre a vazão.

A avaliação se os modelos ajustados apresentam comportamento linear entre as variáveis explicativas e a variável dependente foi realizada pelo teste da análise da variância (ANOVA). Para que o modelo seja considerado linear o valor de $F_{\text{calculado}}$ deve ser superior ao valor de F_{tabelado} (HAIR et al., 2009).

Como podem ser verificados na Tabela 9, os valores de $F_{\text{calculado}}$ foram superiores em todos os modelos selecionados em comparação aos valores de F_{tabelado} , considerando o nível de significância de 10%, indicando que a relação entre o regime de variação de vazões e as variáveis explicativas utilizadas segue um comportamento linear.

Para analisar se as variáveis explicativas utilizadas para descrever o regime de variação de vazões são confiáveis, foi aplicado o teste t student. Em que, se o valor de $t_{\text{calculado}}$ for superior em módulo ao valor de t_{tabelado} indica-se que a variável explicativa empregada têm influência sobre a variável dependente (HAIR et al., 2009).

Verifica-se, portanto, que na estação 56988500 o resultado da aplicação do teste t indicou que tanto as alterações do uso do solo quanto da precipitação têm influência significativa no regime de $Q_{\text{máx}}$, $Q_{\text{mín}}$ e $Q_{\text{méd}}$ semestre seco. Esta estação fluviométrica apresentou comportamento não estacionário para a $Q_{\text{máx}}$ e tal comportamento pode ser decorrente da alteração na cobertura vegetal e da precipitação, em que as variáveis $AV_{5\text{anos}}$ e $AP_{5\text{anos}}$, acrescidas das informações do volume pluviométrico demonstraram ser significativas para descrever este regime de vazões.

Além disso, essa estação fluviométrica está localizada muito próximo do centro urbano de Ipanema, MG, como demonstrado na Figura 6, fato que também pode ter influenciado nos resultados observados, como discutido anteriormente, evidenciando a complexidade dos fatores que envolvem a formação das vazões máximas.

As vazões $Q_{\text{mín}}$ e $Q_{\text{méd}}$ do período seco apresentaram comportamento estacionário na estação 56988500, o que indica que apesar das flutuações das variáveis explicativas terem resultado em um bom ajuste destes regimes de vazões, as modificações observadas, principalmente no uso do solo, não afetaram a $Q_{\text{mín}}$ e a $Q_{\text{méd}}$ desta estação.

Na estação 56983000 apenas o modelo utilizando a ET como uma terceira variável explicativa apresentou ajuste adequado dos dados de vazão desta estação, conforme pode ser analisado na Tabela 9. Nesta estação foi verificado comportamento similar a estação 56988500, com tendência de aumento para a vazão máxima ao longo do tempo, enquanto que os outros regimes de vazões que foi possível a obtenção de um ajuste satisfatório dos dados ($Q_{\text{mín}}$ e $Q_{\text{méd}}$) apresentaram comportamento estacionário.

Como a área de drenagem da estação 56988500 compreende a área de drenagem da estação 56983000, fatores similares, principalmente o uso do solo, podem ter influenciado no comportamento dos dados de $Q_{\text{máx}}$, apesar do ponto de mudança identificado ter sido em 1975/76, anterior à base de dados utilizadas neste estudo e o modelo ajustado utilizar a base de dados a partir de 2000, devido a disponibilidade das informações de ET.

Na estação 56989400 foi possível ajustar os dados apenas para a $Q_{\text{méd}}$ e $Q_{\text{méd}}$ do semestre chuvoso, empregando-se o modelo com a média de cinco anos de dados com as variáveis do uso do solo $AV_{5\text{anos}}$ e $AP_{5\text{anos}}$ e do regime fluviométrico $Pa_{5\text{anos}}$ e $Psc_{5\text{anos}}$, respectivamente. Verifica-se na Tabela 9 que tanto as variáveis referentes ao uso do solo quanto à precipitação tiveram influência significativa sobre o comportamento dos dados de vazões observados.

Foi identificado nesta estação comportamento não estacionário, com tendência de redução da Q_{min} e da $Q_{\text{méd}}$ do semestre seco. Apesar de não ter sido possível obter ajustes para estes regimes de vazões, o aumento na área com vegetação de alto vigor verificado na área de drenagem desta estação pode ser um indicativo de que o uso do solo tenha influenciado no comportamento observado, visto que a área de drenagem desta estação foi a que mais apresentou aumento na área com vegetação com alto vigor, com um acréscimo de 10,7%.

A estação 56990000 é a que apresenta maior área de drenagem na bacia do rio Manhuaçu (8.814 km²) e, portanto, diversos fatores podem influenciar na variação do regime de vazões. Nesta estação foi possível obter ajustes satisfatórios para a $Q_{\text{mín}}$ e $Q_{\text{máx}}$, sendo que o modelo que melhor descreveu a variabilidade dos dados destes regimes de vazões foi aquele que utilizou dados médios de cinco anos com a variável $AV_{5\text{anos}}$ acrescidas das informações do volume pluviométrico, com as variáveis $Psc_{5\text{anos}}$ e $Pmc_{5\text{anos}}$. A $Q_{\text{máx}}$ apresentou comportamento estacionário ao longo do tempo nesta estação, desta forma, a variabilidade das variáveis utilizadas não teve influência sobre este regime de vazão.

Nessa estação foi verificado que a $Q_{\text{mín}}$ apresentou comportamento não estacionário, com tendência de redução da vazão ao longo do tempo. Como pode ser notado na Tabela 9, o ajuste obtido do modelo de regressão múltipla para este regime de vazão foi de 0,92, o que é uma indicação que o comportamento não estacionário da $Q_{\text{mín}}$ pode estar relacionado com o aumento das áreas de vegetação com alto vigor. Atrelado a isto, verificou-se também nesta estação que existe alta concentração da agricultura irrigada na região, como discutido anteriormente na Figura 13, o que em menor proporção, pode ter influenciado na tendência de redução observada, já que Pruski et al. (2004) observaram que o uso dos recursos hídricos nas diversas atividades humanas, em especial a irrigação, teve maior influência sobre as vazões mínimas.

5.5 Considerações acerca dos resultados observados na bacia do rio Manhuaçu

Com base nos resultados apresentados, nota-se que metade das estações fluviométricas da área de estudo apresentaram tendência de redução das vazões mínimas (Figura 10), sendo

que em duas destas estações foi possível obter ajuste satisfatório aplicando-se modelos de regressão múltipla, em que o uso do solo foi significativo nos modelos ajustados. Isto é um indicativo de que o aumento na cobertura vegetal com alto vigor na bacia do rio Manhuaçu tem influenciado neste comportamento dos dados de vazões mínimas. Diversos estudos apontam redução destas vazões devido ao aumento da cobertura vegetal (ANDRÉASSIAN, 2004; BOSCH e HEWLETT, 1982; FARLEY et al., 2005; MOLINA et al., 2012).

Em relação a $Q_{\text{máx}}$, a redução da área de pastagem com o aumento da área de vegetação com alto vigor observado, esperava-se redução deste regime de vazão, devido principalmente a ao aumento da rugosidade da superfície e à interceptação da precipitação pelo dossel das plantas (PRUSKI, 2009). Essa expectativa deve-se ao fato que, na bacia do rio Manhuaçu, grande parte do aumento na cobertura vegetal observada foi motivada pelo aumento nas áreas com a cultura do café (IGAM, 2010a), em que era esperado uma redução no escoamento superficial, pelo favorecimento da infiltração da água no solo, e maior interceptação da precipitação, conseqüentemente, resultando em uma atenuação das vazões de pico (SILVA et al., 2008).

No entanto, os efeitos do aumento da cobertura vegetal sobre este regime de vazões máximas é bem inconclusivo, sendo que foi observado aumento deste regime de vazão em decorrência do incremento na área de reflorestamento ou até mesmo efeitos nulos (ANDRÉASSIAN, 2004). Os efeitos de atenuação das vazões de pico com o aumento da cobertura florestal têm sido mais perceptíveis para eventos de precipitação com período de retorno de um ano (ROBINSON et al., 1991).

As estações fluviométricas que apresentaram comportamento não estacionário para o regime de vazões máximas, apenas a para estação 56978000 não foi possível ajustar os modelos de regressão múltipla para este regime de vazão. Isto é um indicativo de que tanto o uso do solo quanto a precipitação têm influenciado no comportamento das vazões máximas da bacia do rio Manhuaçu.

Foi observado também que, com exceção da $Q_{\text{méd}}$ do semestre seco da estação 56989400, a $Q_{\text{méd}}$ e $Q_{\text{méd}}$ do semestre chuvoso apresentaram comportamento estacionário nas oito estações fluviométricas analisadas. O comportamento das vazões médias em relação ao aumento da cobertura vegetal segue a mesma lógica das vazões mínimas, ou seja, no curto prazo, o aumento da cobertura florestal tende a resultar em uma redução neste regime de vazões (BOSCH e HEWLETT, 1982; FARLEY et al., 2005; MOLINA et al., 2012). Como as modificações do uso solo foram relativamente baixa, isto pode indicar que estas alterações não foram suficientes para modificar o regime das vazões médias, isto porque dados extremos, como as vazões mínimas e máximas, são mais sensíveis as modificações do que dados médios.

6. CONCLUSÕES

Com base na análise dos resultados conclui-se que:

- A utilização de NDVI para a quantificação da modificação da cobertura vegetal não é um procedimento simples, em decorrência da sua alta variabilidade, principalmente devido à resposta imediata da vegetação em relação aos volumes precipitados;
- A utilização da plataforma GEE mostrou-se como ferramenta com muito potencial para análises com base em sensoriamento remoto, pois agiliza substancialmente o tempo de processamento e armazenamento de dados, além de trabalhar com uma linguagem de programação usual e relativamente simples;
- Foi constatado que grande parte das estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Manhuaçu apresentam comportamento não estacionário em pelo menos um regime de vazão ($Q_{\text{máx}}$, $Q_{\text{mín}}$, $Q_{\text{méd}}$, $Q_{\text{méd}}$ do semestre chuvoso e $Q_{\text{méd}}$ do semestre seco), o que confirma a importância do desenvolvimento de estudos neste sentido para adequação dos sistemas de gestão de recursos hídricos a estas modificações;
- Em grande parte das estações fluviométricas as variáveis explicativas dos modelos de regressão associadas com cobertura vegetal com alto vigor e com pastagem apresentaram influência significativa para descrever o regime de vazões; e
- As modificações na cobertura vegetal exerceram influência sobre o comportamento do regime de vazões da bacia do rio Manhuaçu.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A.; ASNER, G. P.; KNAPP, D.; ZARIN, D. Temporal variability of forest fires in eastern Amazonia. **Ecological Applications**, v. 21, n. 7, p. 2397–2412, 1 out. 2011.
- ALLAN, R. P.; SODEN, B. J. Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes. **Science**, v. 321, n. 5895, p. 1481–1484, 12 set. 2008.
- ALMEIDA, M. A. de; CURI, W. F. Gestão do uso de água na bacia do Rio Paraíba, PB, Brasil com base em modelos de outorga e cobrança. **Ambiente e Agua**, v. 11, n. 4, p. 989, 25 out. 2016.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ANA, (2008). **Mapeamento de Espelhos de água**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cadastrados/Barragens/MapeamentoEspelhosDagua.aspx>>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- ANA, (2017). **Agência Nacional de Águas: Sistema de Informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 5 dez. 2017.
- ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, n. 1–2, p. 1–27, 31 maio 2004.
- ÁVILA, L. F.; ROGÉRIO DE MELLO, C.; DE NAZARÉ, S.; YANAGI, M.; BAHIA, O.; NETO, S. Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no Estado de Minas Gerais. **Pesq. agropec. bras**, v. 49, n. 4, p. 247–256, 2014.
- BAJRACHARYA, A. R.; BAJRACHARYA, S. R.; SHRESTHA, A. B.; MAHARJAN, S. B. Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin, Nepal. **Science of The Total Environment**, v. 625, p. 837–848, jun. 2018.
- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, n. 2–3, p. 161–173, 1 fev. 1991.
- BAYER, D. M. **Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**. 2014. 172 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- BAZZO, K. R.; GUEDES, H. A. S.; CASTRO, A. S.; SIQUEIRA, T. M.; TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A. Regionalização da vazão Q95: comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. **Ambiente e Agua**, v. 12, n. 5, p. 855, 23 ago. 2017.
- BESCHTA, R. .; PYLES, M. .; SKAUGSET, A. .; SURFLEET, C. . Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. **Journal of Hydrology**, v. 233, n. 1–4, p. 102–120, 12 jun. 2000.
- BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116–127, 1 mar. 2015.

- BHAVANI, P.; CHAKRAVARTHI, V.; ROY, P. S.; JOSHI, P. K.; CHANDRASEKAR, K. Long-term agricultural performance and climate variability for drought assessment: a regional study from Telangana and Andhra Pradesh states, India. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 822–840, 15 dez. 2017.
- BIER, A. A.; FERRAZ, S. E. T.; BIER, A. A.; FERRAZ, S. E. T. Comparação de Metodologias de Preenchimento de Falhas em Dados Meteorológicos para Estações no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 215–226, jun. 2017.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, n. 1–4, p. 3–23, 1 fev. 1982.
- CALDER, I. R. Water use of eucalypts — A review with special reference to South India. **Agricultural Water Management**, v. 11, n. 3–4, p. 333–342, 1 set. 1986.
- CBH, (2017). **A bacia**. Disponível em: <<http://www.cbhmanhuacu.org.br/apresentacao>>. Acesso em: 30 nov. 2017.
- CHAZDON, R. Regeneração de florestas tropicais Tropical forest regeneration. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat**, n. 3, p. 195–218, 2012.
- CLEUGH, H. A.; LEUNING, R.; MU, Q.; RUNNING, S. W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 3, p. 285–304, 15 fev. 2007.
- COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 1–3, p. 119–131, 23 set. 2011.
- COLTIN, B.; MCMICHAEL, S.; SMITH, T.; FONG, T. Automatic boosted flood mapping from satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 993–1015, 3 mar. 2016.
- CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; MELO, R. W. de; SHIMABUKURO, Y. E.; FIOR, C. S.; CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; MELO, R. W. de; SHIMABUKURO, Y. E.; FIOR, C. S. Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 883, 31 ago. 2017.
- COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, n. 1–4, p. 206–217, 10 dez. 2003.
- DALE, J.; ZOU, C. B.; ANDREWS, W. J.; LONG, J. M.; LIANG, Y.; QIAO, L. Climate, water use, and land surface transformation in an irrigation intensive watershed— Streamflow responses from 1950 through 2010. **Agricultural Water Management**, v. 160, p. 144–152, 1 out. 2015.
- DIEM, J. E.; HILL, T. C.; MILLIGAN, R. A. Diverse multi-decadal changes in streamflow within a rapidly urbanizing region. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 61–71, 1 jan. 2018.
- DO, H. X.; WESTRA, S.; LEONARD, M. A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow. **Journal of Hydrology**, v. 552, p. 28–43, 1 set. 2017.
- EDMONDS, D. A.; HAJEK, E. A.; DOWNTON, N.; BRYK, A. B. Avulsion flow-path selection on rivers in foreland basins. **Geology**, v. 44, n. 9, p. 695–698, 1 set. 2016.

- EISENBIES, M. H.; AUST, W. M.; BURGER, J. A.; ADAMS, M. B. Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians—A review. **Forest Ecology and Management**, v. 242, n. 2–3, p. 77–98, 30 abr. 2007.
- ENGEL, V.; JOBBÁGY, E. G.; STIEGLITZ, M.; WILLIAMS, M.; JACKSON, R. B. Hydrological consequences of Eucalyptus afforestation in the Argentine Pampas. **Water Resources Research**, v. 41, n. 10, 1 out. 2005.
- EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Pesquisa agropecuária brasileira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 6, p. 445–454, 1 jun. 1996.
- FAHEY, B.; PAYNE, J. The Glendhu experimental catchment study, upland east Otago, New Zealand: 34 years of hydrological observations on the afforestation of tussock grasslands. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 16, p. 2921–2934, 30 jul. 2017.
- FARLEY, K. A.; JOBBAGY, 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, 1 out. 2005.
- FEAM, (2013). **Banco de Solos de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>>. Acesso em: 8 jan. 2018.
- FUNARBE. **Programa de incentivo ao uso racional de água na agricultura (P22)**. Viçosa, contrato de prestação de serviço nº 10/2013, 52 p., 2014.
- GEE, (2017). **Introduction Google Earth Engine API Google Developers**. Disponível em: <<https://developers.google.com/earth-engine/>>. Acesso em: 13 dez. 2017.
- GOMES, H. F. B.; SILVA, B. B.; CAVALCANTI, E. P.; ROCHA, H. R. da. Balanço de radiação em diferentes biomas no Estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Geociências (São Paulo)**, v. 28, n. 2, p. 153–164, 1 jan. 2009.
- GOOGLE, (2018). **Google Earth Pro**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 19 jan. 2018.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, dez. 2017.
- GPRH, (2017). **Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos: Softwares**. Disponível em: <<http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>>. Acesso em: 5 dez. 2017.
- GU, X.; ZHANG, Q.; SINGH, V. P.; SHI, P. Changes in magnitude and frequency of heavy precipitation across China and its potential links to summer temperature. **Journal of Hydrology**, v. 547, p. 718–731, 1 abr. 2017.
- HAIR, J. F.; BLACK, B.; BABIN, B.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. Análise de Regressão Múltipla. In: HAIR, J. F.; BLACK, B.; BABIN, B.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. (Ed.). **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. Porto alegre: Bookman: Bookman, 2009. p. 149–220.

- HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN, S. V.; GOETZ, S. J.; LOVELAND, T. R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G. High-resolution global maps of 21 st-century forest cover change. **Science**, v. 134, n. 2011, p. 850–853, 2013.
- HE, T.; LIANG, S.; WANG, D.; CAO, Y.; GAO, F.; YU, Y.; FENG, M. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM +, and OLI data based on the unified direct estimation approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, p. 181–196, 1 jan. 2018.
- HOTT, M. C.; CARVALHO, L. M. T. de; ANTUNES, M. A. H.; SANTOS, P. A. dos; ARANTES, T. B.; RESENDE, J. C. de; ROCHA, W. S. D. da; HOTT, M. C.; CARVALHO, L. M. T. de; ANTUNES, M. A. H.; SANTOS, P. A. dos; ARANTES, T. B.; RESENDE, J. C. de; ROCHA, W. S. D. da. Vegetative growth of grasslands based on hyper-temporal NDVI data from the Modis sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 7, p. 858–868, jul. 2016.
- HUANG, H.; CHEN, Y.; CLINTON, N.; WANG, J.; WANG, X.; LIU, C.; GONG, P.; YANG, J.; BAI, Y.; ZHENG, Y.; ZHU, Z. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 166–176, 1 dez. 2017.
- HUNTINGTON, J.; MCGWIRE, K.; MORTON, C.; SNYDER, K.; PETERSON, S.; ERICKSON, T.; NISWONGER, R.; CARROLL, R.; SMITH, G.; ALLEN, R. Assessing the role of climate and resource management on groundwater dependent ecosystem changes in arid environments with the Landsat archive. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 186–197, 1 nov. 2016.
- IBGE, (2018). **Cidades senso demográfico de 1970 a 2010**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 16 jan. 2018.
- IGAM. **Plano de ação de recursos hídricos da unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos Manhuaçu**. Belo Horizonte, Consorcio Ecoplan, 93 p., 2013a.
- IGAM. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da Bacia do rio Doce**. Belo Horizonte, Consorcio Ecoplan, 463 p., 2013b.
- INMET, (2018). **Série Histórica: Banco de dados meteorológicos**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/mapas_mensal_sem.php>. Acesso em: 5 dez. 2017.
- IPCC. **Climate change 2014: synthesis report**. Geneva: IPCC, 151 p, 2014.
- ISHAK, E. H.; RAHMAN, A.; WESTRA, S.; SHARMA, A.; KUCZERA, G. Evaluating the non-stationarity of Australian annual maximum flood. **Journal of Hydrology**, v. 494, p. 134–145, 28 jun. 2013.
- ISHIDA, K.; GORGUNER, M.; ERCAN, A.; TRINH, T.; KAVVAS, M. L. Trend analysis of watershed-scale precipitation over Northern California by means of dynamically-downscaled CMIP5 future climate projections. **Science of The Total Environment**, v. 592, p. 12–24, 15 ago. 2017.
- JAKIMOW, B.; GRIFFITHS, P.; VAN DER LINDEN, S.; HOSTERT, P. Mapping pasture management in the Brazilian Amazon from dense Landsat time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 205, p. 453–468, 1 fev. 2018.

- JANSSEN, T. A. J.; AMETSITSI, G. K. D.; COLLINS, M.; ADU-BREDU, S.; OLIVERAS, I.; MITCHARD, E. T. A.; VEENENDAAL, E. M. Extending the baseline of tropical dry forest loss in Ghana (1984–2015) reveals drivers of major deforestation inside a protected area. **Biological Conservation**, v. 218, p. 163–172, 1 fev. 2018.
- KAHSAY, K. D.; PINGALE, S. M.; HATIYE, S. D. Impact of climate change on groundwater recharge and base flow in the sub-catchment of Tekeze basin, Ethiopia. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 6, p. 121–133, 1 mar. 2018.
- KAYANO, M. T.; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162–178, 1 jan. 2014.
- KELLEY, L. C.; EVANS, S. G.; POTTS, M. D. Richer histories for more relevant policies: 42 years of tree cover loss and gain in Southeast Sulawesi, Indonesia. **Global Change Biology**, v. 23, n. 2, p. 830–839, 1 fev. 2017.
- KHANNA, J.; MEDVIGY, D.; FUEGLISTALER, S.; WALKO, R. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 3, p. 200–204, 20 fev. 2017.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observe agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 31, p. 159–174, 1977.
- LEHMANN, J.; COUMOU, D.; FRIELER, K. Increased record-breaking precipitation events under global warming. **Climatic Change**, v. 132, n. 4, p. 501–515, 7 out. 2015.
- LENG, G.; TANG, Q.; RAYBURG, S. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China. **Global and Planetary Change**, v. 126, p. 23–34, 1 mar. 2015.
- LI, D.; LONG, D.; ZHAO, J.; LU, H.; HONG, Y. Observed changes in flow regimes in the Mekong River basin. **Journal of Hydrology**, v. 551, p. 217–232, 1 ago. 2017.
- LI, P.; JIANG, L.; FENG, Z. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. **Remote Sensing**, v. 6, n. 1, p. 310–329, 27 dez. 2013.
- LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. H.; AVANZI, J. C.; UMMUS, M. E. Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). **Revista Ambiente e Água**, v. 8, n. 2, p. 4136–1980, 2013.
- LIU, S.; HUANG, S.; HUANG, Q.; XIE, Y.; LENG, G.; LUAN, J.; SONG, X.; WEI, X.; LI, X. Identification of the non-stationarity of extreme precipitation events and correlations with large-scale ocean-atmospheric circulation patterns: A case study in the Wei River Basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 184–195, 1 maio 2017.
- LOBELL, D. B.; THAU, D.; SEIFERT, C.; ENGLE, E.; LITTLE, B. A scalable satellite-based crop yield mapper. **Remote Sensing of Environment**, v. 164, p. 324–333, 1 jul. 2015.
- MARCUSSI, A. B.; BUENO, C. R. P.; MIQUELONI, D. P.; ARRAES, C. L. Utilização de índices de vegetação para os sistemas de informações geográficas. **Caminhos de geografia**, v. 11, n. 35, p. 41-53, set. 2010.

- MARTINS, D. de M. F.; CHAGAS, R. M.; MELO NETO, J. de O.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1054–1061, out. 2011.
- MCGUINNESS, J. L.; HARROLD, L. L. Reforestation Influences on Small Watershed Streamflow. **Water Resources Research**, v. 7, n. 4, p. 845–852, 1 ago. 1971.
- MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1. ed. Lavras: Editora UFLA, Lavras, 455p., 2013., 2013.
- MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LETTENMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J. Climate change. Stationarity is dead: whither water management? **Science**, v. 319, n. 5863, p. 573–4, 1 fev. 2008.
- MINHONI, R. T. A. **Estimativa do assoreamento do reservatório da PCH pipoca, Minas Gerais**. 2013. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG., 2013.
- MINTA, M.; KIBRET, K.; THORNE, P.; NIGUSSIE, T.; NIGATU, L. Land use and land cover dynamics in Dendi-Jeldu hilly-mountainous areas in the central Ethiopian highlands. **Geoderma**, v. 314, p. 27–36, 15 mar. 2018.
- MOLINA, A.; VANACKER, V.; BALTHAZAR, V.; MORA, D.; GOVERS, G. Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. **Journal of Hydrology**, v. 472–473, p. 25–35, 23 nov. 2012.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 4. ed. Viçosa: Editora Viçosa, 422 p., 2012.
- MU, Q.; ZHAO, M.; KIMBALL, J. S.; MCDOWELL, N. G.; RUNNING, S. W.; MU, Q.; ZHAO, M.; KIMBALL, J. S.; MCDOWELL, N. G.; RUNNING, S. W. A Remotely Sensed Global Terrestrial Drought Severity Index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 1, p. 83–98, 1 jan. 2013.
- MUDBHATKAL, A.; RAIKAR, R. V.; VENKATESH, B.; MAHESHA, A. Impacts of Climate Change on Varied River-Flow Regimes of Southern India. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 22, n. 9, p. 0–13, set. 2017.
- NASA, (2018). **History Landsat Science**. Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/history/>>. Acesso em: 29 jan. 2018.
- NOURANI, V.; FARD, A. F.; GUPTA, H. V.; GOODRICH, D. C.; NIAZI, F. Hydrological model parameterization using NDVI values to account for the effects of land cover change on the rainfall–runoff response. **Hydrology Research**, v. 48, n. 6, p. 1455–1473, 1 dez. 2017.
- OHANA-LEVI, N.; KARNIELI, A.; EGOZI, R.; GIVATI, A.; PEETERS, A. Modeling the Effects of Land-Cover Change on Rainfall-Runoff Relationships in a Semiarid, Eastern Mediterranean Watershed. **Advances in Meteorology**, v. 2015, p. 1–16, 20 out. 2015.
- PEKEL, J.-F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, v. 540, n. 7633, p. 418–422, 7 dez. 2016.

- PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Ambiente e Agua**, v. 4, n. 2, p. 188–199, 30 ago. 2009.
- PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, Viçosa, 279 p., 2009.
- PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F. de; SILVA, D. D. da; RAMOS, M. M. Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na Bacia do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2–3, p. 247–253, dez. 2004.
- PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. del G.; NOVAES, L. F. de; SILVA, D. D. da; RAMOS, M. M.; TEIXEIRA, A. de F. Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na bacia do Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 199–210, abr. 2007.
- RAMACHANDRA, T. V.; BHARATH, S.; GUPTA, N. Modelling landscape dynamics with LST in protected areas of Western Ghats, Karnataka. **Journal of Environmental Management**, v. 206, p. 1253–1262, 15 jan. 2018.
- ROBINSON, M.; COGNARD-PLANCQ, A.-L.; COSANDEY, C.; DAVID, J.; DURAND, P.; FÜHRER, H.-W.; HALL, R.; HENDRIQUES, M. .; MARC, V.; MCCARTHY, R.; MCDONNELL, M.; MARTIN, C.; NISBET, T.; O’DEA, P.; RODGERS, M.; ZOLLNER, A. Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 186, n. 1–3, p. 85–97, 5 dez. 2003.
- ROBINSON, M.; GANNON, B.; SCHUCH, M. A comparison of the hydrology of moorland under natural conditions, agricultural use and forestry. **Hydrological Sciences Journal**, v. 36, n. 6, p. 565–577, 29 dez. 1991.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite - 1 Symposium**, p. 301–17, 1974.
- ROY, D. P.; KOVALSKYY, V.; ZHANG, H. K.; VERMOTE, E. F.; YAN, L.; KUMAR, S. S.; EGOROV, A. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 57–70, 1 nov. 2016.
- RUFIN, P.; MÜLLER, H.; PFLUGMACHER, D.; HOSTERT, P. Land use intensity trajectories on Amazonian pastures derived from Landsat time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 41, p. 1–10, 1 set. 2015.
- SAHIN, V.; HALL, M. J. The effects of afforestation and deforestation on water yields. **Journal of Hydrology**, v. 178, n. 1–4, p. 293–309, 15 abr. 1996.
- SALLO, F. da S.; FRANÇA, M. S. de; MORAIS, D. M. de; RODRIGUES, R.; BIUDES, M. sacardi. Estimativa de componentes do balanço de radiação em diferentes tipos de uso e cobertura do solo. **An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 9, n. 2, p. 347–358, 2014.
- SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64–73, mar. 2016.

- SHIMABUKURO, Y. E.; YI, J. L. R.; DUARTE, V. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do estado do Mato Grosso através de imagens NOAA-AVHRR**. 1. ed. são José dos Campos: INPE, 1999, 45 p., 1999.
- SILVA, B. M.; SILVA, D. D.; CASTRO, M. M. Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do rio Paraopeba. **Ambiente e Água**, v. 10, n. 3, p. 623–634, 2015.
- SILVA, R. M. P.; LIMA, J. R.; MENDONÇA, I. F. C. de. Alteração da cobertura vegetal na Sub-Bacia do Rio Espinharas de 2000 a 2010. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 202–209, fev. 2014.
- SILVA, S. de A.; LIMA, J. S. de S.; OLIVEIRA, R. B. de; SOUZA, G. S. de; SILVA, M. de A. e. Análise espacial da erosão hídrica em um latossolo vermelho amarelo sob cultivo de café conilon. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 4, p. 335–342, 14 nov. 2008.
- SILVEIRA, E. M. de O.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; MELLO, J. M. de; BUENO, I. T. Object-based change detection using semivariogram indices derived from NDVI images: The environmental disaster in Mariana, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 5, p. 554–564, set. 2017.
- SOUZA, R.; FENG, X.; ANTONINO, A.; MONTENEGRO, S.; SOUZA, E.; PORPORATO, A. Vegetation response to rainfall seasonality and interannual variability in tropical dry forests. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 20, p. 3583–3595, 30 set. 2016.
- SRIVASTAVA, A.; SAHOO, B.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Evaluation of Variable-Infiltration Capacity Model and MODIS-Terra Satellite-Derived Grid-Scale Evapotranspiration Estimates in a River Basin with Tropical Monsoon-Type Climatology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 8, p. 4017028, ago. 2017.
- SULIEMAN, H. M. Exploring Drivers of Forest Degradation and Fragmentation in Sudan: The Case of Erawashda Forest and its Surrounding Community. **Science of The Total Environment**, v. 621, p. 895–904, 15 abr. 2018.
- SUN, S.; WANG, G.; HUANG, J.; MU, M.; YAN, G.; LIU, C.; GAO, C.; LI, X.; YIN, Y.; ZHANG, F.; ZHU, S.; HUA, W. Spatial pattern of reference evapotranspiration change and its temporal evolution over Southwest China. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, n. 3–4, p. 979–992, 16 nov. 2017.
- SWANK, W. T.; MINER, N. H. Conversion of Hardwood-Covered Watersheds to White Pine Reduces Water Yield. **Water Resources Research**, v. 4, n. 5, p. 947–954, 1 out. 1968.
- TRIMBLE, S. W.; WEIRICH, F. H.; HOAG, B. L. Reforestation and the reduction of water yield on the Southern Piedmont since circa 1940. **Water Resources Research**, v. 23, n. 3, p. 425–437, 1 mar. 1987.
- ULIANA, E. M.; SILVA, D. D. da; ULIANA, E. M.; RODRIGUES, B. S.; CORRÊDO, L. D. P. Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. **Ambiente e Água**, v. 10, n. 1, p. 82–88, 1 jan. 2015.
- USGS, (2017). **Landsat Surface Reflectance Level-2 Science Products | Landsat Missions**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/landsat-surface-reflectance-data-products>>. Acesso em: 5 dez. 2017.

- VILLAMARÍN, F.; MARIONI, B.; THORBJARNARSON, J. B.; NELSON, B. W.; BOTERO-ARIAS, R.; MAGNUSSON, W. E. Conservation and management implications of nest-site selection of the sympatric crocodylians *Melanosuchus niger* and *Caiman crocodilus* in Central Amazonia, Brazil. **Biological Conservation**, v. 144, n. 2, p. 913–919, 1 fev. 2011.
- VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; SERINALDI, F.; NTELEKOS, A. A. Analyses of seasonal and annual maximum daily discharge records for central Europe. **Journal of Hydrology**, v. 399, n. 3–4, p. 299–312, 18 mar. 2011.
- WARREN, M. S.; BRUMBY, S. P.; SKILLMAN, S. W.; KELTON, T.; WOHLBERG, B.; MATHIS, M.; CHARTRAND, R.; KEISLER, R.; JOHNSON, M. Seeing the Earth in the Cloud: Processing one petabyte of satellite imagery in one day. In: 2015 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR), **Anais**, IEEE, out. 2015.
- WEI, L.; HUBBART, J. A.; ZHOU, H. Variable Streamflow Contributions in Nested Subwatersheds of a US Midwestern Urban Watershed. **Water Resources Management**, v. 32, n. 1, p. 213–228, 9 jan. 2017.
- WESTRA, S.; SISSON, S. A. Detection of non-stationarity in precipitation extremes using a max-stable process model. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 1–2, p. 119–128, 18 ago. 2011.
- WMO, W. M. O. **Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability**. Geneva: WMO secretariat, 36 p., 1988.
- WULDER, M. A.; WHITE, J. C.; WOODCOCK, C. E.; BELWARD, A. S.; COHEN, W. B.; FOSNIGHT, E. A.; SHAW, J.; MASEK, J. G.; ROY, D. P. The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 271–283, 1 nov. 2016.
- 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, 1 mar. 2001.
- ZHANG, Q.; LI, B.; THAU, D.; MOORE, R. Building a Better Urban Picture: Combining Day and Night Remote Sensing Imagery. **Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 11887–11913, 16 set. 2015.
- ZHAO, F.; XU, Z.; ZHANG, L. Changes in streamflow regime following vegetation changes from paired catchments. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 10, p. 1561–1573, 15 maio 2012.
- ZHU, Z.; WOODCOCK, C. E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 118, p. 83–94, 15 mar. 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 1A - Estações fluviométricas com falhas, estações e r^2

Período	Estação com falha (y)	Estação de Apoio (x)	Coefficiente de determinação (r^2)
Vazão máxima anual	56988500	56989400	0,81
Vazão máxima anual	56960005	56976000	0,85
Vazão máxima anual	56976000	56977800	0,79
Vazão máxima anual	56983000	56988500	0,71
Vazão máxima anual	56990000	56988500	0,72
Vazão média anual	56988500	56989400	0,77
Vazão média anual	56960005	56988500	0,81
Vazão média anual	56976000	56978000	0,79
Vazão média anual	56978000	56976000	0,79
Vazão média anual	56983000	56988500	0,81
Vazão média anual	56990000	56988500	0,88
Vazão média do período chuvoso	56988500	56989400	0,87
Vazão média do período chuvoso	56960005	56976000	0,94
Vazão média do período chuvoso	56976000	56977800	0,94
Vazão média do período chuvoso	56983000	56988500	0,83
Vazão média do período chuvoso	56990000	56988500	0,86
Vazão média do período seco	56960005	56976000	0,73
Vazão média do período seco	56976000	56977800	0,86
Vazão média do período seco	56977800	56976000	0,86
Vazão média do período seco	56983000	56988500	0,75
Vazão média do período seco	56990000	56988500	0,82
Vazão mínima anual	56960005	56976000	0,73
Vazão mínima anual	56976000	56977800	0,86
Vazão mínima anual	56977800	56976000	0,86
Vazão mínima anual	56983000	56988500	0,83
Vazão mínima anual	56990000	56988500	0,78

Tabela 2A - Estações pluviométrica com falhas, estações de apoio e r^2

Período	Estação com falha (y)	Estação de Apoio (x)	Coefficiente de determinação (r^2)
Mensal	02042000	02041005	0,80
Mensal	02041005	02042000	0,80
Mensal	02041018	02041013	0,82
Mensal	02041048	02041017	0,81
Mensal	02041023	02041018	0,72
Mensal	01941000	01941011	0,81
Mensal	01941006	01941003	0,78
Mensal	01941003	01941006	0,78
Mensal	01941004	01941003	0,81

APÊNDICE B

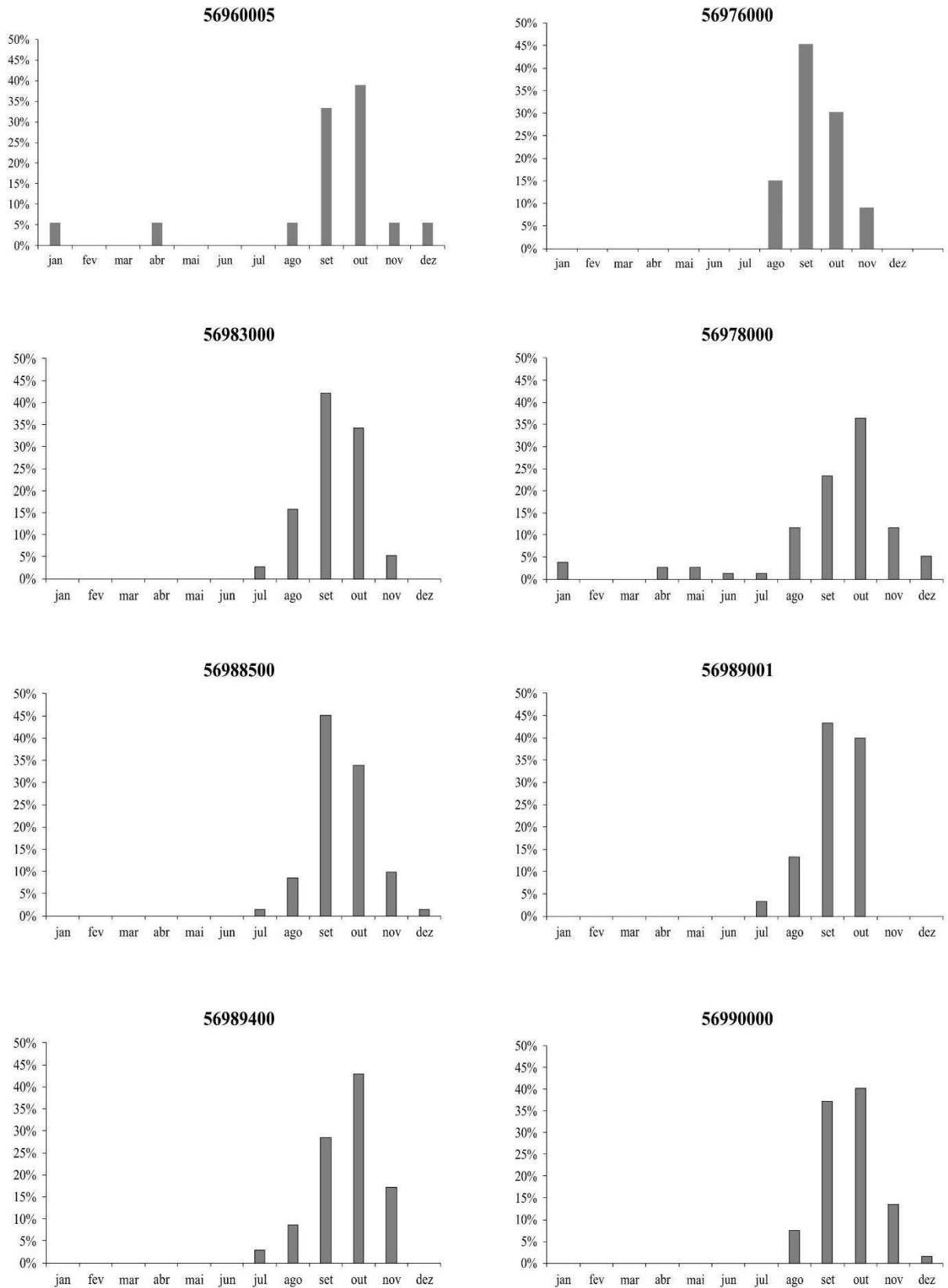


Figura 1B – Ocorrência da Q_7 para os dados históricos de cada uma das oito estações fluviométricas.

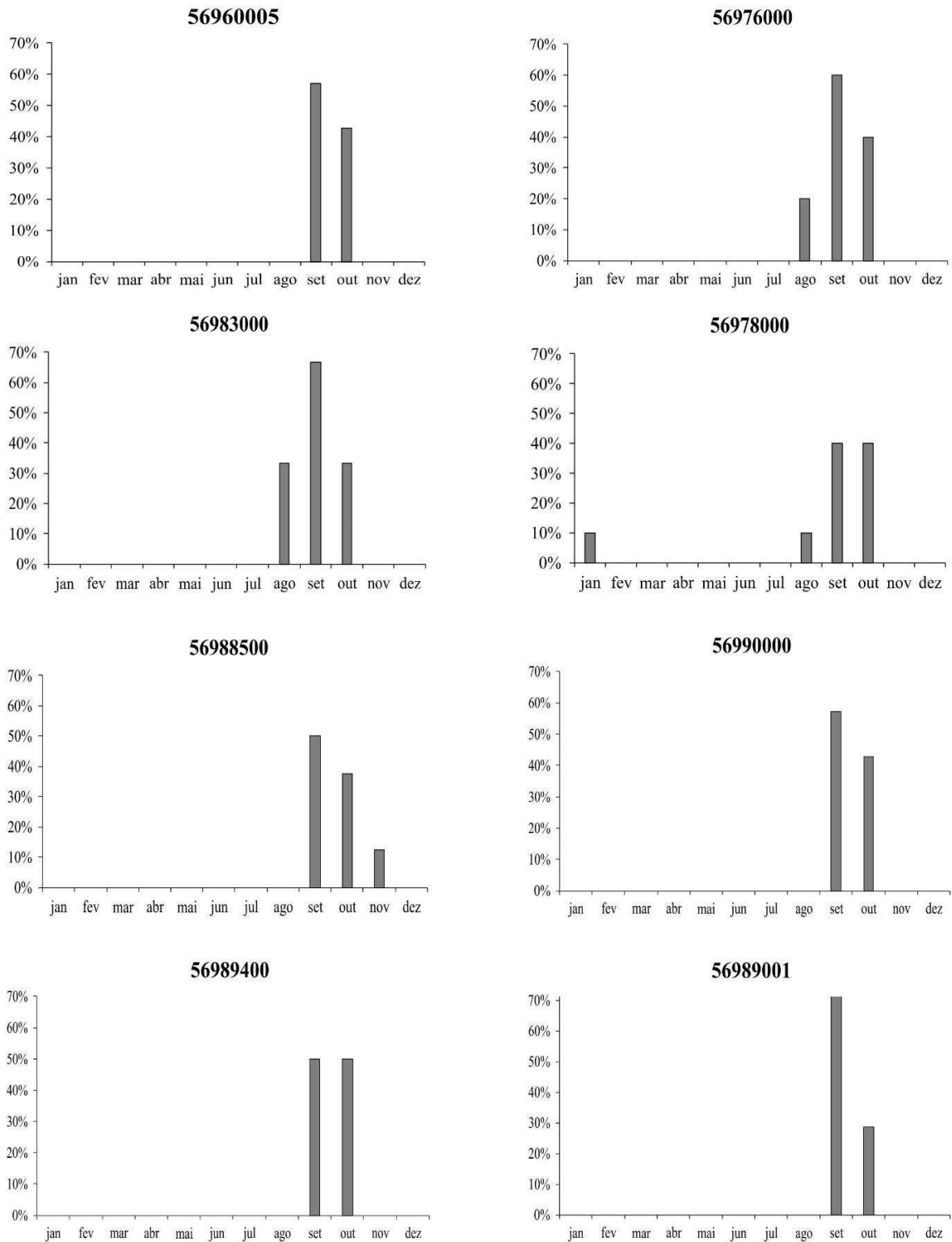


Figura 2B – Ocorrência da Q_7 para os dados históricos de cada uma das oito estações fluviométricas nos últimos 10 anos.

APÊNDICE C

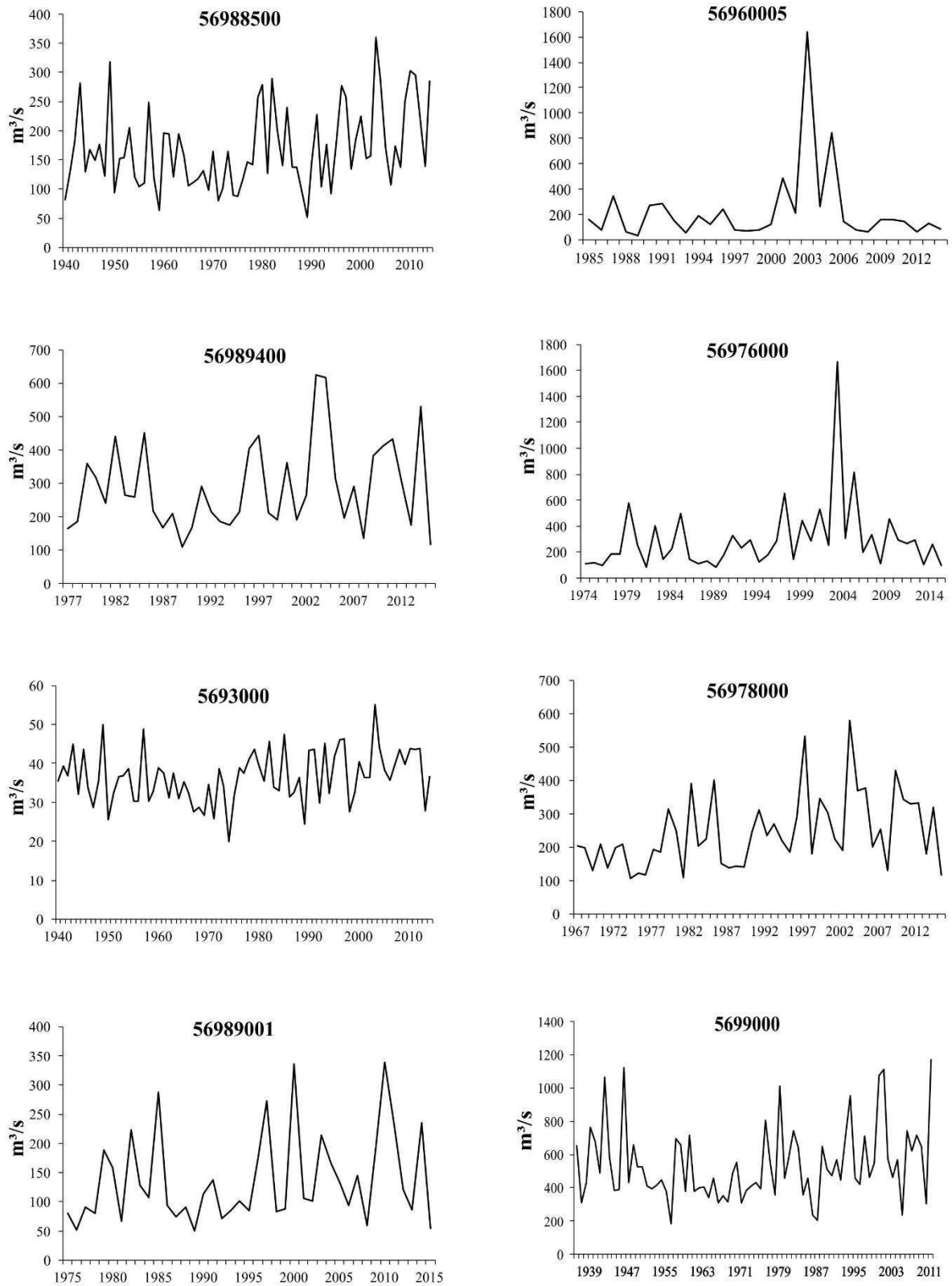


Figura 1C – Fluviograma das vazões máximas de cada uma das oito estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Manhuaçu.

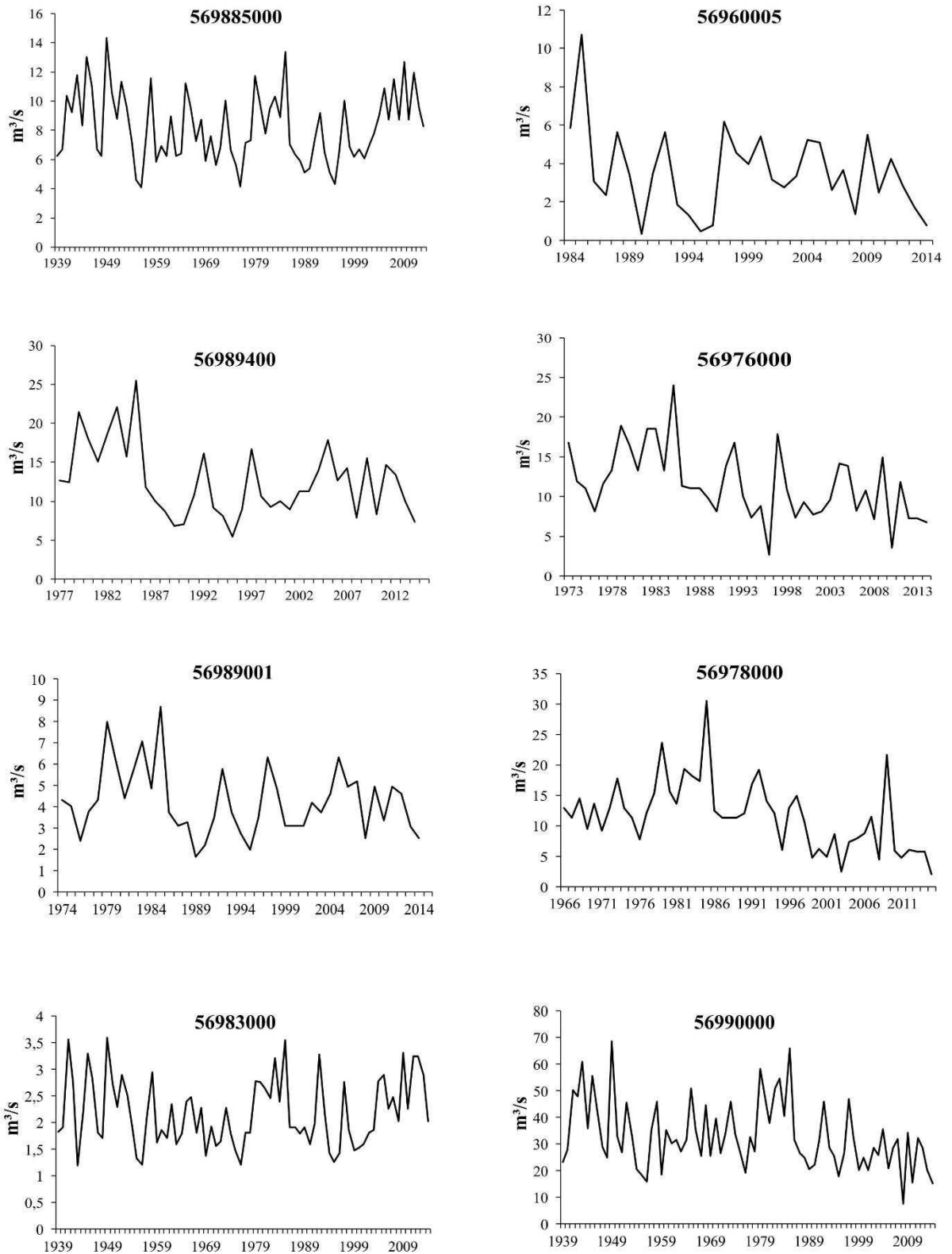


Figura 2C – Fluviograma das vazões mínimas de cada uma das oito estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Manhuaçu.

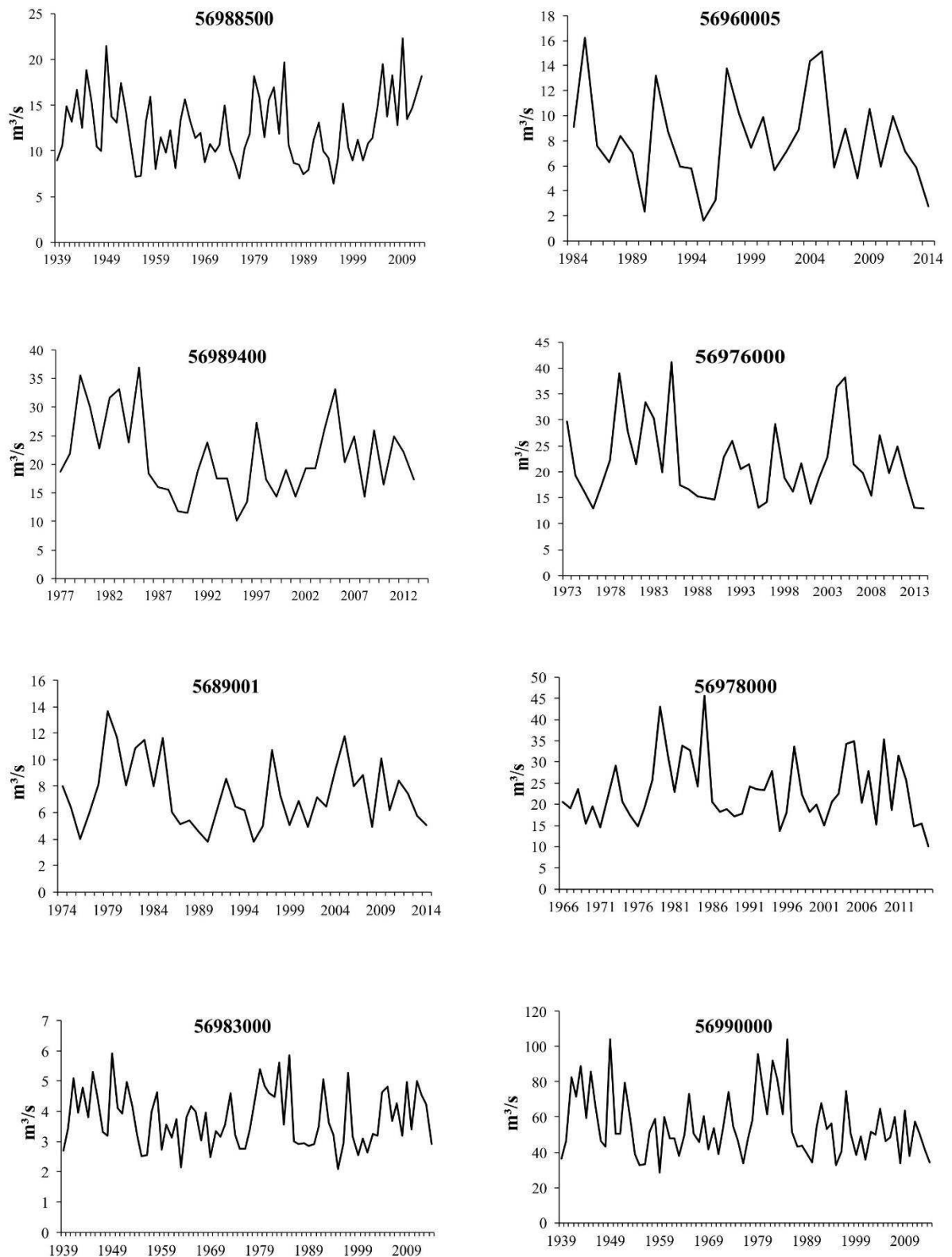


Figura 3C – Fluviograma das vazões médias de cada uma das oito estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Manhuaçu.

APÊNDICE D

Tabela 1D – Resultado da aplicação dos testes de Mann Kendall e Pettitt das estações fluviométricas

Estações	Período de análise	Teste de Mann Kendall			Teste de Pettitt	
		Tau de kendall	Z _{MK}	Z (α)	ρ	Nível de significância (α)
56960005	Vazão máxima	-0,02	-0,18	1,96	0,71	0,05
	Vazão mínima	-0,16	-1,27	1,96	0,69	0,05
	Vazão média	0,10	0,78	1,96	0,23	0,05
	Vazão média do período chuvoso	0,11	0,88	1,96	0,17	0,05
	Vazão média do período seco	-0,08	-0,65	1,96	0,91	0,05
56976000	Vazão máxima	0,17	1,56	1,96	0,08	0,05
	Vazão mínima	-0,37	-3,45	1,96	0,00	0,05
	Vazão média	0,09	0,82	1,96	0,23	0,05
	Vazão média do período chuvoso	0,10	0,89	1,96	0,10	0,05
	Vazão média do período seco	-0,11	-1,04	1,96	0,32	0,05
56978000	Vazão máxima	0,27	2,73	1,96	0,01	0,05
	Vazão mínima	-0,37	-3,82	1,96	0,00	0,05
	Vazão média	0,10	0,97	1,96	0,34	0,05
	Vazão média do período chuvoso	0,14	1,46	1,96	0,24	0,05
	Vazão média do período seco	-0,01	-0,15	1,96	0,59	0,05
56983000	Vazão máxima	0,17	2,10	1,96	0,01	0,05
	Vazão mínima	0,04	0,47	1,96	0,17	0,05
	Vazão média	-0,02	-0,26	1,96	0,84	0,05
	Vazão média do período chuvoso	0,05	0,40	1,96	0,38	0,05
	Vazão média do período seco	-0,04	-0,50	1,96	0,22	0,05

Tabela 1D - Continuação

56988500	Vazão máxima	0,18	2,33	1,96	0,01	0,05
	Vazão mínima	-0,02	-0,23	1,96	0,24	0,05
	Vazão média	0,07	0,82	1,96	0,07	0,05
	Vazão média do período chuvoso	0,10	1,22	1,96	0,06	0,05
	Vazão média do período seco	0,03	0,44	1,96	0,09	0,05
56989001	Vazão máxima	0,18	1,63	1,96	0,14	0,05
	Vazão mínima	-0,08	-0,79	1,96	0,12	0,05
	Vazão média	0,05	0,48	1,96	0,59	0,05
	Vazão média do período chuvoso	0,08	0,75	1,96	0,63	0,05
	Vazão média do período seco	-0,06	-0,60	1,96	0,13	0,05
56989400	Vazão máxima	0,11	0,93	1,96	0,29	0,05
	Vazão mínima	-0,18	-2,05	1,96	0,01	0,05
	Vazão média	-0,04	-0,38	1,96	0,09	0,05
	Vazão média do período chuvoso	-0,01	-0,10	1,96	0,22	0,05
	Vazão média do período seco	-0,08	-2,65	1,96	0,03	0,05
56989000	Vazão máxima	0,12	1,49	1,96	0,06	0,05
	Vazão mínima	-0,21	-2,68	1,96	0,00	0,05
	Vazão média	-0,01	-0,16	1,96	0,58	0,05
	Vazão média do período chuvoso	0,00	0,06	1,96	0,61	0,05
	Vazão média do período seco	-0,10	-1,34	1,96	0,16	0,05

*Linhas hachuradas representam as estações fluviométricas com comportamento não estacionário

Tabela 2D - Resultado da aplicação dos testes de Mann Kendall e Pettitt das estações Pluviométricas

Estações	Período de análise	Teste de Mann Kendall			Teste de Pettitt	
		Tau de kendall	Z MK	Z (α)	ρ	Nível de significância (α)
01941000	Precipitação Total	-0,03	-1,50	1,96	0,35	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	-0,15	-1,85	1,96	0,21	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,08	1,04	1,96	0,33	0,05
01941003	Precipitação Total	-0,08	-1,08	1,96	0,42	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	0,28	-1,09	1,96	0,55	0,05
	Precipitação do semestre seco	-0,03	-0,42	1,96	0,70	0,05
01941004	Precipitação Total	-0,07	-0,94	1,96	0,34	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	-0,14	-1,73	1,96	0,08	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,15	1,85	1,96	0,13	0,05
01941006	Precipitação Total	0,18	2,20	1,96	0,02	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	0,14	1,75	1,96	0,06	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,15	1,80	1,96	0,07	0,05
0141008	Precipitação Total	-0,01	-0,08	1,96	0,70	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	0,01	0,06	1,96	0,88	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,02	0,20	1,96	0,18	0,05
01941009	Precipitação Total	-0,06	-0,80	1,96	0,45	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	-0,01	-0,58	1,96	0,59	0,05
	Precipitação do semestre seco	-0,12	-1,77	1,96	0,52	0,05
01941010	Precipitação Total	-0,02	-1,29	1,96	0,99	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	0,01	0,26	1,96	0,99	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,00	0,00	1,96	0,44	0,05

Tabela 2D - Continuação

01941011	Precipitação Total	-0,02	-0,22	1,96	0,68	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	-0,01	-0,11	1,96	0,20	0,05
	Precipitação do semestre seco	-0,06	-0,60	1,96	0,20	0,05
01941019	Precipitação Total	-0,06	-0,54	1,96	0,94	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	-0,09	-0,73	1,96	0,64	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,14	1,12	1,96	0,11	0,05
02041005	Precipitação Total	0,14	0,03	1,96	0,32	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	-0,03	-0,38	1,96	0,31	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,14	1,74	1,96	0,31	0,05
02041008	Precipitação Total	-0,01	-0,19	1,96	0,62	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	0,00	-0,04	1,96	0,72	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,02	0,20	1,96	0,62	0,05
02041013	Precipitação Total	0,08	0,85	1,96	0,08	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	0,05	0,59	1,96	0,08	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,07	0,82	1,96	0,38	0,05
02041017	Precipitação Total	-0,02	-0,22	1,96	0,75	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	0,07	-0,33	1,96	0,67	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,04	0,40	1,96	0,45	0,05
02041018	Precipitação Total	0,01	0,11	1,96	0,77	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	0,04	0,46	1,96	0,85	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,01	0,09	1,96	0,24	0,05
02041023	Precipitação Total	0,07	0,65	1,96	0,13	0,05
	Precipitação do semestre chuvoso	0,02	0,22	1,96	0,25	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,13	1,27	1,96	0,20	0,05

Tabela 2D - Continuação

	Precipitação Total	0,02	0,11	1,96	0,79	0,05
2041048	Precipitação do semestre chuvoso	0,01	0,05	1,96	0,76	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,78	0,28	1,96	0,78	0,05
	Precipitação Total	0,10	1,29	1,96	0,06	0,05
02042000	Precipitação do semestre chuvoso	0,09	1,16	1,96	0,05	0,05
	Precipitação do semestre seco	0,08	1,03	1,96	0,08	0,05
	Precipitação Total	0,08	0,63	1,96	0,44	0,05
02047017	Precipitação do semestre chuvoso	0,08	0,83	1,96	0,54	0,05
	Precipitação do semestre seco	-0,04	-0,44	1,96	0,45	0,05

*Linha hachurada representa a estação pluviométrica com comportamento não estacionário

ANEXOS

ANEXO A

```

// Inserir os limites da area de estudo
var area = ee.FeatureCollection('ft:15dFkKFTzB5L9m840pKF4UNIPkM0b7U2YPvTxS4L2');

// Período de Analise e filtrar a imagem Landsat
var Imagem = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC8_SR')
    .filterDate("2014-06-01", "2014-08-31")
    .filterBounds(area);

// Funcao para a remoção de nuvens
var remover = Imagem.map(function(img) {
    var mask = img.select(['cfmask']).neq(4)
    return img.updateMask(mask)
});

// Função para criar uma imagem média do período
var median = ee.Image(remover.median())

Map.addLayer(median,
    {min:0, max: 3000, bands: 'B4, B3, B2'},
    'imagem media sem nuvens');

// calculando NDVI
var NDVI = median.expression(
    '(NIR - RED) / (NIR + RED)', {
        'NIR': median.select('B5'),
        'RED': median.select('B4')
    });

//obtenção de palletes para o NDVI e visualização do resultado
var ndvi_palette = 'FFFFFF, CE7E45, DF923D, F1B555, FCD163, 99B718, 74A901, 66A000,
    529400,+ '3E8601, 207401, 056201, 004C00, 023B01,012E01, 011D01, 011301';

Map.addLayer(NDVI, {min:-0.1, max: 1.0, palette: ndvi_palette}, 'NDVI');
Map.centerObject(area, 8);

// Exportar o resultado para o Google Drive
Export.image.toDrive({image:ndvi,
    description:'NDVI_2015_setembro',
    scale:30,
    region: area

});

```

ANEXO B

```

// Área de estudo
var local = ee.Geometry.Rectangle([-42.2974, -20.5299,-40.9406, -19.1815]);
Map.addLayer(local);

// Filtrar o período de análise
var evap = ee.ImageCollection('MODIS/NTSG/MOD16A2/105')
  .filterDate("2013-11-01", "2014-10-31")
  .filterBounds(local);

// Evapotranspiração do período de interesse
var EVP = ee.Image(evap.sum());

//Selecionar banda ET do produto MODIS16A2

var ET = ee.Image(EVP).select(['ET']).clip(local);

var calculo = ET.expression(
  '(BAND * 0.1)', {
    'BAND': ET.select('ET')
  });

// Adicionar o resultado ao mapa
var evp_palette = 'FFFFFF, CE7E45, DF923D, F1B555, FCD163, 99B718, 74A901, 66A000,
  529400,+3E8601, 207401, 056201, 004C00, 023B01,012E01, 011D01, 011301';

Map.addLayer(calculo, {min:0, max: 1500, palette: evp_palette}, 'evapotranspiration');
Map.centerObject(local, 8);

// Exportar o resultado para o google drive
Export.image.toDrive({image:calculo,
  description:'evapo_2014_anual',
  scale:1000,
  region: local
});

```