

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

AVALIAÇÃO DE MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS PARA A
CONSERVAÇÃO DE ÁREAS RIPÁRIAS

RAFAEL MARINI PASCHOALETTI PERRI DOS SANTOS

ARARAS – SP
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

**AVALIAÇÃO DE MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS PARA A
CONSERVAÇÃO DE ÁREAS RIPÁRIAS**

RAFAEL MARINI PASCHOALETTI PERRI DOS SANTOS

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Adriana Cavalieri Sais

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Agricultura e
Ambiente para obtenção do título de
Mestre em Agricultura e Ambiente.

ARARAS – SP
2017

Marini Paschoaletti Perri dos Santos, Rafael

AVALIAÇÃO DE MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS PARA A
CONSERVAÇÃO DE ÁREAS RIPÁRIAS / Rafael Marini Paschoaletti Perri
dos Santos. -- 2017.

90 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus
Araras, Araras

Orientador: Dra. Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad/

Coorientador: Dra. Adriana Cavalieri Sais

Banca examinadora: Dra. Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad,
Dra. Adriana Cavalieri Sais, Dra. Maria José Brito Zakia, Dr. Ricardo
Augusto Gorne Viani

Bibliografia

1. Índice Topográfico de Umidade. 2. Área de Preservação Permanente.
3. Restauração florestal. I. Orientador. II. Universidade Federal de São
Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Rafael Marini Paschoaletti Perri dos Santos, realizada em 27/06/2017:




Prof. Dra. Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad
UFSCar



Profa. Dra. Adriana Cavaliere Sais
UFSCar



Profa. Dra. Maria José Brito Zakia
IPEF



Prof. Dr. Ricardo Augusto Gorne Viani
UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais.

Agradeço todo corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente da Universidade Federal de São Carlos, Campus de Ciências Agrárias de Araras (SP), em especial às Professoras Dra. Maria Leonor R. C. Lopes-Assad e Dra. Adriana Cavaliere Sais, pela paciência e atenção para com minha orientação acadêmica e profissional.

Agradeço também aos professores, pesquisadores e profissionais que de algum modo me prestaram colaboração e auxílio no decorrer deste trabalho e de minhas atividades acadêmicas: Professor Dr. José Marques Júnior, Dr. Eduardo Delgado Assad, Professor Dr. Ricardo Augusto Gore Viani, Professora Dra. Renata Evangelista de Oliveira, Dra. Maria José Brito Zakia e Dra. Laura Fernanda Simões da Silva.

Agradeço também à CAPES pela Bolsa concedida.

RESUMO

Resolver conflitos relacionados ao uso da água é um desafio para a sociedade atual. Dentre os fatores que preocupam a segurança hídrica destacam-se a crescente demanda de consumo, a contaminação dos mananciais, a degradação de áreas naturais e a imprevisibilidade das mudanças climáticas que resultam em períodos irregulares de secas e estiagens. As matas ripárias oferecem funções importantes para os serviços ecossistêmicos de provisão hídrica, mas em algumas regiões encontram-se degradadas e com baixa resiliência, necessitando de ações de restauração florestal. As geotecnologias permitem inferir as características físicas da paisagem e a microbacia hidrográfica (MBH) é uma unidade básica para o planejamento ambiental. Este trabalho teve por objetivo identificar áreas hidrologicamente importantes nas MBHs do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, de abastecimento público do município de Bebedouro (SP), e propor áreas prioritárias para a restauração florestal e manejo diferenciado. A hipótese é que as áreas de preservação permanente (APPs) de 30 m não são suficientes para abranger por completo as áreas ripárias destas MBHs. Considerou-se a eficiência da comunidade florestal em atenuar agentes químicos, sedimentos e a necessidade de interrupção de atividades potencialmente poluidoras próximas às áreas ripárias. Foram utilizadas imagens orbitais com resoluções espaciais de 30 m e 90 m, carta topográfica em escala 1:50.000 para obtenção e processamento de dados de elevação e uso e ocupação dos solos em sistema de informações geográficas (SIG), e legislação ambiental pertinente. Os resultados permitiram caracterizar as duas MBHs que são circunvizinhas e apresentaram semelhanças nos seus parâmetros físicos (fator de forma de bacia, densidade de drenagem, comprimento de canais, entre outros), na distribuição das classes do índice topográfico de umidade (ITU), de classes de declividade, de elementos de paisagem e de uso e ocupação dos solos. Foram gerados três cenários de áreas prioritárias para a restauração florestal. Observou-se que as áreas prioritárias para a restauração florestal e manejo diferenciado estão distribuídas próximas ao canal de drenagem das MBHs e estão relacionadas às APPs. Conclui-se que, nos três cenários estabelecidos, as APPs não são suficientes para a integral proteção de locais de caráter ripário e a metodologia adotada se mostrou eficiente para apontar ações de gestão de recursos hídricos em escalas maiores.

Palavras-chaves: Índice Topográfico de Umidade, Área de Preservação Permanente, matas ripárias, restauração florestal.

ABSTRACT

Nowadays, society has a challenge to deal with sustainable water use. High demand and water contamination, environmental degradation and the unpredictability of climate changes are some water insecurity causes. Riparian forests maintenance offers water ecosystems services, but in some cases the riparian ecosystem is in a degraded condition that require human intervention actions for forest restoration. In this way, geotechnologies help us to infer about physical landscape characteristics where watershed is a basic unity for environmental planning. This study aimed to identify important hydrologically areas of Consulta stream watershed and Retiro stream watershed and propose priorities areas for forest restoration and sustainable agricultural destination. The two watersheds are the main sources of public water supply in the city of Bebedouro (Brazil). It is hypothesized that the limits established by Brazilian forest law (BFL) riparian buffers zones may not fully guarantee the two watersheds riparian areas protection. It was assumed that the forest community plays an important role in the attenuation of chemical elements and sediments, and that is essential that there is a disruption of potentially polluting activities near riparian areas. It was used in the study images from orbital sensors spatial resolution 30 m and 90 m and topographical map 1:50.000 for obtaining and processing elevations data and land use in geographic information system (GIS), and environmental legislation. The results allowed to characterize the watersheds that are surrounding and presented similarities in their physical parameters (basin form, drainage density, channel length, and others) and the Topographic Wetness Index (TWI) class distribution, slope class, landscape elements and land use. Three scenarios of priority areas for forest restoration were generated. It was observed that the priority areas are distributed close to the drainage channel of watersheds and are partially related to required areas by BFL. It can be concluded that in the three scenarios established the BFL may not be sufficient for the full protection of riparian sites and the adopted methodology proved to be efficient for guiding water resources management actions at larges scales.

Key-words: Topographic Wetness Index, Permanent Protection Areas, riparian forests, forest restoration.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Largura mínima da área de preservação permanente de cursos hídricos naturais, em metros (m), medida a partir da calha do leito regular, conforme estabelecido pela Lei 12.651 (BRASIL, 2012).	19
Tabela 2. Limites das classes do Índice Topográfico de Umidade (ITU), a partir dos resultados gerados para as Microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), e reagrupamento das classes significativas (igual ou maior que 1% da frequência relativa), de acordo com a média dos valores de classes das duas microbacias. 31	
Tabela 3. Forma dos elementos de paisagem (FEP) usados na caracterização geomorfológica das microbacias do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP), definidos com base na curvatura vertical, curvatura horizontal e declividade da vertente. Adaptado de Pennock, Zearth e De Jong (1987).	37
Tabela 4. Estatística descritiva de valores de altitude obtidos nos diferentes Modelos Digitais de Elevação (MDE) das microbacias do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro.....	40
Tabela 5. Caracterização fisiográfica e ambiental das microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro.....	43
Tabela 6. Estatística descritiva do Índice Topográfico de Umidade (ITU) e suas variáveis para as microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), a partir dos modelos digitais de elevação de resolução espacial de 90 m (MDE-90) e de 30 m (MDE-30).....	45
Tabela 7. Estatística descritiva de valores de Índice Topográfico de Umidade (ITU) das microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), gerados para um modelo digital de elevação com resolução espacial de 90 m.	48
Tabela 8. Área, em hectares e em porcentagem, de curvatura horizontal (PLAN), curvatura vertical (PROF) e gradiente de declividade (GRAD) para as microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), pelo modelo digital de elevação de resolução espacial de 90 m.....	53
Tabela 9. Área, em hectares e em porcentagem, de classes de curvatura horizontal (PLAN), curvatura vertical (PROF) e gradiente de declividade (GRAD) das microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), pelo modelo digital de elevação de resolução espacial de 30 m.	53

Tabela 10. Área, em hectares e em porcentagem, por classe de declividade obtida pelo índice de declividade determinado no MDE-30 para as microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP).....	59
Tabela 11. Área, em hectares e em porcentagem, das classes de uso e ocupação na microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta do Córrego do Retiro, identificadas por meio de imagens RapidEye ano 2013 (setembro) e ano 2014 (fevereiro).....	60
Tabela 12. Área, em hectares e em porcentagem, dos diferentes usos identificados em áreas de preservação permanente (APP) e em área de uso consolidado (AUC) da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta, em Bebedouro (SP).	62
Tabela 13. Área, em hectares e em porcentagem, dos diferentes usos identificados em áreas de preservação permanente (APP) e em área de uso consolidado (AUC) da microbacia hidrográfica do Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP).	62
Tabela 14. Critérios usados para proposição de áreas prioritárias para conservação ambiental das microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro.....	66
Tabela 15. Delimitação das áreas prioritárias (P1, P2 e P3) para restauração florestal das microbacias do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, e situação do uso e ocupação em 2013.	67
Tabela 16. Resultado do cruzamento de informações de uso e ocupação dos solos, caracterização morfométrica das áreas úmidas e áreas de preservação permanente (APPs) da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta.	71
Tabela 17. Resultado do cruzamento de informações de uso e ocupação dos solos, caracterização morfométrica das áreas úmidas e áreas de preservação permanente (APPs) da microbacia hidrográfica do Córrego do Retiro.	72

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Forma dos elementos de paisagem e representação da tendência de direção de fluxos, categorizados de acordo com a curvatura vertical, a curvatura horizontal e a declividade da vertente. Fonte: Adaptado de Pennock, Zearth e De Jong (1987)..... 23
- Figura 2.** Método de facetas triangulares usados no cálculo do algoritmo de acumulação de fluxos (ac) MD_{∞} . O princípio do método fundamenta-se no cálculo do algoritmo D_{∞} , no qual a direção de fluxo num plano matricial pode tomar direções diversas (de 0° a 360° entorno do eixo X e Y). O método também permite a representação de mais de um fluxo, semelhante ao MFD. Fonte: SEIBERT; MCGLYNN, 2007. 25
- Figura 3.** Localização das microbacias hidrográficas (MBHs) do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP). Microbacias representadas em imagem do sensor orbital SRTM, resolução espacial de 90 m, em perspectiva 3D e com exagero vertical..... 26
- Figura 4.** Série temporal de 17 anos (1999 a 2015) da precipitação anual, por período chuvoso (PC) e seco (PS), para a região de Bebedouro (SP). Verifica-se uma concentração de 82,12% de precipitação entre os meses de outubro a março. Fonte de dados: LAPIG, 2015. 28
- Figura 5.** Esquema simplificado dos procedimentos adotados..... 29
- Figura 6.** Modelo determinístico-infinito (MD_{∞}) (SEIBERT; MCGLYNN, 2007): a) direções possíveis em um pixel, considerando oito facetas a partir da célula central de uma submatriz; b) princípio de cálculo de direção de fluxo (TARBOTON, 1997); c) exemplo de código de direção, ao redor da célula central, atribuído a um pixel; d) representação da direção do escoamento para a célula com menor cota. Adaptado de Bosquilia et al. (2013) e Seibert e McGlynn (2007). 32
- Figura 7.** Submatriz 3x3 das elevações para o cálculo do índice de Zevenbergen e Thorne (1987). No exemplo, a célula **z5** é a referência para o cálculo..... 35
- Figura 8.** Modelos digitais de elevação para a caracterização das microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP): (a) MDE-Carta, (b) MDE-90 e (c) MDE-30..... 41
- Figura 9.** Modelos digitais de elevação elaborados por meio do sensor SRTM, resolução 90 m, com representação altimétrica, hidrográfica e geográfica das microbacias hidrográficas do Córregos da Consulta e do Retiro, elaborados na escala 1:50.000: (a) as duas microbacias juntas; (b) microbacia do Córrego da Consulta e (c) microbacia do Córrego do Retiro. Imagens ilustrativas sem escala. 42

Figura 10. Mapas rasters das variáveis morfométricas para o cálculo do Índice Topográfico de Umidade, a partir dos sensores orbitais SRTM, resolução espacial de 90 m (MDE-90), e ASTER, resolução espacial de 30 m (MDE-30).....	46
Figura 11. Índice Topográfico de Umidade calculado, respectivamente, para os MDE-30 (a) e MDE-90 (b).	47
Figura 12. Área das classes do Índice Topográfico de Umidade, em hectares, por meio do modelo digital de elevação gerado com o SRTM, resolução 90 m: a) microbacia do Córrego da Consulta; b) microbacia do Córrego do Retiro.	49
Figura 13. Índice Topográfico de Umidade das microbacias hidrográficas gerado no MDE-90 com sete classes: (a) Córrego da Consulta; (b) Córrego do Retiro. Imagem ilustrativa sem escala.....	50
Figura 14. Mapas de declividade, curvatura horizontal e curvatura vertical, usados para a caracterização dos elementos de paisagem, estabelecidos para MDE-30 e MDE-90 para as microbacias do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro.	52
Figura 15. Forma dos elementos de paisagem das microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), adaptado de Pennock, Zebarth e De Jong (1987), a partir dos modelos digitais de elevação de resolução espacial de 30 m (MDE-30) e de 90 m (MDE-90).	55
Figura 16. Forma dos elementos de paisagem das microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), representadas no MDE-30, destacando-se em azul as áreas de sopé aluvial, a partir do cruzamento de classe plana, índice topográfico de umidade e classe de elevação de 526 a 590 m.	56
Figura 17. Área, em hectares, de formas dos elementos de paisagem nas microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta (a) e do Córrego do Retiro (b), em Bebedouro (SP), definidas no modelo digital de elevação de 30 m de resolução.....	57
Figura 18. Classes de declividade das microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), definidas por meio de modelo digital de elevação com resolução de 90 m (MDE-90).	58
Figura 19. Classes de declividade para as microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), definidas por meio do modelo digital de elevação com resolução espacial de 30 m. Imagem ilustrativa (sem escala).	58
Figura 20. Classes de uso e ocupação nas microbacias dos Córregos da Consulta e Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP), identificadas por meio de imagens RapidEye ano 2013(setembro) e ano 2014 (fevereiro). Ilustração sem escala.	60

Figura 21. Vegetação herbácea não cultivada observada na área de estudo: a) imagem* das duas bacias; b) detalhe de uma área de ocorrência próxima a um canal de drenagem da microbacia hidrográficas do Córrego do Retiro; c) detalhe de uma área de ocorrência próxima a um canal de drenagem da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta.....	61
Figura 22. Cruzamento das informações das classes do Índice Topográfico de Umidade (ITU) com as formas dos elementos de paisagem das microbacias hidrográficas Consulta e do Retiro.	63
Figura 23. Locais de incidência do Índice Topográfico de Umidade (ITU classe 1: > 14) em relação as formas dos elementos de paisagem da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta e microbacia do Córrego do Retiro.	64
Figura 24. Agrupamento das classes resultantes do cruzamento do Índice Topográfico de Umidade e elementos de paisagem das microbacias Consulta e Retiro.	65
Figura 25. Resultado da delimitação das áreas prioritárias P1 e uso ocupação nas microbacias do Córrego da Consulta e Córrego do Retiro em (a) conforme processamento automatizado de índices topográficos de acordo com as classes do Índice Topográfico de Umidade; e em (b), delimitação das áreas prioritárias P1, P2 e P3.	68
Figura 26. Cenários de áreas prioritárias para restauração florestal em relação às Áreas de Preservação Permanente nas microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro.	70

LISTA DE ABREVIATURAS

- ac:** Área de acumulação de fluxos
- APP:** Área de preservação permanente
- AHS:** Área hidrologicamente sensível
- AVA:** Área variável de afluência
- β :** ângulo de inclinação da encosta
- FEP:** Forma dos elementos de paisagem
- GRAD:** Gradiente de declividade
- ITU:** Índice topográfico de umidade
- MBH:** Microbacia hidrográfica
- MDE:** Modelo Digital de Elevação
- MD ∞ :** Algoritmo de direção de fluxos com oito facetas triangulares
- MEI:** Meia encosta de declividade íngreme
- MES:** Meia encosta de declividade suave
- OM:** Ombro
- P:** planar (declividade)
- P1, P2 e P3:** prioritária 1, prioritária 2 e prioritária 3
- PLAN:** Curvatura horizontal
- PROF:** Curvatura vertical
- SA:** Sopé aluvial
- SC:** Sopé coluvial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo principal	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 A importância das áreas ripárias para a provisão hídrica	18
3.2 Atributos de relevo para caracterização ambiental de microbacias hidrográficas.....	22
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1 Caracterização da área de estudo.....	26
4.2 Modelos Digitais de Elevação (MDE).....	28
4.3 Índice Topográfico de Umidade (ITU).....	30
4.3.1 Cálculo do algoritmo de acumulação dos fluxos (ac).....	32
4.4 Declividade, curvatura horizontal, curvatura vertical e forma dos elementos de paisagem (FEP)	34
4.5 Uso e ocupação dos solos e aspectos legais das Áreas de Preservação Permanente (APPs).....	37
4.6 Avaliação dos resultados e delimitação de áreas prioritárias	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 Caracterização das microbacias hidrográficas.....	40
5.1.1 Caracterização das áreas úmidas pelo Índice Topográfico de Umidade (ITU).....	45
5.1.2 Caracterização dos elementos de paisagem.....	51
5.1.3 Caracterização do uso e ocupação dos solos	59
5.2 Diagnóstico das microbacias hidrográficas e cenários para a restauração florestal ..	63
6. CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICES	82
Apêndice A – Dados da série temporal de 17 anos de chuvas para a região de Bebedouro (SP) obtidas a partir de imagens de satélite de resolução 3000 m.....	83
Apêndice B - Percentil dos valores do Índice Topográfico de umidade ($\ln*ac/B$) das Microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e Córrego do Retiro.	84
Apêndice C- Classes de frequência do ITU para a Microbacia do Córrego da Consulta. Valores em negrito apresentaram frequência relativa maior que 1% em relação ao total de amostras.....	84
Apêndice D- Classes de frequência para a Microbacia Retiro. Valores em negrito apresentaram frequência relativa maior que 1% em relação ao total de amostras.	85

Apêndice E- Representatividade em hectares das sete classes do Índice Topográfico de Umidade nas microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro.....	85
Apêndice F- Formas dos elementos de paisagem das microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, elaborado por meio de imagens MDE-90.....	86
Apêndice G- Formas dos elementos de paisagem da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, elaborado por meio do MDE-30.....	87
Apêndice H- Classificação das Formas dos elementos de paisagem (FEP) para as microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e microbacia do Córrego do Retiro (MDE-30).....	88
Apêndice I- Classes de declividade para a microbacia do Consulta e do Retiro, obtido pelo índice de declividade do MDE-90.....	88
Apêndice J- Classificação das Formas dos elementos de paisagem em relação ao Índice Topográfico de Umidade da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro – Álgebra de mapas do Índice Topográfico de Umidade e elementos de paisagem (ITU/FEP).....	89

1. INTRODUÇÃO

A evolução da sociedade humana está intimamente ligada à sua habilidade de se relacionar com o ecossistema no qual está inserida. No processo de organização, regido por uma estrutura social e econômica, a qual se subsidia por recursos naturais, é fundamental a prática de um modelo de desenvolvimento sustentável, de forma a compatibilizar o uso e manejo dos recursos naturais com práticas conservacionistas que permitam a seguridade destes.

A microbacia hidrográfica (MBH) é uma unidade básica para o planejamento sustentável regional, de acordo com as características de cada microrregião. O estudo de bacias hidrográficas por meio de geotecnologias permite inferir características ambientais, orientar tomada de decisões para o planejamento e gestão territorial, e contribuir para o manejo de bacias hidrográficas de uma forma relativamente rápida e menos onerosa.

As áreas ripárias são áreas de transição terrestre/aquática, de dinâmica espacial e temporal decorrentes das interações entre clima, geomorfologia, vegetação, solo e alterações antrópicas. Consistem num ecossistema de significativa importância ecológica, econômica e social. As condições da vegetação ripária destas áreas, segundo Tundisi e Matsumura-Tundisi (2010), fazem parte do conjunto de estruturas e processos de importância múltipla, atuantes na regulação do ciclo d'água, composição química da água de drenagem, transporte de matéria orgânica, intensidade do escoamento direto e descarga dos aquíferos.

No Brasil, há mais de 50 anos as áreas ripárias são amparadas de forma legal como Áreas de Preservação Permanente (APP)¹, fixadas de acordo com a largura do curso hídrico. No entanto, em determinadas regiões, a vegetação ripária encontra-se muito reduzida pelo alto grau de uso e ocupação antrópicos. E, devido às características dinâmicas e peculiares do ecossistema ripário, em casos específicos, é possível que regras generalistas não sejam suficientes para a conservação destas áreas de forma integral. Estima-se que apenas no estado de São Paulo, um milhão de hectares de florestas ripárias precisam ser recuperados/restaurados (KUNTSCHIK; EDUARTE; UEHARA, 2010).

Portanto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar as microbacias hidrográficas (MBHs) do Córrego da Consulta e do Córrego e Retiro, compreendidas na bacia hidrográfica do Baixo Pardo / Grande. Ambas possuem uso agrícola e são as principais fontes de água potável para o abastecimento público do município de Bebedouro (SP).

¹ BRASIL. Lei 12.651, de 25 de maio de 2012. Lei 4.771, de 15 de setembro de 1965.

Considerou-se como hipótese que a largura da faixa de APP para os cursos hídricos preconizadas pela Lei 12.651 (BRASIL, 2012), que estabelece um cenário de 30 m de faixa exigida para os cursos d'água com menos de 10 m de largura, pode não ser suficiente para o recobrimento de trechos ripários de cursos hídricos nas MBHs da área de estudo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

Identificar áreas hidrologicamente importantes nas MBHs do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, de abastecimento público do município de Bebedouro (SP), e propor áreas prioritárias para a restauração florestal e manejo diferenciado.

2.2 Objetivos específicos

- Elaborar um banco de dados geográficos da área de estudo com espacialização do uso e ocupação dos solos, remanescentes florestais, áreas de preservação permanente (APP) e áreas de uso consolidado;
- Caracterizar a morfometria e os elementos de paisagem das MBHs;
- Identificar as áreas ripárias por métodos indiretos utilizando modelos digitais de elevação (MDE) com diferentes escalas espaciais;
- Propor áreas prioritárias para ações de restauração florestal e ou áreas de manejo diferenciado;
- Estabelecer cenários a partir da integração dos dados organizados, considerando a legislação referente às APPs e às áreas de uso consolidado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A importância das áreas ripárias para a provisão hídrica

Estima-se que em 2030 o mundo enfrentará um déficit no abastecimento de água de 40%, caso sejam mantidos os atuais padrões de consumo (UNESCO, 2015). Os fatores que comprometem a segurança hídrica, além do alto consumo e da demanda crescente pelos recursos hídricos, são a contaminação de mananciais por agentes químicos e biológicos e o manejo inadequado de solo e vegetação em bacias hidrográficas (REICHARDT, 1985; WALTER et al., 2000; TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2010).

No Brasil, o gerenciamento de recursos hídricos é legalmente regulamentado pelo artigo 1º da Lei 9.433 (BRASIL, 1997), que institui a água como um bem de domínio público, limitado e dotado de valor econômico, e estabelece a bacia hidrográfica como unidade territorial de gestão dos recursos hídricos, de forma descentralizada, contando com a participação do poder público, dos usuários e da sociedade.

O limite de uma bacia hidrográfica é estabelecido com base em características físicas, hidrológicas e geomorfológicas. Definido por um conjunto de superfícies vertentes e rede de drenagem, onde ocorre entrada de água (por precipitação) e saída (pelo canal principal e por evaporação, transpiração e volume infiltrado profundamente) (SILVEIRA, 1997). Mas também pode ser estabelecido de acordo com critérios administrativos direcionados a políticas e programas de gestão dos recursos hídricos e de uso e ocupação dos solos (LIMA, 2008).

Com intuito de proteção da integridade dos mananciais, corpos d'água, cursos hídricos, além de biodiversidade, estabilidade geológica e beleza cênica, o artigo 4º da Lei 12.651 (BRASIL, 2012) estabelece regras para a manutenção de faixas com vegetação nativa nestes locais. As regras para a largura das faixas de proteção com vegetação ripária (Tabela 1) são basicamente determinadas de acordo com a natureza hídrica, largura do curso hídrico e locais de características topográficas de elevada inclinação e altitude. Para casos específicos, a largura da faixa é determinada conforme o histórico de uso da APP² e o tamanho da propriedade rural (em módulos fiscais), podendo haver redução³ do tamanho das faixas de proteção mínima exigida a serem recuperadas / restauradas. No entanto, critérios de forma abrangente podem não assegurar a proteção integral dos recursos hídricos, quando se

² Com base na situação da APP antes da data de 22 de julho de 2008, estabelecida na lei florestal.

³ Possibilidade de redução para 5 m ou de 20 a 100 m de APP a ser restaurada e de uso consolidado (Lei 12.727/2012, artigo 61A).

consideram as peculiaridades ambientais de cada local, bem como a relevância econômica e social regional do uso dos recursos naturais provenientes de determinada MBH.

Tabela 1. Largura mínima da área de preservação permanente de cursos hídricos naturais, em metros (m), medida a partir da calha do leito regular, conforme estabelecido pela Lei 12.651 (BRASIL, 2012).

Largura do curso hídrico	Largura da faixa com vegetação nativa
Menor que 10 m	30 m
De 10 a 50 m	50 m
De 50 a 200 m	100 m
De 200 a 600 m	200 m
Superior a 600 m	500 m

Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de ações e iniciativas de âmbito regional (municipais e intermunicipais), orientadas por critérios técnicos e amparadas nas diretrizes e instrumentos do Plano Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), que aborda a possibilidade de criação de áreas sujeitas à restrição de uso para proteção dos recursos hídricos⁴. Por exemplo, Walter et al. (2000), por meio do conceito de área variável de afluência (AVA), desenvolveram um trabalho em MBHs de abastecimento de água potável para a cidade de Nova Iorque no qual quantificaram as áreas propensas ao escoamento superficial e as áreas de atividades agrícolas do entorno que poderiam oferecer riscos de contaminação do meio hídrico, classificando-as como áreas hidrologicamente sensíveis (AHS). Com base no conceito de AHS de Walter et al. (2000), seria possível estabelecer áreas restritas ao uso para proteção dos recursos hídricos, ou restrição a formas de manejo em áreas ambientalmente vulneráveis, e que poderiam ser destinadas à conservação com vegetação natural, ofertando serviços ecossistêmicos (PETERJOHN; CORRELL, 1984; LOWRENCE, 1989) e também incremento em biodiversidade.

Os processos hidrológicos das áreas ripárias, considerando-se os conceitos de AVA⁵ (HEWLETT; HIBBERT, 1967) e de área parcial de contribuição (BETSON, 1964), conferem a essas áreas um caráter dinâmico, devido à sua capacidade de mudança temporal e espacial, a depender de características⁶ particulares de cada local. Gregory et al. (1991, p. 540) descreveram as áreas ripárias sob a perspectiva de um ecossistema de interações terrestres e

⁴ BRASIL. Lei 9.433, 1997, art.º 7, item X.

⁵ De acordo com Hewlett e Hibbert (1967), as áreas variáveis de afluência (AVAs) são locais propensos a uma rápida saturação hídrica, onde os processos hidrológicos de escoamento direto são atuantes na bacia hidrográfica.

⁶ Clima (frequência e incidência de precipitação), geomorfologia da bacia (padrão da rede de drenagem, rugosidade do relevo); solos; e interferências antrópicas (HEWLETT; HIBBERT, 1967).

aquáticas, no qual os limites e processos ecológicos específicos são determinados por padrões espaciais únicos e uma dinâmica temporal. E acrescentam:

Estendendo este conceito para tempo e espaço, as áreas ripárias podem ser vistas em termos de padrões espaciais e temporais de processos hidrológicos e geomorfológicos, sucessão de plantas terrestres e o ecossistema aquático. Este modelo de ecossistema é baseado na premissa de que processos geomórficos criam um mosaico de canais de drenagem e planícies de inundações no fundo do vale. Processos de perturbação geomórficos e outros distúrbios, tanto de origem fluvial como originárias de áreas mais acima na paisagem, afetam o ecótono ripário⁷, determinando o padrão espacial e o desenvolvimento sucessional da vegetação ripária. (GREGORY et al., 1991, p. 540)

As áreas ripárias, geralmente, são associadas a estreitas faixas de terra marginais a corpos hídricos (córregos, riachos, rios, etc.), sob influência do lençol freático na superfície (ELMORE; BESCHTA, 1987; ZAKIA et al., 2009), podendo se expandir para zonas mais distantes influenciadas pela topografia, tipo de solo, nível freático e vegetação adaptada ao ecossistema ripário (GREGORY et al. 1991; NAIMAN; DÉCAMPS; McCLAIN, 2005).

Em ecossistemas florestais, a vegetação ripária recebe diferentes designações: mata ciliar, mata de galeria, vegetação ribeirinha, floresta aluvial, entre outras (LINDMAN; FERRI, 1974; LEITÃO-FILHO, 1982; RIBEIRO; WALTER, 1998; PINTO; OLIVEIRA-FILHO, 1999). O termo mata ciliar pode ser entendido como uma definição mais genérica do ecótono ciliar, contendo todas as variações florísticas e estruturais de formações ao longo dos cursos d'água (IVANAUSKAS; RODRIGUES; NAVE, 1997), de acordo com o gradiente de umidade dos solos e adaptação de espécies a estas condições.

Além de importância hidrológica, as matas ripárias oferecem uma gama de serviços ecossistêmicos. Talvez a mais notável das contribuições seja a manutenção de água de alta qualidade em uma bacia hidrográfica, constituindo a melhor cobertura vegetal para proteção hídrica de bacias hidrográficas destinadas ao suprimento de água potável (HAMILTON et al., 2008). Outros serviços ecossistêmicos estão relacionados com funções hidrológicas de provisão hídrica. Diversos trabalhos apontam a contribuição da comunidade florestal ripária na proteção biogeoquímica do meio ripário e aquático (PETERJOHN; CORRELL, 1984; MAYER; REYNOLDS Jr.; CANFIELD, 2005; RANALLI; MACALADY, 2010); atenuação dos processos de geração do escoamento superficial e pico de cheias (TUCCI; CLARKE, 1997; TABACCHI et al. 2000; TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI,

⁷ Conforme conceituação do termo *Riparian Tones* em Gregory et al. (1991).

2010), e equilíbrio térmico das águas (HAMILTON et al., 2008). Favorecem também o biofuncionamento do solo (PINAY; DECAMPS, 1988; NAIMAN; DÉCAMPS; McCLAIN, 2005), a estabilização das margens nos processos de erosão e assoreamento e processos geomorfológicos fluviais de formação de terraços e agradação dos canais e formações parafluviais (lagoas e cursos temporários) (ELMORE; BESCHA, 1987; GREGORY et al., 1991; STANFORD, 2007), além de servir de habitat e de corredor para espécies de animais e fluxo de propágulos vegetais (NAIMAN; DÉCAMPS; McCLAIN, 2005).

As plantas ripárias têm importante papel no ciclo de nutrientes do solo e do subsolo. A ação de redução do nitrato nas áreas ripárias em bacias de uso agrícolas, por exemplo, é atribuída à denitrificação, atenuação pela vegetação e imobilização por microorganismos (PINAY; DECAMPS, 1988; RANALLI; MACALADY, 2010). Segundo Tabacchi et al. (2000), a influência da vegetação ripária sobre a ciclagem de nutrientes se dá por meios diretos e indiretos. Diretamente, por meio do incremento de matéria orgânica para microrganismos heterotróficos, como bactérias denitrificadoras. E, indiretamente, por meio de associações simbióticas de plantas e micróbios, como fungos micorrízicos ou microorganismos de nódulo de raízes (TABACCHI et al., 2000).

Nos processos hidrológicos de escoamento, as áreas ripárias podem servir de malha fonte ou malha atenuadora de nitrato proveniente de fontes externas para o curso hídrico, dependendo do percurso do fluxo de drenagem da água para o canal principal (TABACCHI et al., 2000; RANALLI; MACALADY, 2010). Peterjohn e Correll (1984), em experimento em uma bacia de uso agrícola (milho), observaram significativa redução nas concentrações de nitrato (HNO_3), P e C orgânico em fluxos superficiais⁸ e de nitrato no fluxo subsuperficial⁹ em pontos de coleta onde a faixa de cobertura florestal ripária apresentava-se maior.

No entanto, segundo Lugo; Brinson e Brown (1990), apenas a hidrologia não explica todo comportamento que envolve o ecossistema ripário. As áreas brejosas são parte de um grande ecossistema, no qual a configuração geomorfológica e o tamanho afetam o fluxo de materiais (água, sedimentos e nutrientes). Informações sobre a química dos solos e processos aeróbicos e anaeróbicos também são importantes para compreender a complexidades destas áreas. Estes processos estão associados a fatores atmosféricos,

⁸ Redução crescente em amostras coletadas na borda milho/floresta, floresta a dentro (19 m) e ponto de maior largura de vegetação florestal (50 m), respectivamente em: Nitrato: 10,5 mg L⁻¹, 1,93 mg L⁻¹ e 1,03 mg L⁻¹; Fósforo: 11,9 mg L⁻¹, 2,09 mg L⁻¹ e 1,04 mg L⁻¹; e C orgânico: 148,1 mg L⁻¹, 72,4 mg L⁻¹ e 45,6 mg L⁻¹.

⁹ Nos pontos borda milho/floresta, 19 m a dentro e 50 m a dentro: Nitrato: 6,96 mg L⁻¹, 0,35 mg L⁻¹, 0,45 mg L⁻¹; Fósforo: 0,006 mg L⁻¹, 0,005 mg L⁻¹, 0,0065 mg L⁻¹; e em C orgânico: 2,38 mg L⁻¹, 2,72 mg L⁻¹ e 2,81 mg L⁻¹.

hidrológicos e edáficos, e as plantas respondem a uma complexa ordem de adaptações bióticas que afetam a velocidade e eficiência da absorção, e o uso de nutrientes (LUGO; BRINSON; BROWN, 1990).

3.2 Atributos de relevo para caracterização ambiental de microbacias hidrográficas

O conhecimento da paisagem com base nas características da morfologia do relevo tornou-se importante para as mais diversas áreas da ciência. Apoiado em conceitos da morfometria ou geomorfometria, o estudo da paisagem foi integrado a outras disciplinas (hidrologia, pedologia, geologia, ecologia), propiciou o desenvolvimento de aplicações em estudos ambientais. Como exemplo tem-se a inferência de processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica por meio de algoritmos e índices topográfico para estabelecer a relação com outros processos, como morfogênese dos solos, relação solo-paisagem, composição e distribuição fitogeográfica de comunidades vegetais, entre outras.

A representação da topografia é uma alternativa para mensurações indiretas de processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos numa bacia hidrográfica (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991). Por meio da análise de dados topográficos pode-se simular aplicações para a hidrologia e geomorfologia, como representação de variações espaciais das condições hidrológicas e rotas de fluxos de acordo com variáveis de elevação, aspecto e declividade das vertentes e curvatura horizontal, distância entre pontos, distância e elevação em relação ao canal hídrico, bem como a combinação entre estas variáveis (SEIBERT; MCGLYNN, 2007).

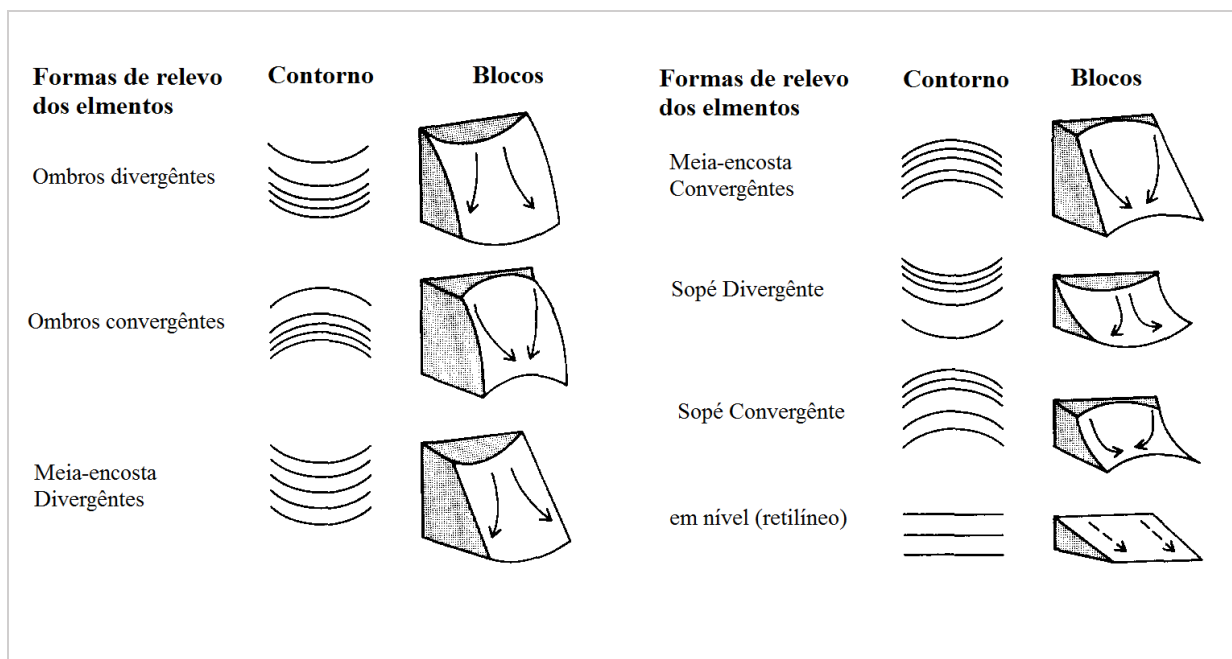
Índices topográficos têm sido classificados de diversas formas com base nas características dos atributos computados e ou na extensão espacial. Estes índices podem ser de primeira ordem (primários), quando consideram um único atributo topográfico, ou secundários ou compostos, quando envolvem a combinação de atributos primários, constituídos a partir de atributos de base física ou derivados por índices empíricos.

Por meio de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), índices topográficos permitem caracterizar a variabilidade espacial geográfica em relação a uma determinada variável de interesse, e simular processos que ocorrem na paisagem (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991; WILSON; GALLANT, 2000). O MDE pode ser entendido como um conjunto ordenado de números que representam a distribuição da elevação sobre o relevo por uma grade de píxeis com formas de representação variadas (malha triangular ou TIN, do

inglês *triangular irregular network*; grade regular; mapa de contorno) (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991).

Nos estudos de solo-geomorfologia, por exemplo, de acordo com Hall e Olson (1991), a busca de entendimento das formas de relevo sobre o escoamento hídrico, e influência nos processos de morfogênese e pedogênese e na variabilidade de solos, suscitou a representação de elementos de paisagem com base nas formas e posição desses elementos e dos componentes das vertentes (como por exemplo, em PENNOCK; ZEBARTH; De JONG, 1987; DIKAU, 1989; PENNOCK, 2003).

Figura 1. Forma dos elementos de paisagem e representação da tendência de direção de fluxos, categorizados de acordo com a curvatura vertical, a curvatura horizontal e a declividade da vertente. Fonte: Adaptado de Pennock; Zebarth e De Jong (1987).



Conforme apresentado na Figura 1, as formas dos elementos de paisagem são associadas a padrões de fluxos hídricos orientados pelo relevo, caracterizando padrões erosionais, deposicionais e de transporte de material de solo numa paisagem (PENNOCK; ZEBARTH; De JONG, 1987). Conforme Pennock (2003), elementos caracterizados como ombro de curvatura horizontal convexa (ombros divergentes) apresentam uma média de perda de solo maior que os demais elementos, seguido de outros elementos de ombro (independente de curvatura horizontal) e meia encosta. Por outro lado, elementos caracterizados como sopé côncavos são de maior ganho de solo, evidenciando o comportamento deposicional. Pennock

(2003) também observou que os processos erosionais se relacionaram com locais de alta acumulação de fluxo na paisagem.

Outro índice utilizado para caracterizar processos hidrológicos é o Índice Topográfico de Umidade (ITU) [$\ln(ac/\tan\beta)$]. Também conhecido como índice composto, o ITU é utilizado no modelo hidrológico TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979), desenvolvido para prever a resposta de vazão hídrica em pequenas bacias hidrográficas. De acordo com o conceito de AVA de Hewlett e Hibbert (1967), o TOPMODEL fundamenta-se na ideia de similaridade hidrológica, em que locais de mesmo índice topográfico tendem a um comportamento hidrológico similar (SILVA; KOBAYAMA, 2007). Áreas com um alto ITU teriam maior predisposição a uma rápida saturação hídrica, enquanto que os baixos índices representariam áreas de tendência à infiltração, considerando-se, neste caso, bacias hidrográficas com boa cobertura vegetal e capacidade de infiltração.

O uso do ITU na modelagem hidrológica assume que i) o escoamento lateral pode ser representado por uma sucessão de estados constantes do nível freático na topografia; ii) existe uma relação exponencial entre o nível do lençol freático e a quantidade de fluxo lateral produzido; e iii) o gradiente hidráulico local pode ser aproximado de acordo com a declividade da superfície ($\tan \beta$) (QUINN, 1991). O ITU assume também condições de infiltração e transmissividade espacialmente invariáveis, no qual, a variável transmissividade lateral do perfil do solo é atribuída na formulação original do índice, mas geralmente é omitida (GRUBER; PECKHAM, 2009).

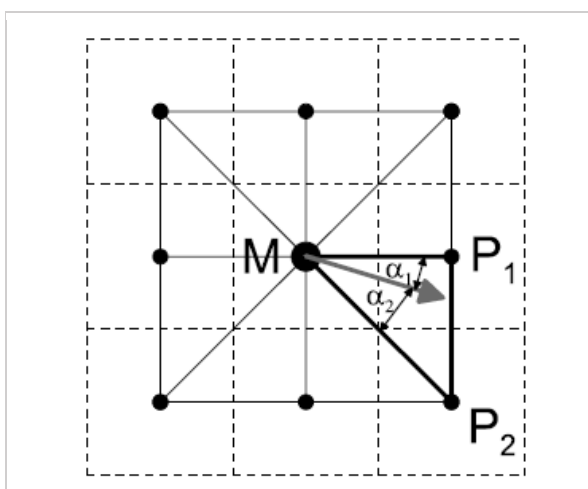
A simulação do escoamento lateral é representada por meio da variável acumulação de fluxos ou área de contribuição (ac). O conceito de ac é muito importante para aplicações hidrológicas, por permitir determinar e quantificar a área de drenagem da água da precipitação numa determinada bacia hidrográfica, estando intimamente correlacionada ao volume de precipitação média anual do local e o pico de vazão durante um determinado evento (GRUBER; PECKHAM, 2009). A variável ac é calculada por meio de algoritmos que relacionam as variáveis de elevação entre todas as células de um MDE, representando em pixels as rotas preferenciais do fluxo hídrico no relevo e os locais onde a água se concentra nas bacias hidrográficas.

Existem diversos métodos e algoritmos de determinação da ac disponíveis na literatura (FREEMAN, 1991; COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994; QUINN, 1991; QUINN; BEVEN; LAMB, 1995; TARBOTON, 1997; SEIBERT; MCGLYNN, 2007; QIN et al., 2011; entre outros). Diferenciam-se, basicamente, quanto ao procedimento de cálculo para atender a

um propósito de representação diante da complexidade da paisagem. A variável ac é fundamental para o desempenho do ITU.

Os algoritmos de representação de ac disponíveis variam desde métodos mais simples a métodos mais robustos. Diferenciam-se basicamente em duas modalidades quanto aos métodos de representação: i) algoritmos de fluxo unitário, como por exemplo, o Determinístico-8 (D8) (O'CALLAGHAN; MARK, 1984), Determinístico-infinito (D^∞) (TARBOTON, 1997); e ii) métodos de representação de fluxos múltiplos, a exemplo do algoritmo de fluxo múltiplo (MFD) (QUINN; BEVEN; LAMB, 1995) e o algoritmo de direção de fluxos com oito facetas triangulares (MD^∞) (SEIBERT; MCGLYNN, 2007), ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Método de facetas triangulares usados no cálculo do algoritmo de acumulação de fluxos (ac) MD^∞ . O princípio do método fundamenta-se no cálculo do algoritmo D^∞ , no qual a direção de fluxo num plano matricial pode tomar direções diversas (de 0° a 360° entorno do eixo X e Y). O método também permite a representação de mais de um fluxo, semelhante ao MFD. Fonte: SEIBERT; MCGLYNN, 2007.



Desta forma, os índices topográficos permitem aplicações diretas na modelagem de processos que ocorrem na paisagem, ou uso como medida substitutiva de mensuração de processos complexos que demandariam mensurações diretas em campo, que nem sempre é viável devido a restrições físicas, econômicas e de tempo (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991). Portanto, servem como uma alternativa ou complementação para trabalhos de planejamento ambiental e agrícola em microbacias hidrográficas.

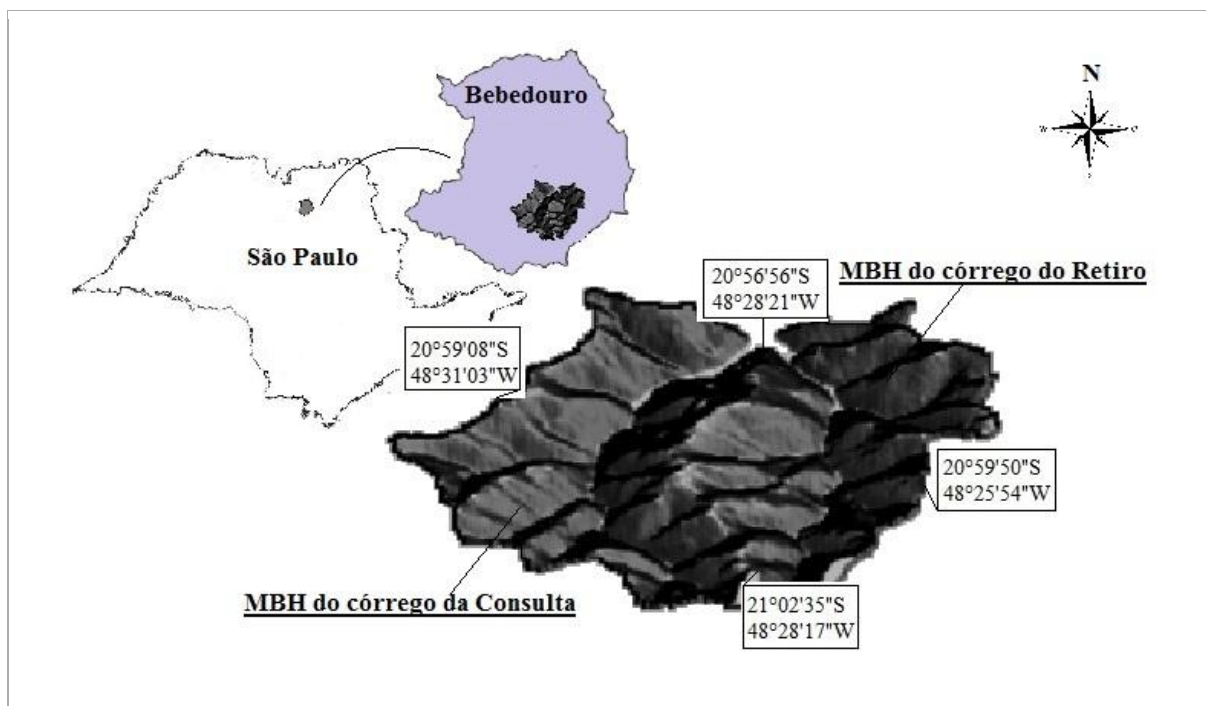
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido nas microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e Córrego do Retiro, tributários do Rio Pardo, que passam a formar o Córrego Bebedouro a partir do ponto de encontro destes cursos d'água. As MBHs fazem parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Baixo Pardo / Grande (UGRHI 12). Juntas possuem área de 7.641,73 (ha), sendo 4.022,51 ha de área da MBH Córrego da Consulta e 3.619,21 ha da MBH do Córrego do Retiro.

As microbacias estão localizadas no município de Bebedouro, na região norte do Estado de São Paulo (Figura 3), e são as principais fontes de água para abastecimento público urbano do município. Segundo dados do IBGE (2010), Bebedouro possui uma população de 75.035 habitantes, sendo que apenas 4,7% são residentes na zona rural.

Figura 3. Localização das microbacias hidrográficas (MBHs) do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP). Microbacias representadas em imagem do sensor orbital SRTM, resolução espacial de 90 m, em perspectiva 3D e com exagero vertical.



De acordo com os dados cartográficos do mapa de Geodiversidade do estado de São Paulo (PEIXOTO, 2010) as microbacias hidrográficas situam-se na bacia sedimentar do Paraná, grupo Bauru, e unidade geológica do Vale do Rio do Peixe. Segundo Fernandes e Coimbra (2000), a formação Vale do Rio do Peixe repousa diretamente sobre o basalto da formação Serra Geral (Grupo São Bento). Na região de Bebedouro (Distrito de Andes), a formação Adamantina possui de 50 a 135 metros de espessura (CARLOS et al., 2012).

Por meio de mapa de solos no formato *shapefile* (OLIVEIRA et al., 1999) foi possível relacionar a ocorrência de duas classes de solo para as microbacias: Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolos Vermelho. Os Argissolos apresentam eluviação de argila do horizonte superficial para o B, formando um horizonte B textural com argila de atividade baixa ou alta; os Latossolos apresentam horizonte B latossólico, e são bem evoluídos e intemperizados (SANTOS et al., 2014).

O uso e ocupação dos solos é majoritariamente por atividades agrícolas (85% e 86%, respectivamente para Consulta e Retiro), principalmente cana-de-açúcar e citricultura (laranja), e em menor escala silvicultura, hortaliças, entre outras atividades. O restante da área é ocupado por corpos d'água (geralmente artificiais), áreas edificadas, rodovias e estradas e vegetação de formação florestal e vegetação herbácea não cultivada. A fitofisionomia da região, de acordo com dados do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG), abrangem os domínios Floresta Atlântica e Cerrado, e conforme observações em campo, caracterizam-se por vegetação de transição entre a Floresta Estacional Semidecidual e Savana Florestada, e também de matas ciliares (LAPIG, 2016a, 2016b).

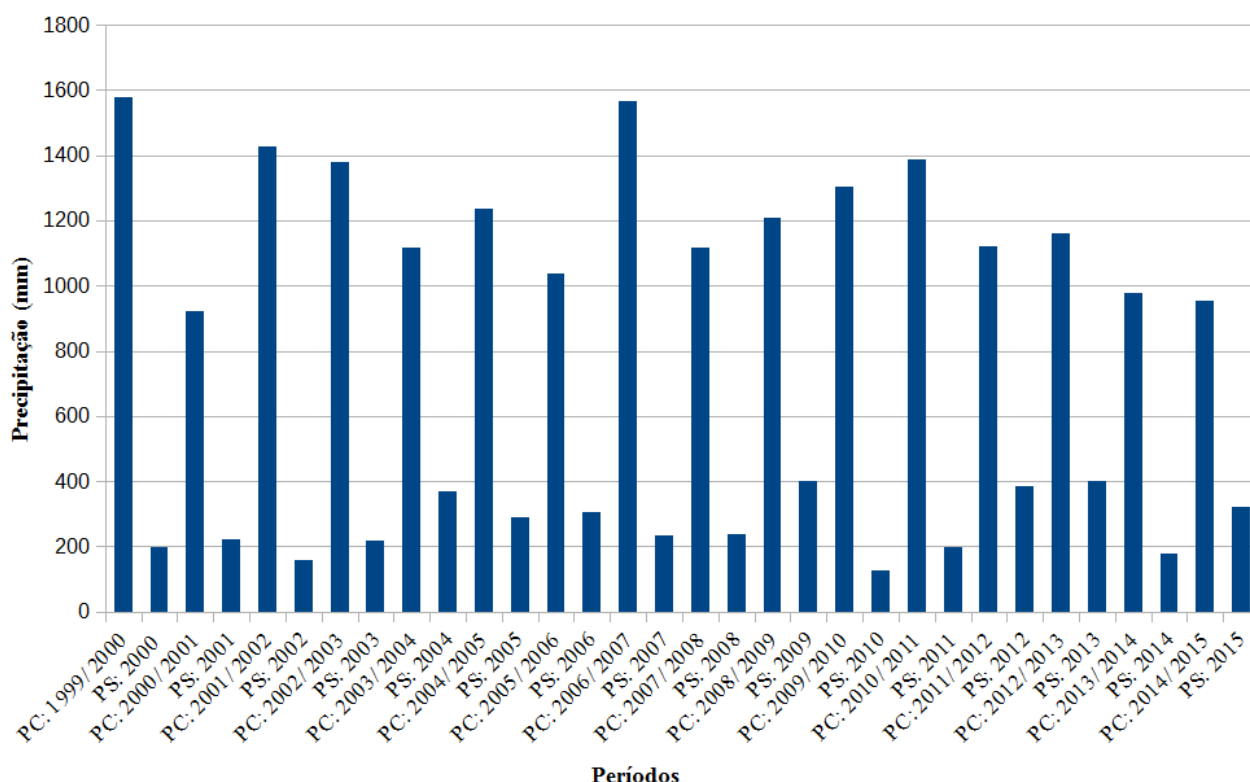
O clima da região na classificação de Köppen, conforme tabela simplificada de Setzer (1966) se enquadra como (Aw) tropical de inverno seco. As temperaturas médias são de 24,9 °C na primavera-verão e 20,5 °C outono-inverno. A média de precipitação anual da região, com base em dados de precipitação de série temporal entre 1999 a 2015 (LAPIG, 2016c)¹⁰, foi de 1.482 mm. Bieras e Santos (2003), para um período de 1982 a 1999, encontraram média de 1.497 mm/ ano, para o município de Bebedouro.

A distribuição das chuvas na região mostra um regime hídrico dividido em seco (abril a setembro) e chuvoso (outubro a março), bem definidos. O período chuvoso concentra mais que 80% do volume total anual de precipitação (média para 17 anos da série temporal) (Figura 4). Em alguns anos observou-se volume de precipitação muito abaixo da

¹⁰ Dados de séries temporais obtidas por meio da reunião de diversas imagens de satélite (MODIS, Landsat, etc.) na escala aproximada de 3000 m, pelo LAPIG.

média durante os períodos secos, registrando, por exemplo, volume de 6% em relação ao total anual de precipitação em 1999; 9% em 2009; e 10% em 2010 (APÊNDICE A).

Figura 4. Série temporal de 17 anos (1999 a 2015) da precipitação anual, por período chuvoso (PC) e seco (PS), para a região de Bebedouro (SP). Verifica-se uma concentração de 82,12% de precipitação entre os meses de outubro a março. Fonte de dados: LAPIG, 2016c.



4.2 Modelos Digitais de Elevação (MDE)

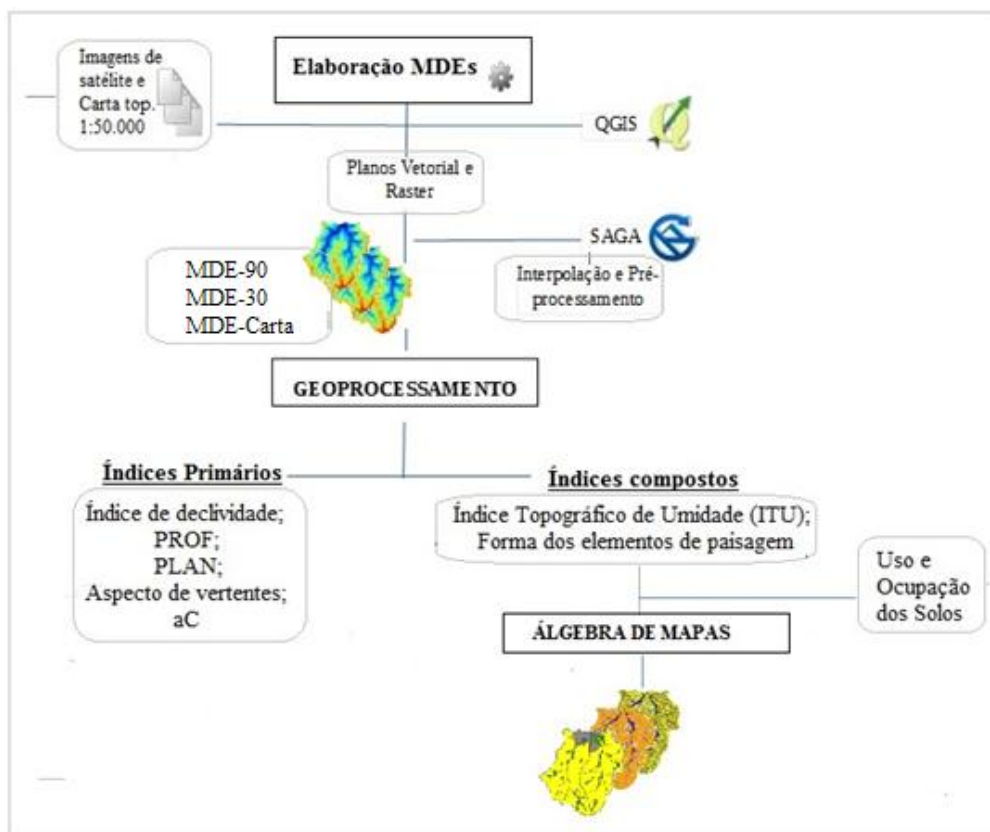
Neste trabalho, os modelos digitais de elevação (MDEs) foram processados utilizando-se os sistemas de informações geográficas (SIG) *Q Geographical System (QGIS)*, *System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)* e ferramentas do *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS)* disponíveis no QGIS. Os procedimentos adotados neste trabalho estão representados na Figura 5.

Foram elaborados três MDEs a partir de diferentes fontes de dados para a representação da área de estudo. Dois MDEs foram obtidos a partir de imagens dos sensores orbitais da *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, com resolução espacial de 90 m

(MDE-90) e *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), com resolução espacial de 30 m (MDE-30). Um terceiro MDE foi elaborado a partir de carta topográfica em escala 1:50.000 (IBGE, 2015), com curvas de nível de 20 m (MDE-Carta).

Com o auxílio das imagens de satélites e por meio do QGIS foi feita a delimitação topográfica das duas microbacias hidrográficas de interesse na carta topográfica, a partir da obtenção das classes altimétricas, identificação do divisor de água, e posterior vetorização (polígono). Após definição dos polígonos de recorte, foram elaborados os MDEs no SAGA-GIS.

Figura 5. Esquema simplificado dos procedimentos adotados.



Usando a interpolação *Multilevel β -Spline* (LEE; WOLBERG; SHIN, 1997), foram definidos tamanhos de grade de 15 metros para os três MDEs, adotando-se uma mesma resolução de *grid* para discretização dos índices processados. Posteriormente, fez-se o pré-processamento dos MDEs. O pré-processamento consistiu na remoção de dados discrepantes de elevação, pelos métodos de Planchon e Darboux (2001) no módulo *Terrain Analysis* no SAGA-GIS.

A partir dos três MDEs elaborados foi possível determinar diferentes características físicas e ambientais das duas MBHs estudadas (parâmetros fisiográficos, áreas

de acumulação de fluxos, índice topográfico de umidade, índice de declividade, entre outros) e comparar os modelos, por meio visual e resultados de estatística descritiva de valores dos índices. Não se pretendeu neste trabalho fazer uma discussão comparativa detalhada das diferenças entre os MDEs para processamento de índices topográficos. Uma abordagem neste sentido pode ser encontrada na literatura acadêmica em Quinn (1991), Wolock e Price (1994), Saulnier, Beven e Obled (1997), Tarboton (1997), Sørensen, Zinko e Seibert (2006), Seibert e McGlynn (2007), Sørensen e Seibert (2007), Buchanan et al. (2014), Drover et al. (2015), entre outros.

Na caracterização fisiográfica das MBHs em ambiente SIG foram calculados os seguintes parâmetros:

- a) Área e perímetro das MBHs;
- b) Área total dos corpos d'água;
- c) Comprimento do eixo das MBHs (L);
- d) Comprimento do canal principal (Le);
- e) Comprimento total dos canais (Lt);
- f) Densidade de drenagem (Dd) (Km/ Km²) (HORTON, 1932);
- g) Densidade hidrográfica (n/ km²) (HORTON, 1945);
- h) Fator de Forma (Ff) (HORTON, 1932);
- i) Índice de circularidade (IC) (MILLER, 1953 citado por CHRISTOFOLETTI, 1974);
- j) Índice de compacidade (Kc);
- k) Identificação de nascentes;
- l) Número total de cursos d'água (n);
- m) Ordem dos canais (STRAHLER, 1957).

4.3 Índice Topográfico de Umidade (ITU)

Visando caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação hídrica superficial e as áreas específicas de contribuição do escoamento direto nas MBHs, utilizou-se o Índice Topográfico de Umidade (ITU), que indica a tendência de acumulação de água na paisagem. O ITU (Equação 1) é função da área de captação ou acumulação dos fluxos (ac) por unidade de largura pelo ângulo de declividade da encosta ($\tan \beta$), que corresponde à força gravitacional de movimento e ou acúmulo de água no terreno (QUINN, 1991). É expresso como:

$$ITU = \ln\left(\frac{ac}{\tan\beta}\right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde: ac: área de acumulação de fluxos (m²);

Tan β: tangente do ângulo de declividade da encosta, expressa em radianos¹¹.

Inicialmente, o ITU foi definido para os dois MDEs (30 m e 90 m) utilizando o SAGA 2.3.0. Após comparação, optou-se pela caracterização do ITU com base no MDE-90. A variável ac foi calculada pelo algoritmo de direção de fluxos com oito facetas triangulares (SEIBERT; McGLYNN, 2007) e o índice de declividade foi calculado pelo método de Zevenbergen e Thorne (1987).

Na definição das classes de ITU fez-se a distribuição em classes de frequência dos valores gerados para os *rasters*. De uma matriz de 178.716 dados para a MBH do Consulta e de 160.483 para a MBH do Retiro, foram geradas inicialmente 18 classes de ITU. Destas classes, foram consideradas apenas aquelas que apresentaram frequência relativa (*Fi*) acima de um (>1%). Classes de frequência com representatividade abaixo de 1% foram agrupadas às classes mais próximas, resultando em sete classes deste índice para ambas as MBHs (Tabela 2).

Tabela 2. Limites das classes do Índice Topográfico de Umidade (ITU), a partir dos resultados gerados para as Microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), e reagrupamento das classes significativas (igual ou maior que 1% da frequência relativa), de acordo com a média dos valores de classes das duas microbacias.

CLASSES (ITU)	Limite	Limite	Categorias
1	7,0*	9,51	Áreas não propensas ao acúmulo de umidade
2	9,51	10,42	
3	10,42	11,33	
4	11,33	12,24	Transição
5	12,24	13,15	Áreas propensas ao acúmulo de umidade
6	13,15	14,06	
7	14,06	24,50*	

* Médias de 7,696 e 24,285, respectivamente. Mantidos os valores mínimos e máximos das respectivas microbacias.

¹¹ A variável declividade (β) para o cálculo do ITU é expressa em graus (WILSON; GALLANT, 2001). Neste trabalho esta variável foi processada em radianos devido a requisito do módulo Topographic Wetness Index (TWI) no SAGA-GIS.

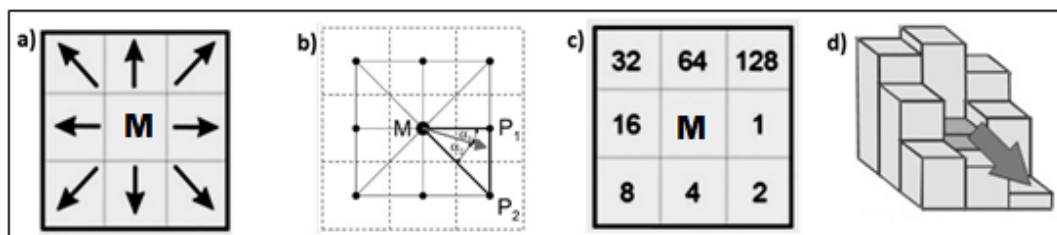
4.3.1 Cálculo do algoritmo de acumulação dos fluxos (*ac*)

O cálculo de *ac* foi feito com base na relação topográfica (altitude (*z*)) entre células em uma submatriz de valores de elevação (Figura 6a), em que as submatrizes interagem para toda a grade *raster*. Locais de maior altitude contribuem área (m^2) para locais de menor altitude, sucessivamente. Neste trabalho, as células quadrangulares representaram área de $225 m^2$.

Existe uma gama de algoritmos para o cálculo de *ac* (O'CALLAGHAN; MARK, 1984; QUINN, 1991; QUINN; BEVEN; LAMB, 1995; TARBOTON, 1997; SEIBERT; MCGLYNN, 2007; entre outros). Neste trabalho adotou-se o algoritmo de direção de fluxo com oito facetas triangulares (MD_{∞}) de Seibert e McGlynn (2007). O algoritmo foi processado de forma automática no SAGA-GIS, módulo acumulação de fluxos / *flow accumulation (Top-Down)*.

O princípio de cálculo do método do MD_{∞} se baseia na relação entre facetas triangulares (oito facetas), tendo como referência os pontos centrais de cada célula em uma submatriz (Figura 6b). O ponto M representa a célula de referência para o momento do cálculo (contribuição). P_1 e P_2 são pontos nos quais existe a possibilidade de recebimento de fluxo. Conforme o cálculo de direção, são determinadas quais células receberão fluxos. O MD_{∞} também permite mais de uma rota de fluxo independente.

Figura 6. Modelo determinístico-infinito (MD_{∞}) (SEIBERT; MCGLYNN, 2007): a) direções possíveis em um pixel, considerando oito facetas a partir da célula central de uma submatriz; b) princípio de cálculo de direção de fluxo (TARBOTON, 1997); c) exemplo de código de direção, ao redor da célula central, atribuído a um pixel; d) representação da direção do escoamento para a célula com menor cota. Adaptado de Bosquilia et al. (2013) e Seibert e McGlynn (2007).



Neste cálculo, nas oito facetas triangulares são computadas as direções do gradiente de declividade, por meio da diferença entre a elevação (*z*) de uma célula em relação

às outras (Equação 2). Quando a elevação dos pontos de saída for mais alta que a de referência, não serão consideradas como possibilidade de fluxo. As diferenças de elevações (z) são expressas em:

$$z_i = hP_1 - hM \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

z_i : diferença de elevação entre as células (m);

hM : elevação da célula de referência;

hP : elevação da célula adjacente a de referência, a ser testada quanto à possibilidade de fluxo.

Do mesmo modo que o fator z denota diferenças de elevação, os vetores x_i e y_i correspondem às diferenças entre as coordenadas M e os pontos P^1 e P^2 das células adjacentes. Segundo Seibert e McGlynn (2007), o vetor normal (Equação 3), ou seja, o vetor perpendicular ao plano, pode ser computado como:

$$[n] = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1y_2 - z_2y_1 \\ z_1x_2 - z_2x_1 \\ y_1x_2 - y_2x_1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

n_x : vetor normal de x ;

n_y : vetor normal de y ;

n_z : vetor normal de z ;

z_1 : diferença de elevação entre P^1 e M ;

z_2 : diferença de elevação entre P^2 e M ;

x_1 : diferença longitudinal entre P^1 e M ;

x_2 : diferença longitudinal entre P^2 e M ;

y_1 : diferença latitudinal entre P^1 e M ;

y_2 : diferença latitudinal entre P^2 e M .

Os vetores são empregados como variáveis para o cálculo de direção (d) (Equações 4) e da declividade das facetas triangulares (s) (Equação 5).

$$d = \begin{cases} 0; \rightarrow n_x = 0; n_y \geq 0 \\ \pi; \rightarrow \tilde{n}_x = 0; n_y < 0 \end{cases}$$

$$d = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{n_y}{n_x}\right); \rightarrow n_x > 0 \quad \text{Equações 4}$$

$$d = \frac{3\pi}{2} - \arctan\left(\frac{n_y}{n_x}\right); \rightarrow n_x < 0$$

Onde:

d: direção do fluxo;

π : pi radianos;

arctan: retorna a arco tangente do valor.

Conforme a metodologia de Seibert e McGlynn (2007), um valor **d** igual a 0 denota a direção de fluxo para o eixo y, e **d** igual a $3\pi/2$ radianos (ou 270°) indica direção para o eixo x.

$$s = -\tan\left(\arccos\left(\frac{n_z}{\sqrt{n_x^2+n_y^2+n_z^2}}\right)\right)$$

Onde:

s: declividade da faceta triangular;

tan: tangente;

Arccos: arco cosseno.

Desta forma, os resultados indicam as condições de direção de fluxo em cardiais, diagonais 45° ou diagonais de amplitude entre 0 e 45° . Segundo Seibert e McGlynn (2007), após a determinação de todas as facetas, são mantidas as direções mais íngremes que estão num ângulo de alcance de 45° .

No MD_∞ , similar ao algoritmo de Tarboton (1997), quando a direção de fluxo incidir duas células que formam a faceta triangular, a ac é dividida entre as duas células de forma proporcional ($\alpha_1/45^\circ$ e $\alpha_2/45^\circ$) ao ângulo de direção em relação à faceta (p. ex., Figura 6b). Nos casos de mais de um fluxo, o MD_∞ utiliza um expoente de ponderação para distribuição dos valores de ac entre as células, semelhante ao algoritmo de múltiplo fluxo de Quinn; Beven e Lamb (1995).

4.4 Declividade, curvatura horizontal, curvatura vertical e forma dos elementos de paisagem (FEP)

A caracterização geomorfológica das MBHs foi feita pelo método de Zevenbergen e Thorne (1987), utilizado para determinar as variáveis curvatura horizontal (PLAN), curvatura vertical (PROF), declividade e aspecto de vertentes. Os mapas foram

gerados no SAGA-GIS, de forma automatizada, no módulo *Slope, Aspect, Curvature*. Este método permite quantificar índices por meio de função polinomial parcial de quarto grau e da variável elevação (z), em uma submatriz de elevações (Figura 7). O método estabelece nove parâmetros (A, B, C, D, E, F, G, H e I), que são relacionados aos fatores $z_1, z_2, z_3...z_9$ da submatriz.

Figura 7. Submatriz 3x3 das elevações para o cálculo do índice de Zevenbergen e Thorne (1987). No exemplo, a célula z_5 é a referência para o cálculo.

z_1 611.39	z_2 623.32	z_3 590.84
z_4 513.13	z_5 628.50	z_6 624.07
z_7 383.45	z_8 498.20	z_9 580.24

Utilizaram-se os MDEs de resolução 30 m e 90 m. Os mapas das variáveis PLAN, PROF e declividade foram elaborados em graus. Posteriormente, para a classificação das formas dos elementos de paisagem (PENNOCK; ZEBARTH; De JONG, 1987), elaboraram-se os mapas das classes de PLAN, PROF e de gradiente de declividade (GRAD).

Conforme o método de Pennock, Zebarth e De Jong (1987), as variáveis PLAN, PROF e GRAD foram cruzadas. O método adota a diferenciação entre áreas planas e de meia encosta a partir da declividade de 3° , considerada a classe determinante de áreas planas onde a declividade está entre 0° e 3° . Para declividades superiores a 3° , optou-se por dividir em duas classes de meia encostas: suaves, de 3 a 8° ; e íngremes, de 8 a 20° . Considerou-se uma amplitude de declividade de 0° a 21° nas MBHs caracterizadas pelo MDE-30.

A PLAN foi classificada com base em resultados numéricos. Valores de PLAN menores que $-0,1^\circ$ foram classificados como referentes a vertentes côncavas; valores de PLAN entre $-0,1^\circ$ e $+0,1^\circ$ como superfícies planas; e valores de PLAN maiores que $+0,1^\circ$ corresponderam a vertentes convexas (TAGIL; JENNESS, 2008).

O PROF no método de Pennock, Zebarth e De Jong (1987) se baseia na ideia de segmentos de vertentes de Ruhe (1960), o qual compartimenta a vertente em topo, ombro

(OM), sopé coluvial (SC), meia encosta (M), e sopé aluvial (SA). A classificação de PROF se baseou nos limites de distribuição das classes de frequência dos índices nas MBHs, com base em resultados de perfil positivo e negativo (PROF mín. -0,021°; máx. 0,011°; e mediana: 0,0010). O processamento de mapas do PROF para as MBHs, aplicando-se limites de classe referenciados de outros trabalhos (p. ex., Young, 1972 citado por Pennock; Zebarth e De Jong, 1987), resultou em representações que não discriminaram variações na curvatura vertical do relevo das MBHs de estudo. Entende-se que esta variável é dependente da escala de paisagem de cada local e, portanto, não aplicável em algumas situações, com base nos limites estabelecidos em outros trabalhos.

Pretendeu-se com a integração das variáveis PROF e PLAN classificar os elementos de vertentes para identificar a tendência do fluxo hídrico no relevo em superfícies de curvaturas horizontais convergentes, divergentes e retilíneas. Considerou-se: PLAN côncava corresponde a fluxos convergentes (C); PLAN convexa a fluxos divergentes (D); e PLAN planar a fluxos retilíneos (R) (PENNOCK; ZEBARTH; De JONG, 1987; DIKAU, 1989; PENNOCK, 2003).

Portanto, para a caracterização das formas dos elementos da paisagem foram utilizadas 13 classes possíveis para caracterização das microbacias (Tabela 3). Posteriormente, foram reclassificados conforme a representatividade destes elementos (maior que 1% de representatividade em relação às áreas das microbacias).

Considerando que a classificação das formas dos elementos de paisagem no método de Pennock, Zebarth e De Jong (1987) e Pennock (2003) designa tanto sopé aluvial quanto topos e rampas suaves numa mesma categoria, de áreas planas ou em nível¹² (P), foi feita a distinção entre estes dois elementos, visando explicitar as áreas de SA das MBHs. A classificação foi feita com base no cruzamento da classe P com a classe de elevação menor que 590 m e ITU gerado no MDE-30.

¹² Em Pennock, Zebarth e De Jong (1987) é usado a nomenclatura e abreviação *level* (L). A abreviação (P) foi adotada aqui para se referir as áreas planas de declividade menor que 3°.

Tabela 3. Forma dos elementos de paisagem (FEP) usados na caracterização geomorfológica das microbacias do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP), definidos com base na curvatura vertical, curvatura horizontal e declividade da vertente. Adaptado de Pennock, Zebarth e De Jong (1987).

FEP	Sigla	FEP	Sigla
Áreas de declividade plana (topos e rampas suaves menores que 3°)	AP	Ombro	OM
Meia encosta de inclinação íngreme, retilínea	MEI	Ombro convergente	OMC
Meia encosta de inclinação íngreme, convergente	MEIC	Ombro divergente	OMD
Meia encosta de inclinação íngreme, divergente	MEID	Sopé aluvial	SA
Meia encosta de inclinação suave, retilínea	MES	Sopé coluvial	SC
Meia encosta de inclinação suave, convergente	MESC	Sopé coluvial convergente	SCC
Meia encosta de inclinação suave, divergente	MESD	Sopé coluvial divergente	SCD

Para uma caracterização mais detalhada da declividade das MBHs Córrego da Consulta e Córrego do Retiro, elaboraram-se mapas de classes de declive com base na classificação de Lepsch et al. (1991), para cinco classes: plano – 0 a 3%; suave ondulado – 3 a 6%; moderadamente ondulado – 6 a 12%; ondulado – 12 a 20%; e forte ondulado – 20 a 40%.

4.5 Uso e ocupação dos solos e aspectos legais das Áreas de Preservação Permanente (APPs)

A caracterização do uso e ocupação dos solos das MBHs foi feita por meio de mapas existentes de uso e ocupação dos solos do município de Bebedouro (SP), pela classificação supervisionada em imagens *Rapideye* (ano 2013) e vetorização de imagem Google Earth (ano 2016). Inicialmente fez-se a extração do recorte no QGIS do mapa de uso e ocupação dos solos para o limite de interesse das MBHs. O mapa das classes de uso e ocupação das MBHs também foi transformado em *raster* para procedimentos de álgebra de mapas. As classes de uso e ocupação foram: corpos d'água; áreas cultivadas e de uso antrópico; área edificada; formação florestal; vegetação herbácea não cultivada; e silvicultura.

Por meio do software Envi 4.8 foi elaborado também um mosaico com cenas *Rapideye* (anos 2012 e 2013) em composição falsa cor que permitisse destacar a vegetação de interesse classificada como vegetação herbácea não cultivada. Por meio de imagens orbitais e

reconhecimento de campo (trechos das MBHs), observou-se que esta classe de vegetação consiste em comunidade vegetal herbácea de características higrófitas, de ocorrência ao longo dos canais de drenagem das MBHs Consulta e Retiro. Entende-se que a classe de uso e ocupação de vegetação herbácea não cultivada oferece uma referência relativa¹³ para uma avaliação dos cenários e do método adotado de identificação das áreas úmidas nas MBHs.

Visando avaliar a conformidade ambiental legal das MBHs, foram elaborados mapas das APPs com base na identificação dos canais de drenagem e nascentes, e delimitando faixas de distância fixas, respectivamente de 30 m e 50 m, conforme lei florestal (LEI 12651, 2012, artigo 4º). Também foram adquiridos dados do Cadastro Ambiental Rural do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (CAR/SICAR) das áreas declaradas de uso consolidado para o município de Bebedouro (SP). Os *shapes* foram também processados em formato *raster*.

4.6 Avaliação dos resultados e delimitação de áreas prioritárias

A avaliação dos resultados consistiu na interpretação visual por meio dos mapas processados, cálculos de estatística descritiva, contagem e comparação de área de pixel. Estas operações foram desenvolvidas nos softwares SAGA-GIS e QGIS e com planilhas *Open Document format* (ODF) e MS-Office.

A definição das áreas prioritárias para a restauração florestal e cenários em relação às APPs foram feitas por meio da álgebra de mapas no SAGA-GIS. O cruzamento das informações entre ITU, FEP e UOS permitiu estabelecer três categorias de áreas prioritárias.

A) Prioridade máxima (P1): ITU classe 7 (de 14,06 a 24,50) em áreas de sopé aluvial e com uso e ocupação de áreas cultivadas e uso antrópico e vegetação herbácea não cultivada;

B) Prioridade intermediária: ITU classe 6 (de 13,15 a 14,06) com áreas cultivadas e uso antrópico e vegetação herbácea não cultivada;

C) Prioridade moderada: ITU classe 5 (de 12,24 a 14,06) com uso e ocupação de áreas cultivadas e de uso antrópico e vegetação herbácea não cultivada.

¹³ A delimitação realizada pela vetorização sobre imagens de satélite permitiu identificar apenas parcialmente as áreas de acúmulo hídrico ao longo dos canais de drenagem por meio da evidência de vegetação herbácea higrófita. Verificou-se que próximo aos canais de drenagem e APPs existiam também áreas de uso e ocupação antrópica, o que dificultou a identificação visual de possíveis áreas úmidas.

Os resultados das áreas prioritárias foram cruzados com informações das APPs das MBHs. Três cenários a partir das áreas prioritárias para restauração florestal foram gerados:

- Cenário 1: Prioritária 1 em APPs, Áreas de uso consolidado e demais áreas das MBHs;
- Cenário 2: Prioritárias 1 e 2 em APPs, Áreas de uso consolidado e demais áreas das MBHs;
- Cenário 3: Prioritárias 1; 2 e 3 em APPs, Áreas de uso consolidado e demais áreas das MBHs.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das microbacias hidrográficas

A estatística descritiva das medidas de altitude obtidas em diferentes MDEs (Tabela 4) apontou valores semelhantes, principalmente para altitude média, altitude mínima e desvio padrão. No entanto, o MDE-Carta apresentou uma diferenciação no trecho do divisor de água entre as duas MBHs (Figura 8), atribuindo uma classe de menor elevação. Possivelmente, isto foi consequência de problemas de pontos de cotas não ajustados durante a elaboração do MDE e ou interpolação das curvas de nível de 20 em 20 metros.

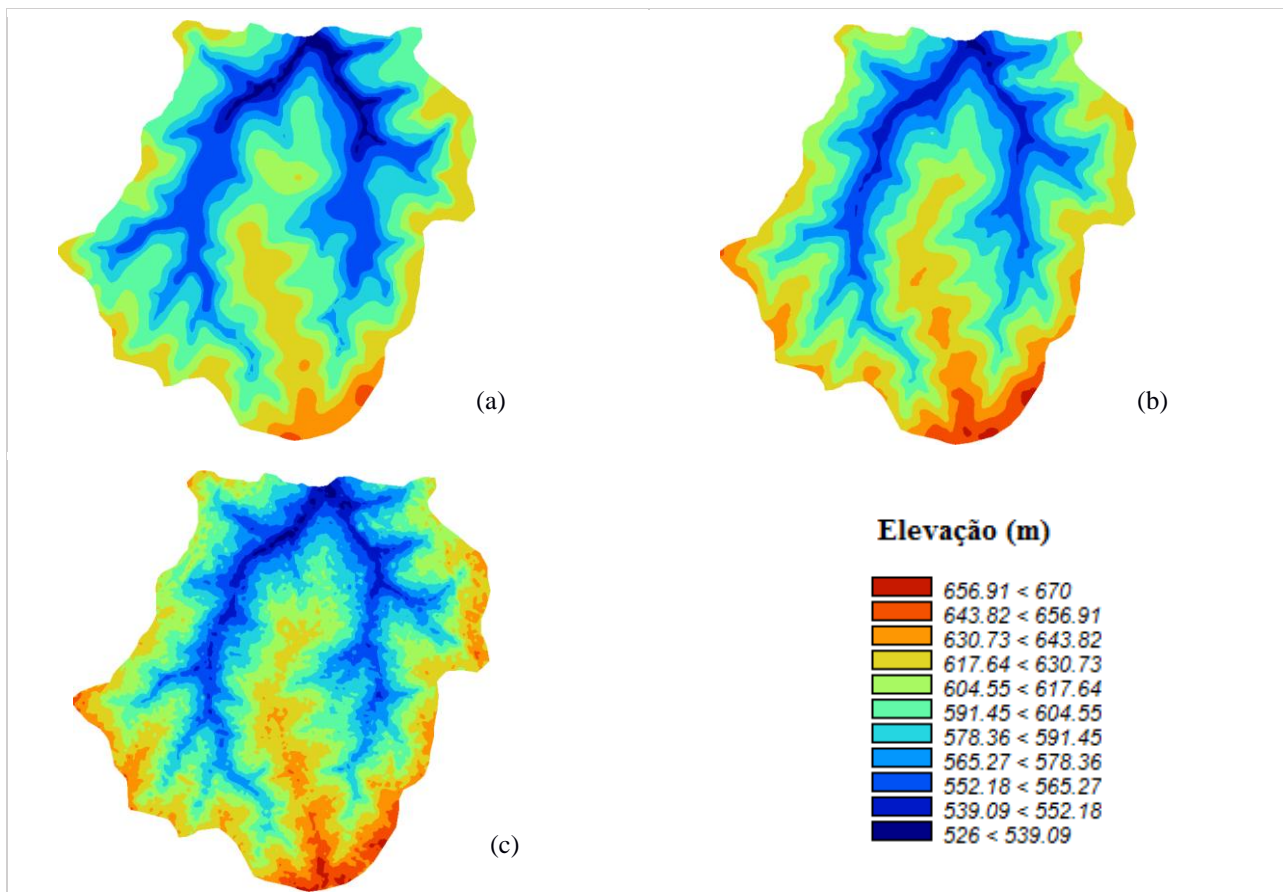
Tabela 4. Estatística descritiva de valores de altitude obtidos nos diferentes Modelos Digitais de Elevação (MDE) das microbacias do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro.

MDE	Média	Mínimo	Máximo	Amplitude	Variância	DP
MDE-30	598,97	526,73	678,28	151,55	633,35	25,17
MDE CARTA	592,64	536,04	650,21	114,17	555,62	23,57
MDE-90	599,11	536,53	662,04	125,51	615,04	24,80

MDE-90: SRTM = *Shuttle Radar Topography Mission*; MDE-30: ASTER = *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*; MDE-Carta: carta topográfica em escala 1:50.000; DP = desvio padrão.

O MDE-Carta (Figura 8a) apresentou suavização no divisor de águas, com ocorrência da classe de altitude 591,45 m – 604,55 m, enquanto que no MDE-30 e no MDE-90 (Figuras 8b e 8c, respectivamente), no mesmo local de representação observou-se classe de elevação de 617,64 m – 630,73 m. Este resultado poderia comprometer a análise hidrológica por meio dos algoritmos de acumulação de fluxos e do ITU. Deste modo, optou-se por utilizar apenas os modelos obtidos por meio dos sensores orbitais ASTER (resolução 30 m) e SRTM (resolução 90 m) para as análises morfométricas e do índice topográfico.

Figura 8. Modelos digitais de elevação para a caracterização das microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP): (a) MDE-Carta, (b) MDE-90 e (c) MDE-30.

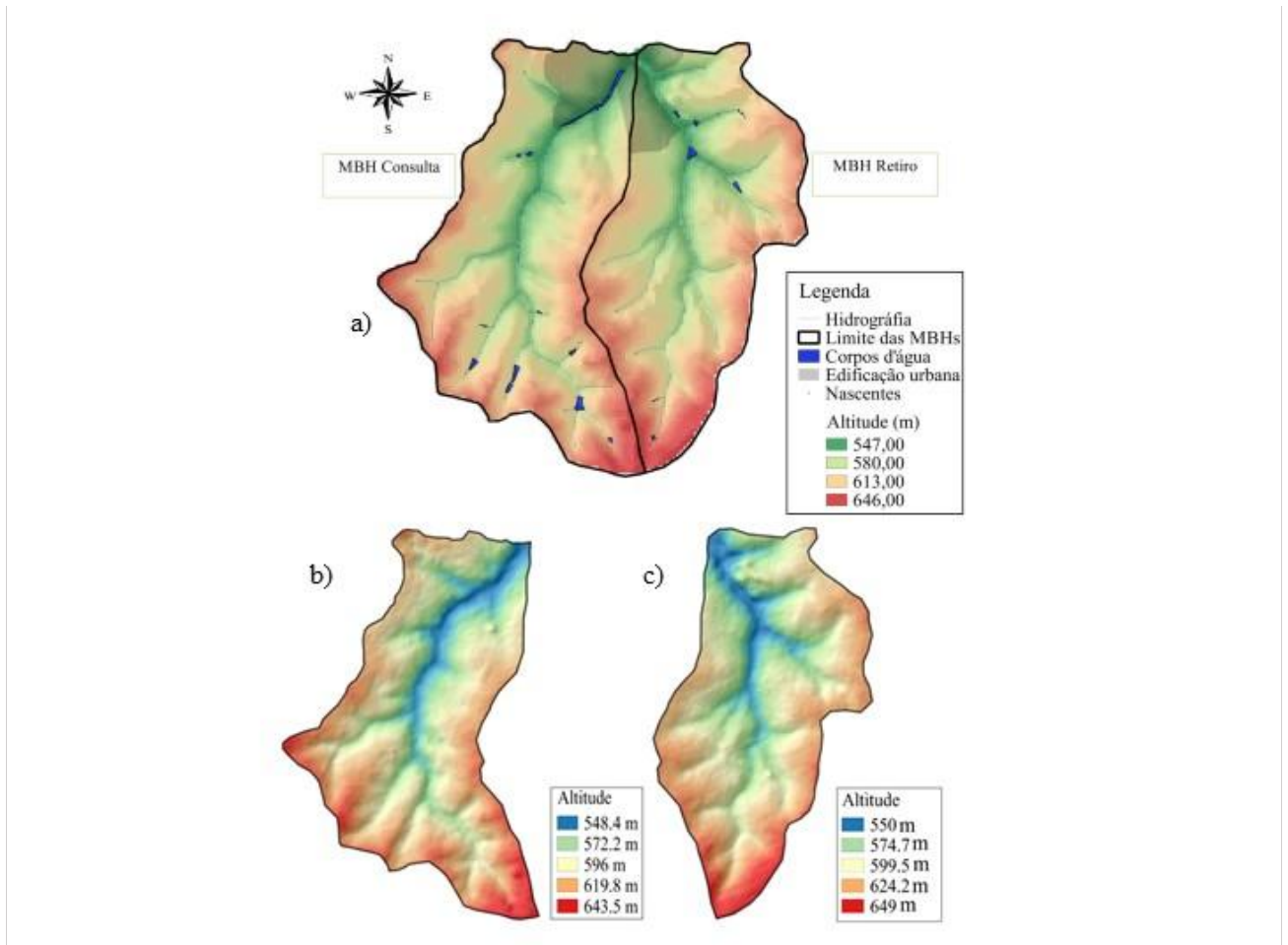


MDE-Carta, a partir de carta topográfica em escala 1:50.000 (IBGE, 2015); MDE-90, a partir do SRTM, resolução espacial de 90 m; MDE-30, a partir do ASTER, resolução espacial de 30 m.

As MBHs dos Córregos da Consulta e do Retiro possuem características físicas semelhantes (Tabela 5) e um padrão de drenagem hidrográfica dendrítico. O comprimento total dos canais é de 30 km para a MBH do Consulta e de 28 km para a MBH do Retiro, distribuídos em 16 e 12 canais de drenagem, respectivamente.

As duas MBHs têm orientação predominante no sentido norte. O ponto mais alto se encontra a 646 m de altitude. O ponto mais baixo, onde está localizada a área urbana do município, se situa a 547 m, na confluência dos Córregos da Consulta e do Retiro, formando o Córrego Bebedouro, em um curso de 4ª ordem (Figura 9).

Figura 9. Modelos digitais de elevação elaborados por meio do sensor SRTM, resolução 90 m, com representação altimétrica, hidrográfica e geográfica das microbacias hidrográficas do Córregos da Consulta e do Retiro, elaborados na escala 1:50.000: (a) as duas microbacias juntas; (b) microbacia do Córrego da Consulta e (c) microbacia do Córrego do Retiro. Imagens ilustrativas sem escala.



Por meio do MDE-90 foi possível determinar os parâmetros morfométricos calculados para as MBHs dos Córregos da Consulta e do Retiro (Tabela 5). Cabe ressaltar que os parâmetros servem de base para deduções e devem ser analisados em conjunto com outros parâmetros físicos e características específicas das microbacias, como por exemplo, fatores climáticos, aspectos geomorfológicos e hidrológicos, tipos de solos e o uso e ocupação destes.

Quando se estabelecem comparações com microbacias de outros locais (CARDOSO et al., 2006; NARENDRA; NAGESWARARAO, 2006), as MBHs estudadas apresentaram um padrão alongado de fator de forma (Ff). O Ff consiste na relação de área e comprimento do eixo de bacia. Parâmetros maiores sugerem maior propensão à concentração do escoamento direto, enquanto que valores baixos indicam menor influência sobre a

concentração do escoamento direto, menor chance de chuvas incidirem integralmente na área total da bacia e tendência a inundações (LIMA, 2008). Os parâmetros IC e Kc indicaram um formato mais alongado do que circular para as MBHs, compatíveis com outras microbacias (BORSATO; MARTONI, 2004; CARDOSO et al., 2006; FERRARI et al., 2013; SILVA et al., 2014). Os parâmetros IC e Kc estabelecem uma relação das áreas da microbacias com a forma de um círculo. Quanto mais próximo ao valor de um (1), mais circular é a bacia (CHRISTOFOLETTI, 1974). E, valores compreendidos entre 0,4 e 0,5 indicam um padrão de forma mais alongado (MILLER, 1953 citado por NARENDRA; NAGESWARARAO, 2006).

Tabela 5. Caracterização fisiográfica e ambiental das microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro.

	MBH Consulta	MBH Retiro	Área de abrangência das duas MBHs
Característica geométricas			
Área total	40,22 km ²	36,19 km ²	76,41 km ²
Área total de corpos d'água	31,55 ha	8,83 ha	40,38 ha
Comprimento do eixo (L)	11,24 km	11,24 km	11,24
Fator de forma (Ff)	0,32	0,29	0,6
Perímetro	34,3 km	30,3 km	40,3 km
Índice de circularidade (IC)	0,43	0,5	0,59
Coefficiente de Compacidade (Kc)	1,51	1,41	1,29
Características de relevo*			
Altitude média	598,32 m	600,16 m	598,97 m
Altitude máxima	678,28 m	663,01 m	678,28 m
Altitude mínima	532,9 m	532,9 m	532,9 m
Declividade média	4,27°	4,46°	4,36°
Declividade Máxima	21,59°	21,87°	21,87°
Orientação predominante	Norte	Norte	Norte
Características da rede de drenagem			
Número total de cursos d'água	16	12	28
Nascentes identificadas	14	11	25
Comprimento do canal principal (Le)	13,386 km	11,705 km	13,386 km
Comprimento total dos canais (Lt)	30,58 km	28,20 km	58,78 km
Densidade hidrográfica (Dh)	0,40 cursos/km ²	0,30 cursos/km ²	0,35 cursos/km ²
Densidade de Drenagem (Dd)	0,76 km/ km ²	0,78 km/ km ²	0,77 km/ km ²
Ordem dos Canais	3ª ordem	3ª ordem	4ª ordem
Padrão de drenagem	Dendrítico	Dendrítico	Dendrítico

*Características de relevo tomadas pelo MDE-30.

As duas MBHs apresentaram uma baixa densidade hidrográfica (Dh), ou seja, pouco número de canais de drenagem em relação à área da bacia, sendo maior para a MBH do

Consulta. A Dh indica a capacidade de se gerar novos cursos d'água numa bacia hidrográfica (CHRISTOFOLETTI, 1974).

A densidade de drenagem (Dd), que consiste na soma dos comprimentos dos canais pela área da bacia (STRAHLER, 1957), também apresentou valores baixos, conforme classificação de Strahler (1957). A Dd permite inferir o padrão de escoamento e infiltração d'água e resistência à erosão em bacias hidrográficas (HORTON, 1945; CHRISTOFOLETTI, 1974). Deste modo, este parâmetro pode dar uma ideia da produção de sedimentos, geralmente maior em locais com alta Dd, e permite prever mudanças morfológicas, quando a resistência do solo é reduzida, em função do uso de manejo dos solos (STRAHLER, 1957).

Conforme apresentado na Figura 9a, as MBHs dos Córregos da Consulta e do Retiro situam-se numa delimitação geográfica e geomorfológica muito próximas, no qual a confluência de seus cursos hídricos se dá numa faixa estreita de interligação entre as duas MBHs, a jusante. Conforme apresentado na tabela 5, os parâmetros calculados para a área de abrangência das duas microbacias apresentaram resultados diferentes, principalmente nas características geométricas.

Os parâmetros do IC, Ff e Kc indicaram um padrão mais circular para as MBHs conjuntamente. A análise conjunta das duas MBHs estudadas pode ser mais adequada para a gestão de bacias hidrográficas no âmbito regional. As MBHs juntas apresentam uma área de captação relativamente grande, de 7.641 ha, drenando o escoamento para um trecho de confluência em área urbana. Esta característica física das MBHs, atrelada a fatores como baixa e ou inexistente permeabilidade em áreas edificadas, limitada capacidade de drenagem do vertedouro e, principalmente, de precipitações de grande intensidade incidentes sobre a área das duas MBHs, pode resultar em problemas de alagamentos e enchentes nas áreas urbanas próximas ao ponto de confluência destes córregos.

Estes dois córregos se situam integralmente nos limites municipais e servem de abastecimento público, respondendo por 83% do suprimento de água municipal. Isto confere maior autonomia no controle de uso e qualidade dos recursos hídricos, mas também implica numa maior responsabilidade das entidades públicas competentes na gestão e planejamento destas microbacias, no sentido de atender os diferentes interesses de uso dos recursos naturais, principalmente, quanto aos recursos hídricos.

5.1.1 Caracterização das áreas úmidas pelo Índice Topográfico de Umidade (ITU)

Os MDE-90 e MDE-30 foram processados para a obtenção das variáveis *ac* e índice de declividade (β), usadas no cálculo do ITU (Figura 10). Os MDEs apresentaram diferenças nos valores de média aritmética, mediana e variância. O algoritmo *ac* nos MDEs apresentou valores mínimo, máximo e médio semelhantes (Tabela 6).

Os dois MDEs apresentaram diferenças na representação do ITU expressa em mapas (Figura 11), embora a relação de concordância Kappa tenha se apresentado razoável (0,34)¹⁴ entre os MDEs. Segundo Thompson, Bell e Butler (2001), MDEs de diferentes fontes resultam em significativa diferença de representação das localizações das áreas depressionais e rotas de drenagem.

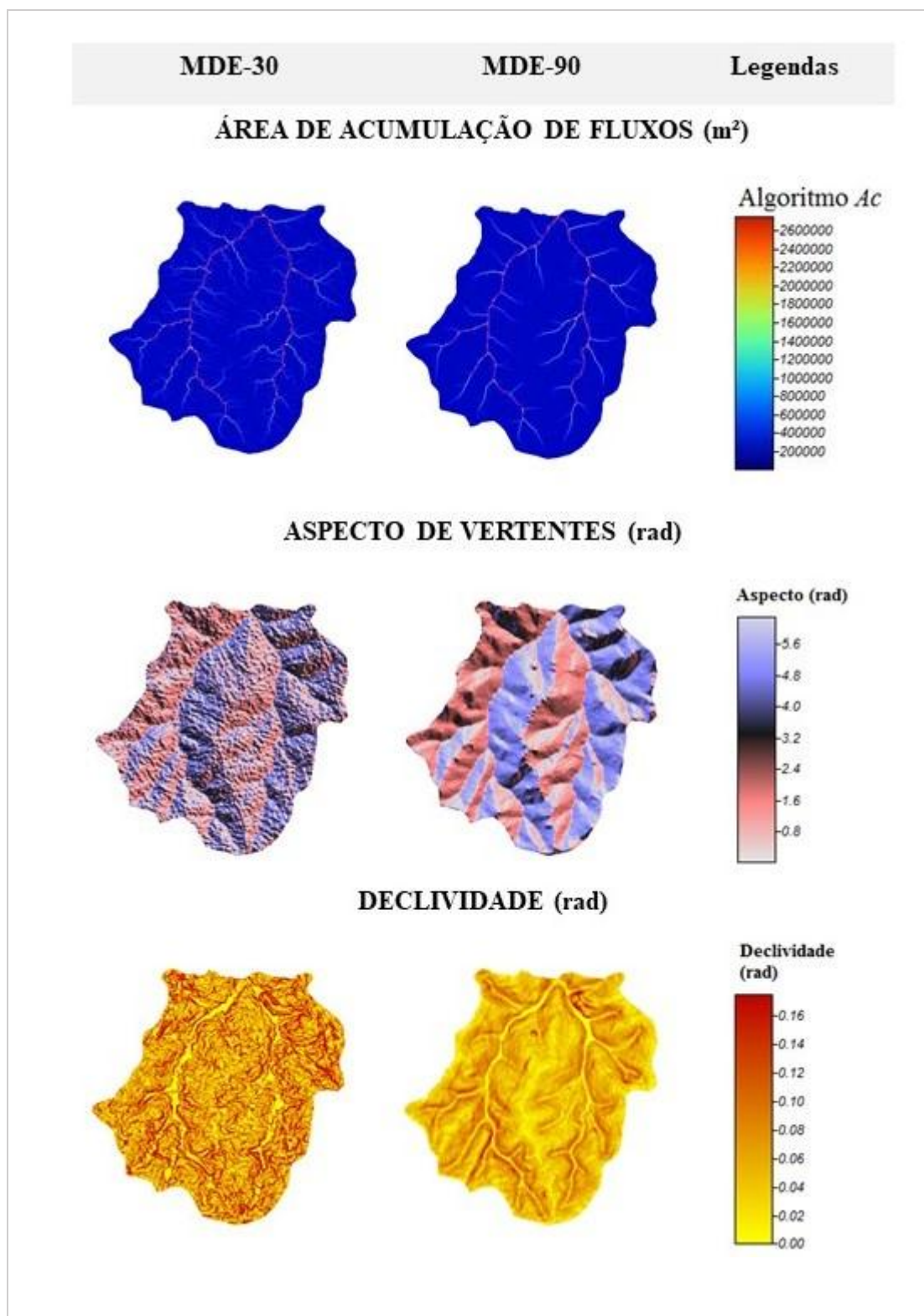
Tabela 6. Estatística descritiva do Índice Topográfico de Umidade (ITU) e suas variáveis para as microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), a partir dos modelos digitais de elevação de resolução espacial de 90 m (MDE-90) e de 30 m (MDE-30).

MDE	Média	Mínimo	Máximo	Amplitude	Variância	DP	Mediana
ITU (adimensional)							
MDE-30	10,22	6,93	24,98	18,05	5,45	2,33	9,44
MDE-90	11,35	7,64	24,99	17,35	2,20	1,48	11,05
Algoritmo de acumulação de fluxos (m ²)							
<i>ac</i> (MDE-30)	86.077,31	225	73472344,00*	7347,21	176071360	1326918,84	940,49
<i>ac</i> (MDE-90)	84.196,55	225	75191376,00*	7519,12	154292957	1242147,16	3243,65
Declividade (β) (°)							
β (MDE-30)	4,36	0	21,88	21,88	0,14	2,81	4,07
β (MDE-90)	2,83	0	13,00	13,00	0,03	1,38	2,71

*Valor máximo de acumulação de fluxos na área de confluência dos córregos das duas MBHs, correspondente a área aproximada das duas MBHs juntas (7.641 hectares).

¹⁴ Conforme classificação de Landis e Koch (1977).

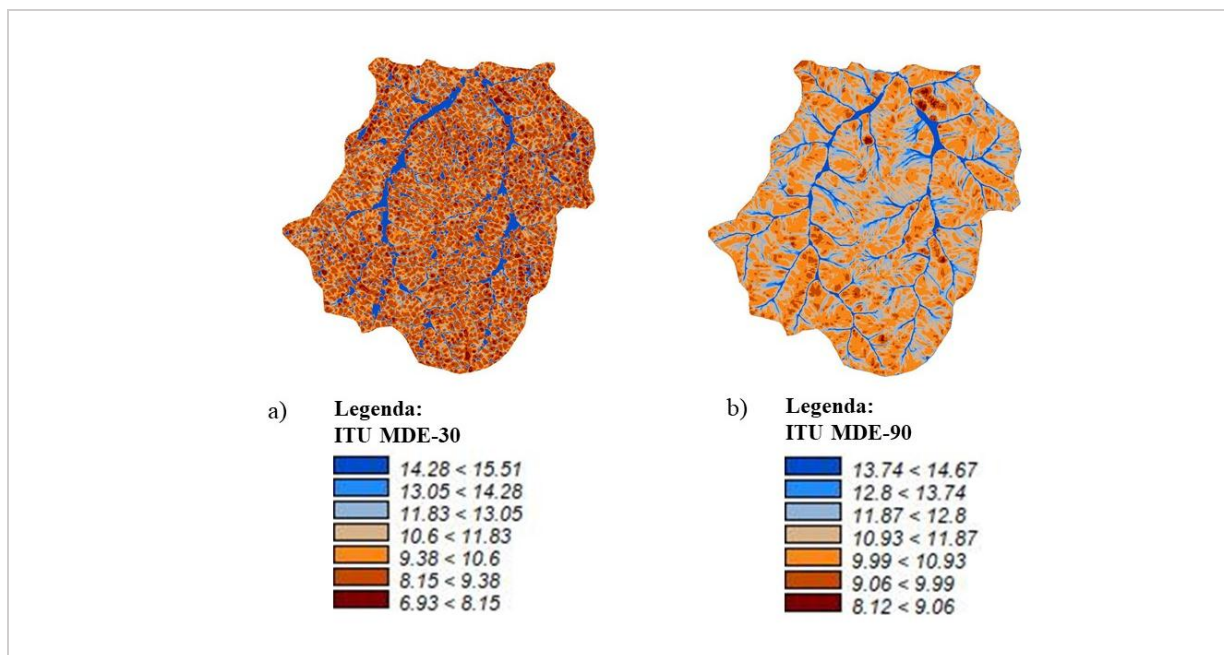
Figura 10. Mapas rasters das variáveis morfométricas para o cálculo do Índice Topográfico de Umidade (exceto a variável aspecto de vertentes), a partir dos sensores orbitais SRTM, resolução espacial de 90 m (MDE-90), e ASTER, resolução espacial de 30 m (MDE-30).



O MDE de menor resolução original (MDE-90) apresentou maior número de área do ITU (120.000 pixels) do que o MDE de maior resolução (100.000 pixels),

considerando valores acima da média do conjunto de dado de cada MDE e de um total de 339.635 pixels de ambos os MDEs. Esta comparação do ITU entre MDEs de diferentes resoluções está de acordo com os resultados encontrados nos trabalhos de Wolock e Price (1994); Wolock e McCabe (2000) e Thompson, Bell e Butler (2001).

Figura 11. Índice Topográfico de Umidade calculado para os MDE-30 (a) e MDE-90 (b).



Na literatura, diversos trabalhos (WOLOCK; PRICE, 1994; SØRENSEN; SEIBERT, 2007; BUCHANAN et al., 2014) abordam o desempenho do ITU $[\ln(ac/\beta)]$ e suas variáveis empregadas em MDEs de diferentes resoluções. Estes trabalhos nem sempre apresentam consenso nos seus resultados sobre a determinação de um MDE ótimo para o cálculo do ITU. Sørensen e Seibert (2007) concluem que nem sempre um MDE de melhor resolução determinará um melhor resultado de representação do ITU, e que a resolução ideal deve representar as características topográficas importantes para determinada variável de interesse; em certos casos, uma resolução mais fina poderia enfraquecer as correlações com o índice. Os autores sugerem que uma alternativa interessante seria a utilização do cálculo do índice de forma combinada para MDEs de diferentes resoluções.

Contudo, as áreas ripárias estão intimamente associadas às áreas ao longo dos cursos hídricos de uma paisagem. A representação pelo ITU abrange desde cursos hídricos perenes e todo o gradiente de umidade dos solos numa MBH. Assumiu-se que nas MBHs do Consulta e do Retiro as áreas de maior condição de umidade, associadas à vegetação ripária, estariam localizadas ao longo dos canais de drenagem perenes. Isto porque a topografia

suavizada e o predomínio à montante de Argissolos e Latossolos, que em geral são solos bem drenados, favoreceriam maior infiltração nos solos à montante e acúmulo hídrico nas áreas depressionais das MBHs, e à jusante. As condições climáticas das MBHs (estação chuvosa e seca, bem definidas) ditariam a dimensão espacial das áreas ripárias próximas aos canais de drenagens e, dependendo do volume e intensidade de precipitação, poderiam favorecer a ocorrência de cursos temporários e efêmeros durante a estação chuvosa.

A comparação entre os mapas gerados do ITU (Figura 11b) e o mapa da rede de drenagem das MBHs (Figura 9) mostrou que o MDE-30, embora tenha apresentado menor área em pixels, obteve uma quantidade de ramificações de ITU representadas muito maior que o ITU no MDE-90 e o número de canais de drenagem levantados nas duas MBHs (28 canais). É possível que parte dos pixels representados no ITU gerado no MDE-30 tenham sido assimilados a canais de drenagem temporários e efêmeros durante a estação chuvosa e ou rotas de fluxo hídrico preferenciais durante uma determinada precipitação.

O MDE-90, por se apresentar mais condizente com a espacialização dos canais de drenagem das MBHs, foi adotado como referência para caracterizar as classes do ITU nas MBHs. No entanto, o MDE-30 também apresentou resultados interessantes na representação do ITU ao longo do canal de drenagem principal.

As MBHs do Consulta e do Retiro apresentaram resultados semelhantes em valor médio, mínimo e máximo do ITU (Tabela 7), além de muitas semelhanças na distribuição e localização dos valores do conjunto de dados (Apêndice B).

Tabela 7. Estatística descritiva de valores de Índice Topográfico de Umidade (ITU) das microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), gerados para um modelo digital de elevação com resolução espacial de 90 m.

MBH	Médio	Mínimo	Máximo	Amplitude	Variância	DP	Mediana	1º quartil	3º quartil
	ITU (adimensional)								
Consulta	11,34	7,75	24,34	16,34	2,72	1,64	10,98	10,47	11,68
Retiro	11,43	7,64	24,23	16,59	2,64	1,62	11,01	10,58	11,8

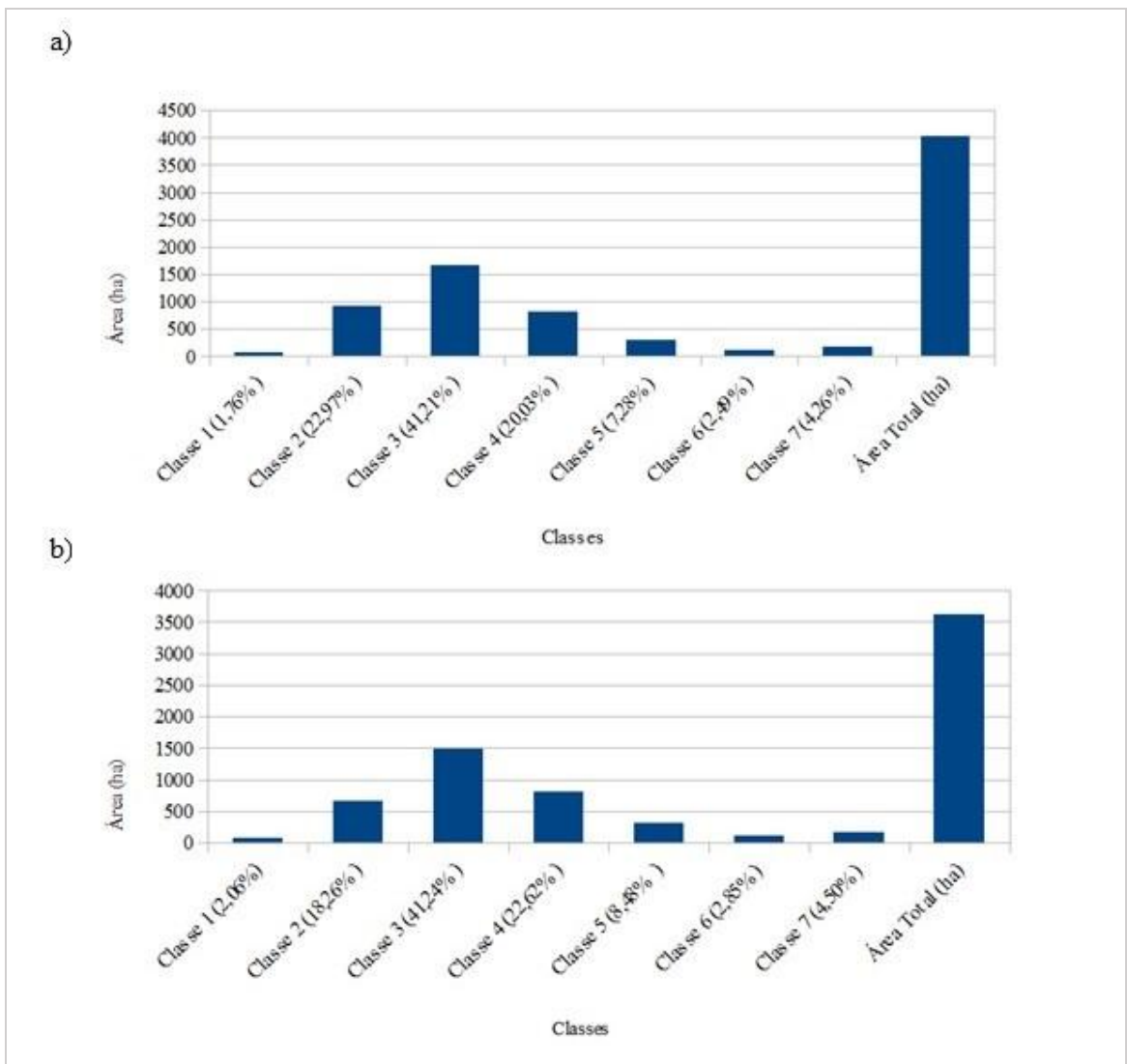
DP: Desvio Padrão

Analisando a distribuição das 18 classes de frequência do ITU nas MBHs (Apêndices C e D), observa-se que a frequência relativa decresce à medida que aumentam os valores do índice, a partir da quarta classe (ITU:10,3 a 11, 4). Da oitava a 18ª classe (ITU:14 a

24), os valores apresentaram uma baixa frequência relativa (menor que 1%) e essas classes foram agrupadas à classe anterior.

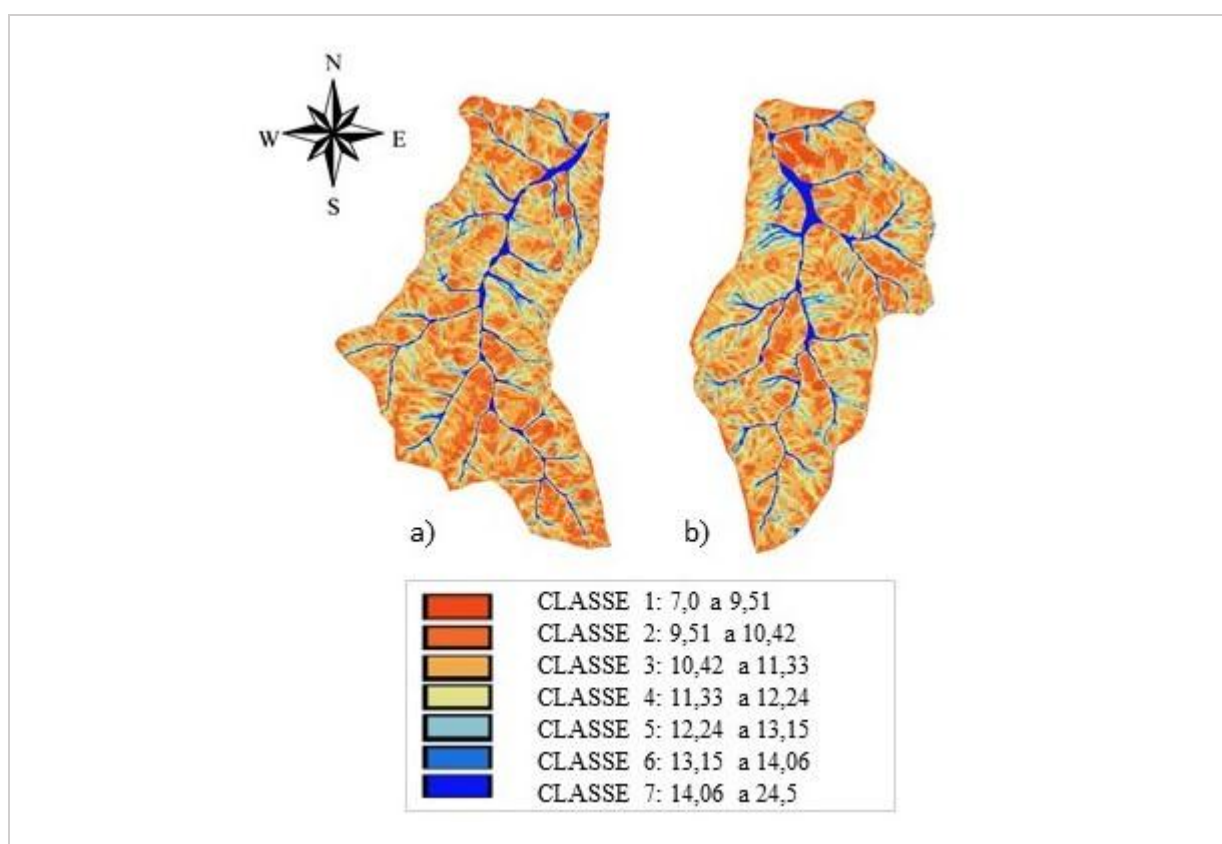
As sete classes de ITU encontram-se no Apêndice E. As duas MBHs apresentaram maior frequência relativa na terceira classe de ITU (10,38 a 11, 37), que concentra mais de 40 % dos valores. A quarta classe, considerada média, incluiu os valores de ITU médio das MBHs e representou 20% da área da MBH Consulta e 22,6% da MBH Retiro (Figura 12).

Figura 12. Área das classes do Índice Topográfico de Umidade, em hectares, por meio do modelo digital de elevação gerado com o SRTM, resolução 90 m: a) microbacia do Córrego da Consulta; b) microbacia do Córrego do Retiro.



As classes de maior valor de ITU (classes cinco, seis e sete) juntas representaram 14% da área da MBH Consulta e 16,8% da MBH Retiro, ou seja, 536,96 ha e 571,34 ha, respectivamente. A classe de maior ITU ($> 14,06$) correspondeu a 171 ha (4,26% da área) na MBH do Consulta e a 162,5 ha (4,5%) na MBH do Retiro, constituindo áreas mais propensas à saturação hídrica, incluindo os cursos hídricos perenes (Figura 13).

Figura 13. Índice Topográfico de Umidade das microbacias hidrográficas gerado no MDE-90 com sete classes: (a) Córrego da Consulta; (b) Córrego do Retiro. Imagem ilustrativa sem escala.



Trabalhos com base no ITU apontam a potencialidade do índice de prever condições de umidade do solo e distribuição de comunidades fitogeográficas em bacias hidrográficas. Zinko et al. (2005) encontraram valores do ITU variando entre 2 e 18 em uma MBH de 25 km² na Suécia e correlacionou um valor de ITU a partir de 11,5 para distinguir áreas de floresta e vegetação não florestal numa região de floresta Boreal. Estudando a relação solo-paisagem por meio de índices topográficos calculados para uma MBH em Curitiba, Sirtoli et al. (2008) obtiveram 71% de coincidência na previsão de unidade de solos com caráter hidromórfico para um valor de ITU a partir de 11, numa amplitude de 6,69 e

23,07 do ITU. Por meio do $[\ln (ac/\beta)]$, Zakia (1998) classificou 10,4% da área de uma MBH em Arapoti (PR) como ripária e encontrou correspondência entre previsão de áreas de afluência e ocorrência de espécies florestais higrófitas. Attanasio et al. (2006), por meio do ITU, classificaram como ripárias 24,9% das áreas de uma MBH de 3.656 ha, localizada em Mineiros do Tietê (SP), e observou que apenas 27,6% (251,2 ha) das áreas ripárias estavam amparadas legalmente com APPs (Lei 4771, 15 de setembro de 1965).

5.1.2 Caracterização dos elementos de paisagem

A maioria das classificações dos elementos da paisagem baseiam-se de maneira implícita ou explícita de como o campo gravitacional interage com o relevo na orientação de fluxos na superfície, e com estes fluxos modificam as formas do relevo (SHARY, 1995). A descrição do contínuo da superfície de relevo permite comparações quantitativas baseado nesta diferenciação qualitativa dos elementos da paisagem (MACMILLAN; SHARY, 2009). Com isso, pode-se inferir sobre os processos hidrológicos, pedológicos, ecológicos que ocorrem na paisagem (PENNOCK; ZEBARTH; De JONG, 1987; DIKAU, 1989; MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991; PENNOCK, 2003; IWAHASHI; PIKE, 2007; TAGIL; JENNESS, 2008).

Os índices foram classificados em três classes, conforme as características de relevo interpretadas com base nos valores processados nos MDEs (Figura 14), sendo observadas a representatividade destas classes nas áreas das respectivas MBHs (Tabela 8 e Tabela 9). Os MDEs apresentaram resultados diferentes nos valores das classes das variáveis topográficas calculadas. O MDE-90, devido à sua menor resolução, suprimiu as classes de maior valor das variáveis do MDE-30. O ITU do MDE-30 permitiu mapear de forma mais detalhada as áreas com alto ITU que estão próximas ao sopé aluvial das MBHs, tendo sido, portanto, utilizado para discretizar este elemento de paisagem das MBHs do Consulta e do Retiro.

As MBHs do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro também apresentaram semelhanças na caracterização da curvatura de vertentes. Nos mapas de PLAN observou-se que grande parte das áreas de curvatura horizontal côncavas estão localizadas próximas aos canais de drenagem das MBHs. O PROF das microbacias apresentaram um perfil de vertentes bem distribuído entre curvaturas côncavas, convexas e retilíneas (Tabela 9). A curvatura das vertentes é um fator determinante na orientação dos movimentos d'água na paisagem (HALL; OLSON, 1991; PENNOCK; ZEBARTH; De JONG, 1987, DIKAU, 1989).

A convexidade ou concavidade da vertente modifica a potência erosional no escoamento superficial e influi na movimentação e redes de drenagem pelo solo, em que os solos tendem a infiltrar e tornar-se saturados na porção côncava da bacia e áreas do sopé aluvial, e mais secas na porção convexa e em ombros divergentes (HALL; OLSON, 1991).

Figura 14. Mapas de declividade, curvatura horizontal e curvatura vertical, usados para a caracterização dos elementos de paisagem, estabelecidos para MDE-30 e MDE-90 para as microbacias do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro.

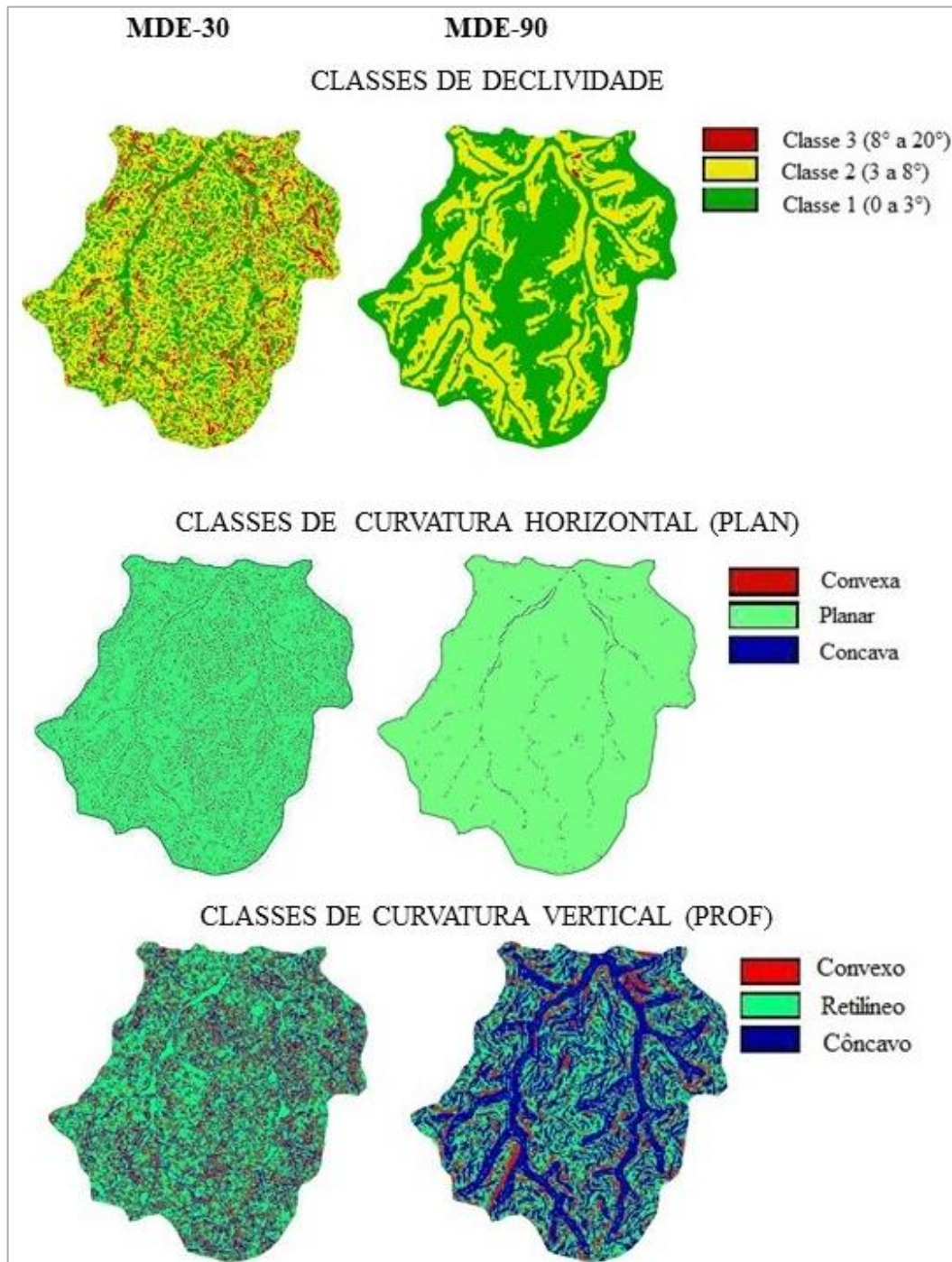


Tabela 8. Área, em hectares e em porcentagem, de curvatura horizontal, curvatura vertical e gradiente de declividade para as microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), pelo modelo digital de elevação de resolução espacial de 90 m.

Classes	MBH do Consulta		MBH do Retiro	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
CURVATURA HORIZONTAL				
Côncavas	10,2375	0,25%	7,1325	0,20%
Planares	4005,923	99,64%	3598,808	99,70%
Convexas	4,2975	0,11%	3,645	0,10%
Total	4020,458	100%	3609,585	100%
CURVATURA VERTICAL				
Côncavas	1998,293	49,81%	1802,273	50,04%
Retilíneos	1452,42	36,21%	1350,36	37,50%
Convexas	560,7675	13,98%	448,695	12,46%
Total	4011,48	100%	3601,328	100%
DECLIVIDADE				
Plana (0° a 3°)	2221,898	55%	2212,02	61%
Suave (3° a 8°)	1795,23	45%	1389,375	38%
Íngreme (8° a 20°)	3,9825	0%	9,45	0%
Total	4021,11	100%	3610,845	100%

Tabela 9. Área, em hectares e em porcentagem, de classes de curvatura horizontal, curvatura vertical e gradiente de declividade das microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), pelo modelo digital de elevação de resolução espacial de 30 m.

Classes	MBH do Consulta		MBH do Retiro	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
CURVATURA HORIZONTAL				
Côncavas	53,9	1,3%	54,2	1,5%
Planares	3911,1	97,3%	3496,4	96,9%
Convexas	56,0	1,4%	59,6	1,7%
Total	4021,1	100%	3610,3	100%
CURVATURA VERTICAL				
Côncavas	866,0	21,5%	894,8	24,8%
Retilíneos	2326,8	57,9%	1909,6	52,9%
Convexas	827,6	20,6%	805,9	22,3%
Total	4020,3	100%	3610,3	100%
DECLIVIDADE				
Plana (0° a 3°)	1382,1	34,4%	1216,8	33,7%
Suave (3° a 8°)	2264,5	56,3%	1975,2	54,7%
Íngreme (8° a 20°)	374,5	9,3%	418,9	11,6%
Total	4021,1	100%	3610,9	100%

A curvatura vertical (PROF), nos limites de classes estabelecidos em Young (1972)¹⁵ citado por Pennock, Zebarth e De Jong (1987), apresentou uma variação praticamente nula na classificação do perfil de encosta¹⁶ em côncavo, planar e convexo. A classificação de PROF foi ajustada de acordo com os valores resultantes dos índices positivos (convexo), negativos (côncavo) e próximos a 0 (retilíneo), conforme distribuição da classe de frequência. Isso mostra que a transição entre os segmentos de vertentes em ambas MBHs ocorre de forma suavizada, condizente com as características de relevo de colinas suaves. Os limites de classe utilizados em PLAN, conforme Tagil e Jenness (2008), mostraram uma baixa frequência de curvaturas horizontais côncavas e convexas, representando majoritariamente superfícies planares.

A classificação dos elementos da paisagem das MBHs foi elaborada com base no MDE-30 e no MDE-90, testando 13 categorias possíveis (Apêndices F e G), e resultou num máximo de cinco classes de FEP (Figuras 15), conforme o cruzamento das informações de curvaturas vertical e horizontal e declividade. No entanto, esta categorização não discretizava os elementos sopé aluvial, no qual se incluía a classe de áreas planas (P). No MDE-30, buscou-se evidenciar as áreas de sopé aluvial (Figura 16), por meio da álgebra de mapas entre a classe P, o ITU e a classe de elevação de 526 a 590 m. Com isto, foram obtidas seis classes de FEP para as MBHs dos Córregos da Consulta e do Retiro, classificados em (Apêndice H): ombro (OM); sopé coluvial (SC); meia encosta de inclinação suave, retilínea (MES); meia encosta de inclinação íngreme, retilínea (MEI); áreas de declividade plana (Topo e rampas < 3°) (P); e sopé aluvial (SA).

Entende-se que cada MDE oferece resultados a serem considerados na representação dos mapas das MBHs, de acordo com sua escala espacial. A caracterização da paisagem e seus elementos é feita por meio de uma hierarquização de escalas e tamanhos (DIKAU, 1989; MACMILLAN; SHARY, 2009). Segundo Dikau (1989), a hierarquia espacial das unidades de relevo pode ser definida em função de diferentes tipos e níveis de relevo, variando de picorelevos a megarelevos. A escala espacial dos tipos de unidades de relevo é dada por uma relação de área e largura destas unidades. Por exemplo, microrrelevos apresentam largura variando de 10 m a 100 m, e áreas de 10 a 10.000 m² (DIKAU, 1989). Cada MDE ofereceu resultados diferentes, serem considerados nos mapas das MBHs, em

¹⁵ Os critérios de delimitação dos perfis de Pennock, Zebarth e De Jong (1987) baseados em Young (1972) estabelece perfil de vertentes igual/maior que 0,1 (+0,1°/m) para designar áreas convexas; e igual/ menor que -0,1 para áreas côncavas (-0,1 °/m). Entre estes valores (-0,1 e 0,1) áreas retilíneas.

¹⁶ Relevo caracterizado por colinas.

função do tamanho e extensão da área observada, e da resolução vertical e horizontal dos dados de elevação.

Figura 15. Forma dos elementos de paisagem das microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), adaptado de Pennock, Zebarth e De Jong (1987), a partir dos modelos digitais de elevação de resolução espacial de 30 m (MDE-30) e de 90 m (MDE-90).

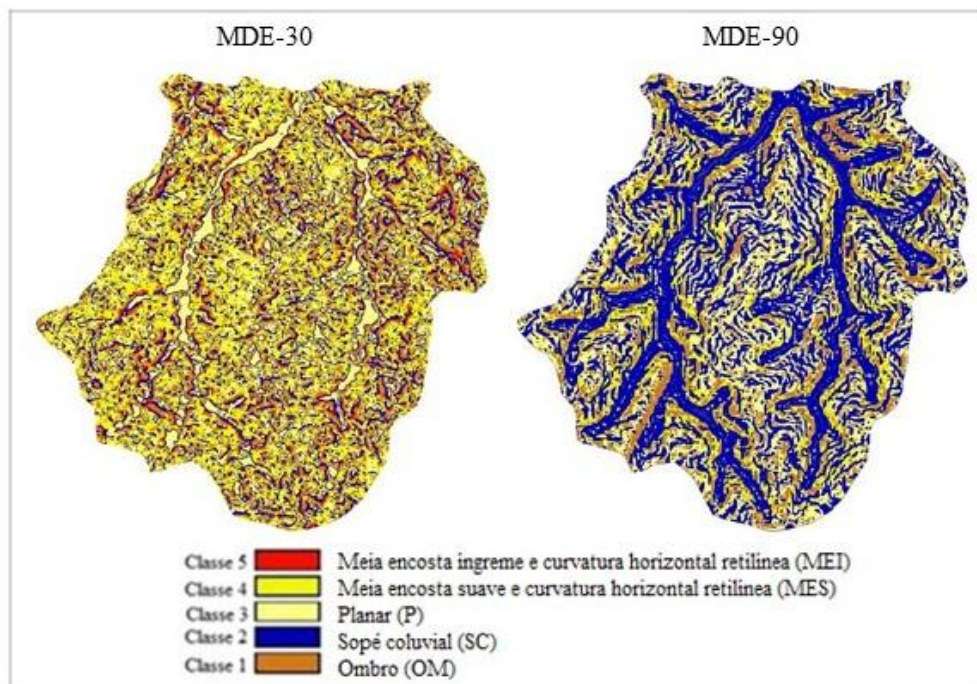
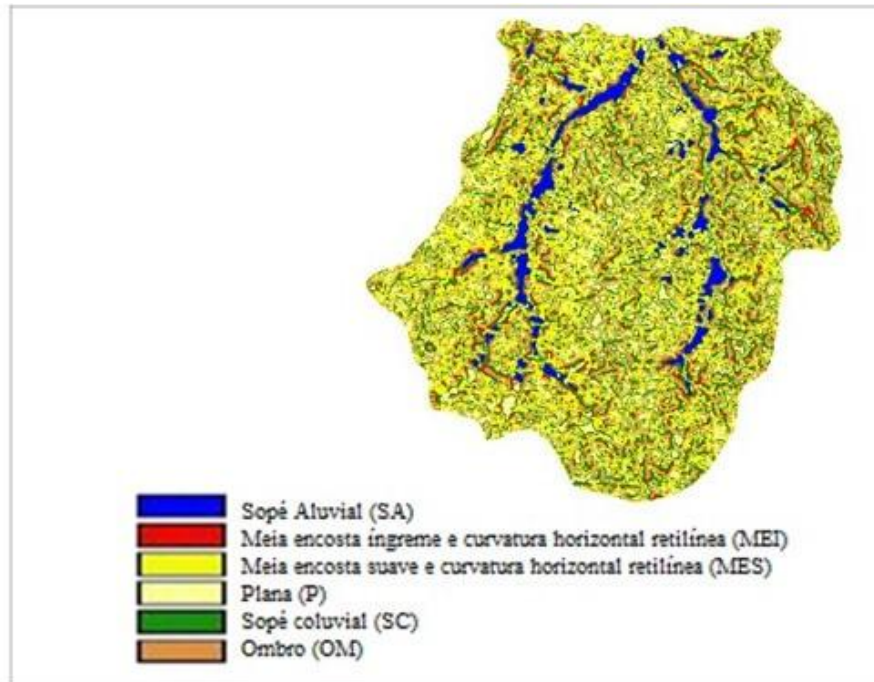
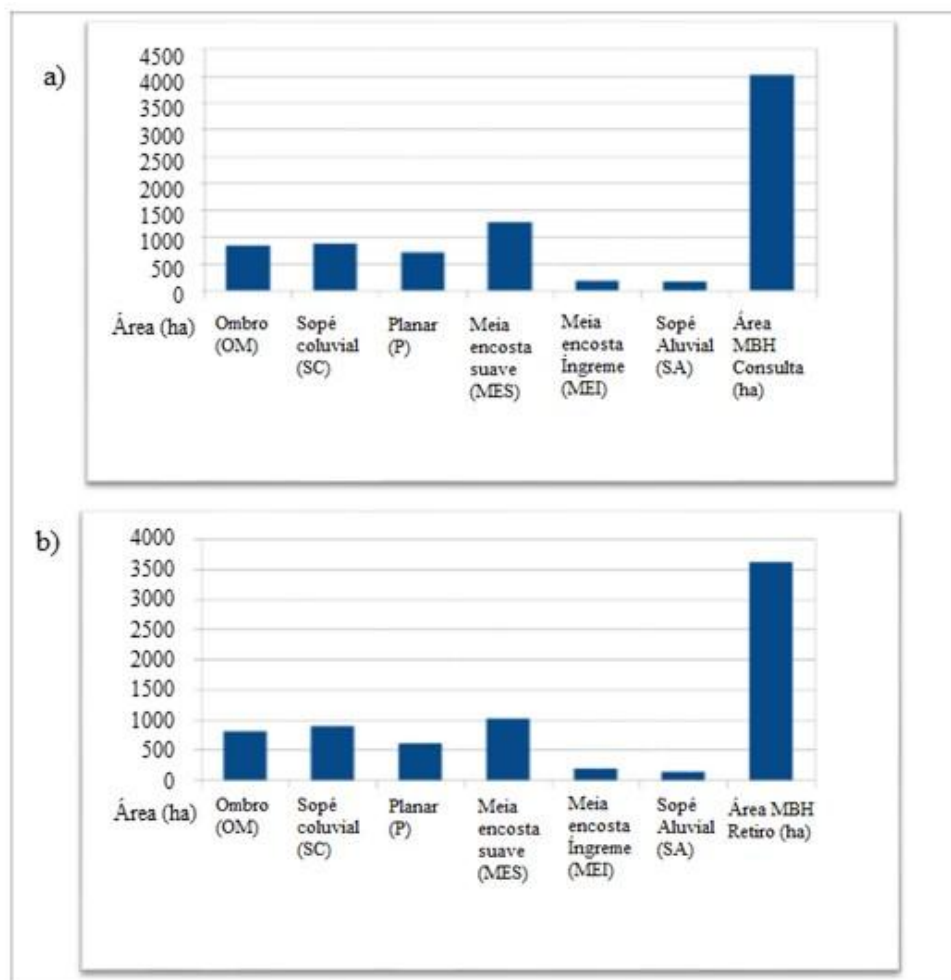


Figura 16. Forma dos elementos de paisagem das microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), representadas no MDE-30, destacando-se em azul as áreas de sopé aluvial, a partir do cruzamento de classe plana, índice topográfico de umidade e classe de elevação de 526 a 590 m.



Nas MBHs estudadas, a classe de FEP de maior representatividade foi MES, seguida das classes OM e SC, praticamente equivalentes. A classe MEI (inclinações de 8° a 20°) ocorreu em 174,12 ha da MBH do Córrego da Consulta (Figura 17a) e 178,6 ha da MBH do Córrego do Retiro (Figura 17b). Parte das áreas de maior inclinação ocorrem em trechos próximos ao sopé aluvial e canais de drenagens das MBHs, consistindo em áreas de significativa importância de conservação para as MBHs e merecem atenção. Estas áreas possuem interação frequente com o meio fluvial e possuem um caráter de áreas deposicionais de materiais de solo, sedimentos e recebimento dos fluxos do escoamento direto de áreas a montante das microbacias. Estas áreas corresponderam a 171,4 ha na MBH do Córrego da Consulta e a 125,4 ha MBH do Córrego do Retiro.

Figura 17. Área, em hectares, de formas dos elementos de paisagem nas microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta (a) e do Córrego do Retiro (b), em Bebedouro (SP), definidas no modelo digital de elevação de 30 m de resolução.



Para uma maior caracterização das classes de declividade, foram gerados mapas com cinco classes. Os MDEs também resultaram em representações diferentes de acordo com a resolução de cada fonte de dados. Neste caso, o MDE-90 (Figura 18) apresentou suavização das classes de declividade mais acentuadas (Apêndice I) em relação ao MDE-30. O detalhamento numa escala mais refinada (MDE-30) (Figura 19) apontou que as classes de declividade (Tabela 10) predominantes eram de moderadamente onduladas (6 – 12%). As áreas de classes de declividade mais planas das MBHs dos Córregos da Consulta e do Retiro concentraram-se em áreas próximas aos canais de drenagem e sopé aluvial.

Figura 18. Classes de declividade das microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), definidas por meio de modelo digital de elevação com resolução de 90 m (MDE-90).

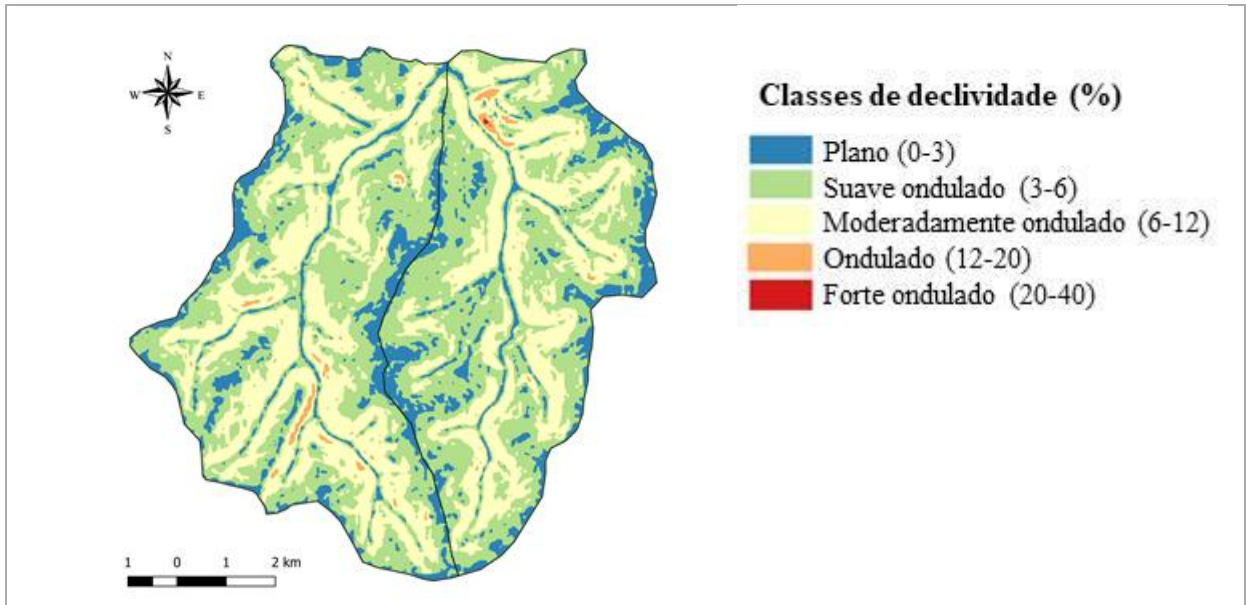
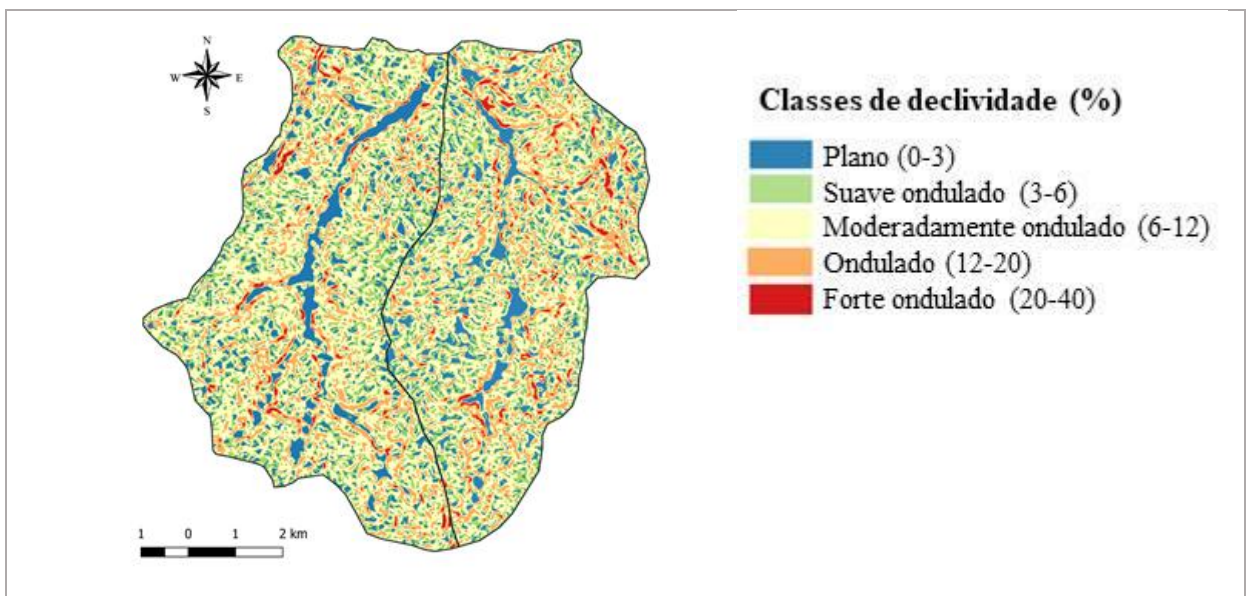


Figura 19. Classes de declividade para as microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP), definidas por meio do modelo digital de elevação com resolução espacial de 30 m. Imagem ilustrativa (sem escala).



As classes de maior declividade (Classe 4: de 12% a 20% e Classe 5: de 20 a 45%) representaram uma pequena parcela das áreas das MBHs, em 71, 82 ha (MBH do Consulta) e 89,83 ha (MBH do Retiro), e observou-se a proximidade de áreas de maior

declividade em relação as áreas de sopé aluvial das duas MBHs. Estas áreas situavam-se em locais de meia encosta de declividade mais acentuada¹⁷, onde a gravidade pode atuar de forma mais pronunciada nos processos de escoamento e transporte de sedimentos (PENNOCK; ZEBARTH; De JONG, 1987; ZEVENBERGEN; THORNE, 1997; PENNOCK, 2003; QUINN, 1991). Portanto, foram consideradas áreas importantes para a conservação e manejo diferenciado nestas MBHs.

Tabela 10. Área, em hectares e em porcentagem, por classe de declividade obtida pelo índice de declividade determinado no MDE-30 para as microbacias dos Córregos da Consulta e do Retiro, em Bebedouro (SP).

Declividade	Classificação	Área	
		ha	(%)
MBH do Consulta			
0 – 3%	Plano	592,26	14,72%
3 – 6%	Suave ondulado	869,03	21,60%
6 – 12%	Moderadamente ondulado	1803,83	44,85%
12 – 20%	Ondulado	685,41	17,04%
20 – 40%	Forte ondulado	71,82	1,79%
	Total	4.022,36	100%
MBH do Retiro			
0 – 3%	Plano	533,87	14,75%
3 – 6%	Suave ondulado	753,31	20,81%
6 – 12%	Moderadamente ondulado	1545,26	42,69%
12 – 20%	Ondulado	697,28	19,26%
20 – 40%	Forte ondulado	89,83	2,48%
	Total	3.619,55	100%

5.1.3 Caracterização do uso e ocupação dos solos

Nas MBHs estudadas predominou a classe áreas cultivadas e de uso antrópico (Figura 20 e Tabela 11), que corresponderam a 85% da área na MBH do Consulta e 86% da área na MBH do Retiro. As culturas principais observadas foram cana e plantações de citros (laranja).

¹⁷ Neste trabalho consideraram-se áreas acima de 14% ou 8° para diferenciar áreas de meia encosta íngremes de áreas de meia encosta de inclinação suave.

Figura 20. Classes de uso e ocupação nas microbacias dos Córregos da Consulta e Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP), identificadas por meio de imagens RapidEye ano 2013(setembro) e ano 2014 (fevereiro). Ilustração sem escala.

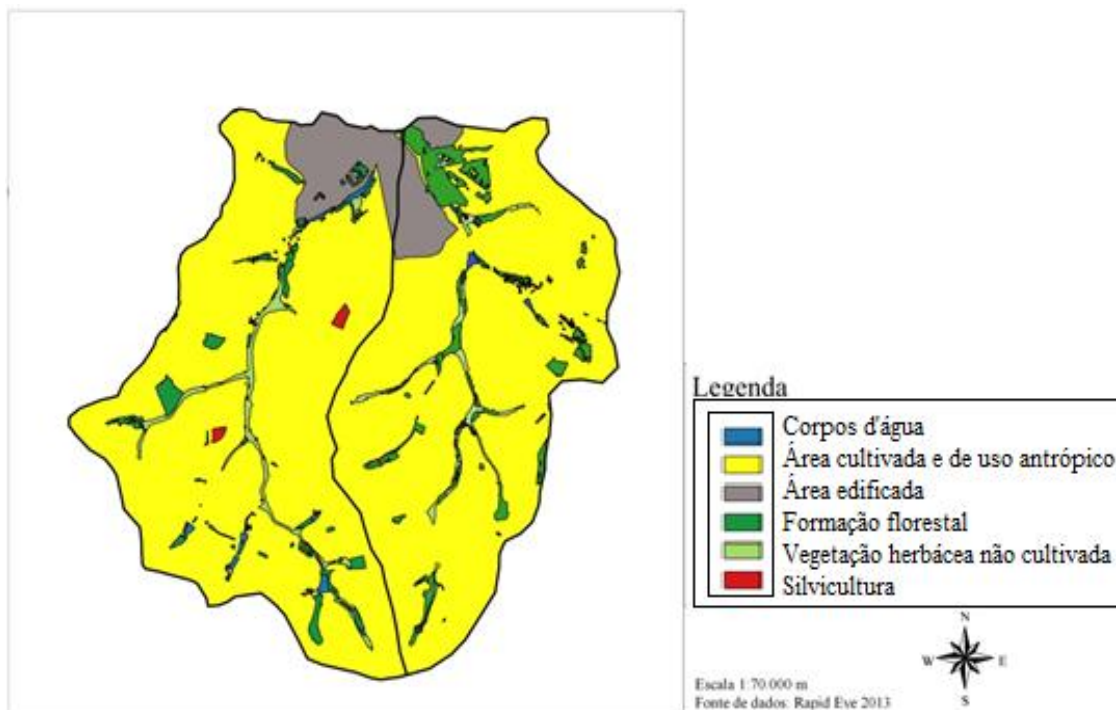
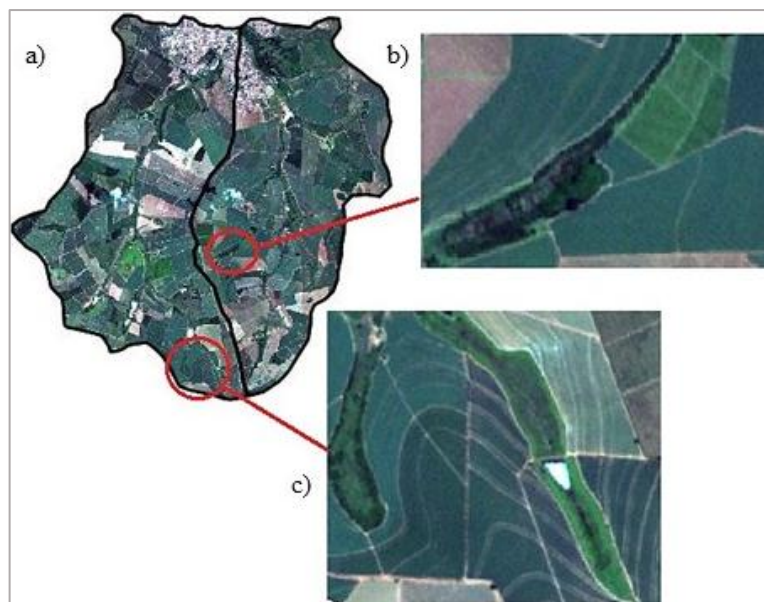


Tabela 11. Área, em hectares e em porcentagem, das classes de uso e ocupação na microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta do Córrego do Retiro, identificadas por meio de imagens RapidEye ano 2013 (setembro) e ano 2014 (fevereiro).

Classe de uso e ocupação	Área (ha)	(%)
<u>MBH do Consulta</u>		
Corpos d'água	28,66	0,71%
Área cultivada e de uso antrópico	3429,91	85,27%
Área edificada	314,08	7,81%
Formação florestal	134,98	3,36%
Vegetação herbácea não cultivada	100,40	2,50%
Silvicultura	14,61	0,36%
Total	4022,64	100%
<u>MBH do Retiro</u>		
Corpos d'água	11,36	0,31%
Área cultivada e de uso antrópico	3110,49	85,93%
Área edificada	188,48	5,21%
Formação florestal	247,06	6,83%
Vegetação herbácea não cultivada	62,27	1,72%
Silvicultura	0,00	0
Total	3619,66	100%

Em verificação no campo, observou-se que a classe formação florestal envolvia desde florestas nativas (principalmente na área rural), com ocorrência de espécies exóticas invasoras (por exemplo, *Leucaena* sp.), principalmente próximo à área urbana. Na classe vegetação herbácea não cultivada verificou-se a presença de gramíneas situadas ao longo do sopé aluvial e de canais de drenagem das microbacias (Figura 21).

Figura 21. Vegetação herbácea não cultivada observada na área de estudo: a) imagem* das duas bacias; b) detalhe de uma área de ocorrência próxima a um canal de drenagem da microbacia hidrográfica do Córrego do Retiro; c) detalhe de uma área de ocorrência próxima a um canal de drenagem da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta.



*Imagem RapidEye (dezembro) ano 2012, resolução espacial 5 metros, composição de bandas RGB 321.

A vegetação herbácea não cultivada sugere a ocorrência de espécies de característica higrófila, podendo conter tanto espécies herbáceas nativas quanto exóticas. Possivelmente, estão em locais de intensa atividade e dinâmica hidrológica, e, provavelmente, houve o desflorestamento para fins agrícolas no passado. A vegetação herbácea não cultivada se estabelece de forma quase que contínua ao longo dos canais de drenagem, havendo descontinuidade por interferências de áreas cultivadas e de uso antrópico e também de corpos d'água. Por meio de imagens Google Earth, de 2003 e de 2016, utilizando-se o recurso temporal desta plataforma, foi possível observar uma baixa ou quase inexistente capacidade de recuperação passiva da vegetação florestal ripária no restabelecimento de áreas ocupadas por vegetação herbácea não cultivada nestas MBHs.

O uso e ocupação nas APPs das MBH do Córrego da Consulta (Tabela 12) e MBH do Córrego do Retiro (Tabela 13) apontaram incompatibilidades com a legislação (Lei 12651, de 2012, artigo 7º e artigo 61-A), já que uma parcela significativa das APPs destas microbacias coincidem com as classes de uso e ocupação de áreas cultivadas e de uso antrópico.

Tabela 12. Área, em hectares e em porcentagem, dos diferentes usos identificados em áreas de preservação permanente (APP) e em área de uso consolidado (AUC) da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta, em Bebedouro (SP).

MBH do Consulta	APP (30 m)		APP (50 m)		AUC	
	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)
Cultivadas e de uso antrópico	34,67	19,56	4,79	50,24	15,71	38,99
Edificada (lago artificial e trechos canalizados)	13,86	7,82	0	0	0	0
Formação florestal	37,78	21,31	3,71	38,92	*	**
Vegetação herbácea não cultivada	74,92	42,26	1,04	10,85	19,4	48,16
Corpos d'água	16,04	9,05	0	0	0,11	0,28
Total	177,3	100	9,54	100	40,28	100

Áreas declaradas como AUC, mas apontadas como ocupação florestal: *5,063; **12,57.

Tabela 13. Área, em hectares e em porcentagem, dos diferentes usos identificados em áreas de preservação permanente (APP) e em área de uso consolidado (AUC) da microbacia hidrográfica do Córrego do Retiro, em Bebedouro (SP).

MBH do Retiro	APP (30 m)		APP (50 m)		AUC	
	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)
Cultivadas e de uso antrópico	42,82	23,85	1,755	25,49	14,38	52,94
Edificada (Lago artificial e trechos canalizados)	0,05	0,03	0	0	0	0
Formação florestal	80,30	44,73	3,87	56,21	*	**
Vegetação herbácea não cultivada	50,83	28,31	1,24	17,97	6,03	22,20
Corpos d'água	5,53	3,08	0,02	0,33	0,11	0,41
Total	179,5	100	6,88	100	27,15	

Áreas declaradas como AUC, mas apontadas como ocupação florestal: *6,64; **24,44%

5.2 Diagnóstico das microbacias hidrográficas e cenários para a restauração florestal

Primeiramente, foram cruzadas as informações das classes do ITU e forma dos elementos de paisagem (Figura 22). O resultado evidenciou uma certa concordância entre o indicativo de áreas sujeitas a maior umidade nas MBHs pelo ITU e pela caracterização das formas dos elementos de paisagem. Conceitualmente, o sopé aluvial consiste nos locais que o solo mais recebe umidade, enquanto o segmento ombros divergentes, o de menor umidade disponível (HALL; OLSON, 1991).

Neste cruzamento, considerando o ITU máximo (ITU classe 7: > 14), verifica-se que houve certa consonância sobre as áreas categorizadas como sopé aluvial e sopé coluvial. Na MBH do Consulta (Figura 23a), o sopé aluvial correspondeu a 41% das áreas representadas pelo ITU de classe máxima, seguida das classes sopé coluvial (19,73%), classe meia encosta suave (14,92%), áreas planas (13,68%), ombro (8,6%) e meia encosta íngreme (1,95%) (Apêndice J). Na MBH do Córrego do Retiro (Figura 23b), por sua vez, maior relação foi encontrada entre as áreas de sopé coluvial e sopé aluvial, seguida de meia encosta suave, áreas planares, ombro e meia encosta íngreme (Apêndice J).

Figura 22. Cruzamento das informações das classes do Índice Topográfico de Umidade (ITU) com as formas dos elementos de paisagem das microbacias hidrográficas Consulta e do Retiro.

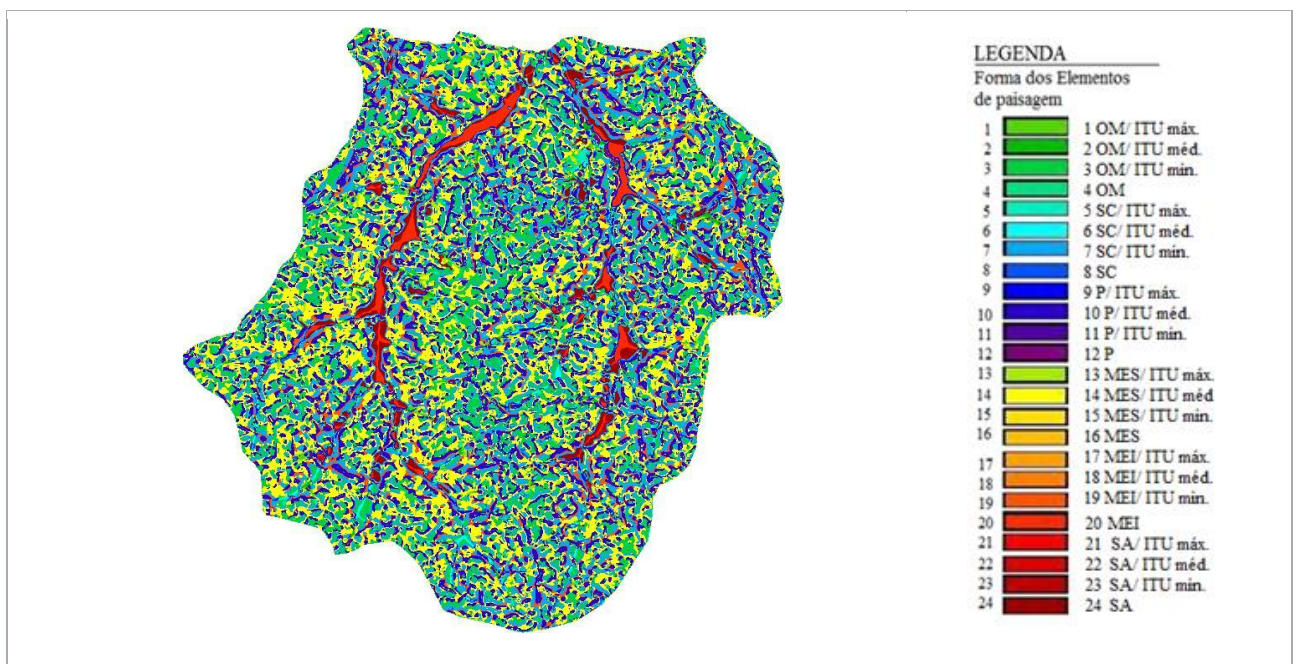
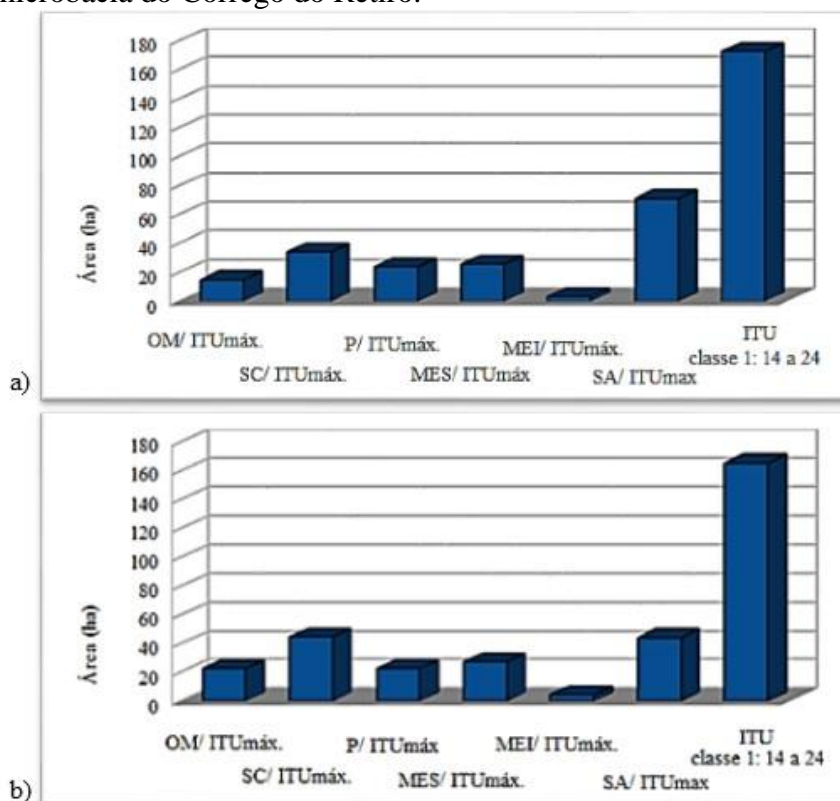


Figura 23. Locais de incidência do Índice Topográfico de Umidade (ITU classe 1: > 14) em relação as formas dos elementos de paisagem da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta e microbacia do Córrego do Retiro.



As formas de relevo com menor incidência do ITU nas MBHs foram as áreas de MEI. Os resultados indicaram poucas áreas com inclinação maior que 8° e 20° nas MBHs, e embora que, estas áreas tenham tendência a um menor acumulo hídrico, são mais suscetíveis ao escoamento superficial (dependendo também de outros fatores, como a intensidade e volume de precipitação, uso e ocupação do solo e capacidade de infiltração). O denominador declividade, no índice $[\ln(ac/\beta)]$, matematicamente atribui resultados menores do ITU para locais de maior inclinação mesmo em áreas com alto valor de ac . Assim, quando o $[\ln Ac/\beta]$ apresenta valores do ITU em áreas declivosas (por exemplo, a partir do ITU de classe mínima) é possível que estas áreas possam indicar locais de rotas de drenagem preferenciais dos fluxos hídricos nas MBHs.

As áreas de inclinação mais acentuada indicam uma predisposição maior quanto a ações erosivas e transporte de material para o sopé (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991; MINELLA; MERTEN, 2012). Um índice que relaciona as áreas sujeitas a estes processos erosivos e de transporte é o índice topográfico *Stream Power/* Potencial de escoamento de Moore, Grayson e Ladson (1991), por meio das variáveis ac e declividade, similarmente ao TWI, denominado ITU neste trabalho.

O *stream power* ou potência do escoamento, de acordo com Moore, Grayson e Ladson (1991), se apresentam como:

$$\Omega = p \cdot g \cdot q \cdot \text{declividade}$$

Onde,

Ω : é a potência do escoamento (Kg/m/s);

p : é a unidade de peso de água e sedimentos (Kg/ m³);

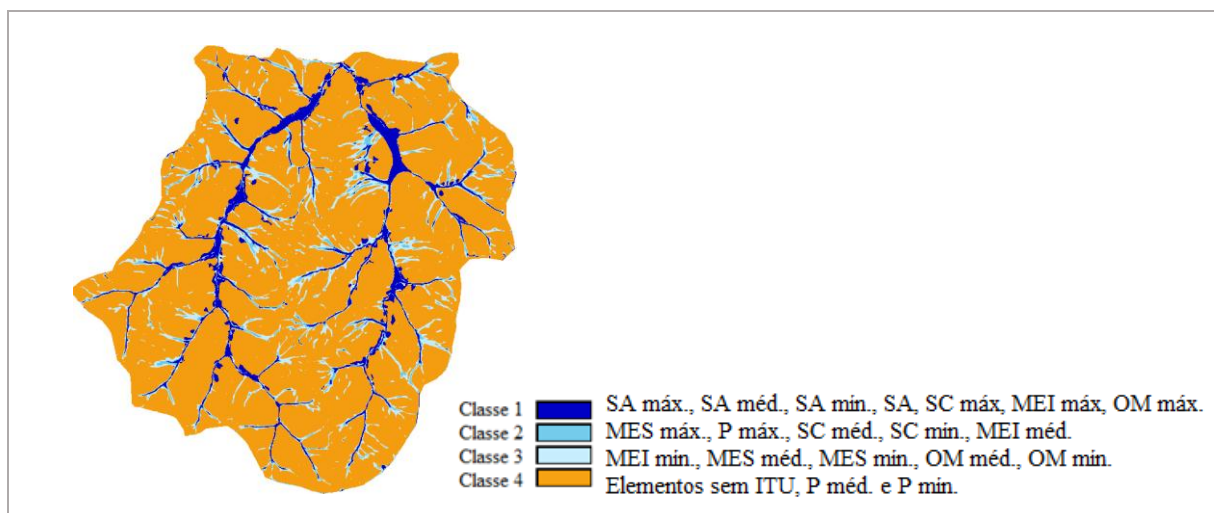
g : é aceleração da gravidade (m²/s); e

q : é a vazão por unidade de largura (m²/s).

Em alternativa ao *stream power index*, pode ser utilizado o índice topográfico $\Omega_{IT} = (ac \cdot \tan \beta)$, que permite estimá-lo com boa precisão (MOORE; BURCH; MACKENZIE, 1988). Neste sentido, áreas com alta declividade e que apresentam relação com o ITU, pelo peso da variável ac , pode indicar áreas sujeitas a uma alta potência de escoamento.

Para a proposição das áreas prioritárias de conservação, buscou-se considerar os resultados das FEP associados ao ITU (Figura 24). No entanto, priorizaram-se elementos como SA¹⁸, SC e MEI em relação as outras áreas. Em contrapartida, elementos categorizados em planares (P) que ocorreram ITU médio e mínimo não foram priorizados, e em substituição foi atribuída a classe SA que não obteve alto valor de ITU.

Figura 24. Agrupamento das classes resultantes do cruzamento do Índice Topográfico de Umidade e elementos de paisagem das microbacias Consulta e Retiro.



¹⁸ O SA/ ITU máximo, SA/ ITU médio e SA (apenas o elemento) foram agrupados na classe prioritária 1.

Deste modo, pôde-se elaborar o mapa de áreas prioritárias em função também do uso e ocupação dos solos (Figura 25). As áreas consideradas de maior importância para restauração florestal foram as classes das áreas cultivadas e de uso antrópico e a classe das áreas de vegetação herbácea não cultivada, no qual os índices topográficos apontam a possibilidade de áreas sensíveis sob o aspecto ambiental, conforme os critérios adotados (Tabela 14). As respectivas áreas resultantes como prioritárias e uso ocupação nas MBHs são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 14. Critérios usados para proposição de áreas prioritárias para conservação ambiental das microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro.

Classes	Critérios
Prioritária 1 (Áreas sem vegetação florestal e com alta predisposição ao acúmulo hídrico)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ITU: Classe 7 (>14,06); ▪ FEP: SA; ▪ Uso e ocupação: Classes de áreas cultivadas e uso antrópico, e classe vegetação herbácea não cultivada.
Prioritária 2 (Áreas sem vegetação florestal e com média predisposição ao acúmulo hídrico)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ITU: Classe 6 (>13,15 e <14,06); ▪ Uso e Ocupação: Classes de áreas cultivadas e uso antrópico, e classe vegetação herbácea não cultivada.
Prioritária 3 (Áreas sem vegetação florestal e com baixa predisposição ao acúmulo hídrico)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ITU: Classe 5 (> 12,24 e < 13,15); ▪ Uso e Ocupação: Classes de áreas cultivadas e uso antrópico, e classe vegetação herbácea não cultivada.

Tabela 15. Delimitação das áreas prioritárias (P1, P2 e P3) para restauração florestal das microbacias do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, e situação do uso e ocupação em 2013.

Classes: MBH Consulta	Área (ha)	(%) em relação área da MBH
P1	166,03	4,1%
P2	120,65	3,0%
P3	171,07	4,3%
Total Prioritárias	457,74	11,4%
Corpos d'água	19,51	0,5%
Área edificada	313,38	7,8%
Formação Florestal	168,53	4,2%
Silvicultura	17,51	0,4%
Áreas de Cultivo e de uso antrópico	3004,00	74,7%
Vegetação herbácea não cultivada	39,33	1,0%
Total	4019,99	100,0%
Classes: MBH Retiro	Área (ha)	(%) em relação área da MBH
P1	133,85	3,71%
P2	134,12	3,72%
P3	179,51	4,97%
Total Prioritárias	447,48	12,40%
Corpos d'água	6,75	0,19%
Área edificada	190,37	5,27%
Formação Florestal	292,88	8,11%
Silvicultura	0,00	0,00%
Áreas de Cultivo e de uso antrópico	2633,83	72,96%
Vegetação herbácea não cultivada	38,52	1,07%
Total	3609,83	100,00%

Figura 25. Resultado da delimitação das áreas prioritárias P1 e uso ocupação nas microbacias do Córrego da Consulta e Córrego do Retiro em (a) conforme processamento automatizado de índices topográficos de acordo com as classes do Índice Topográfico de Umidade; e em (b), delimitação das áreas prioritárias P1, P2 e P3.



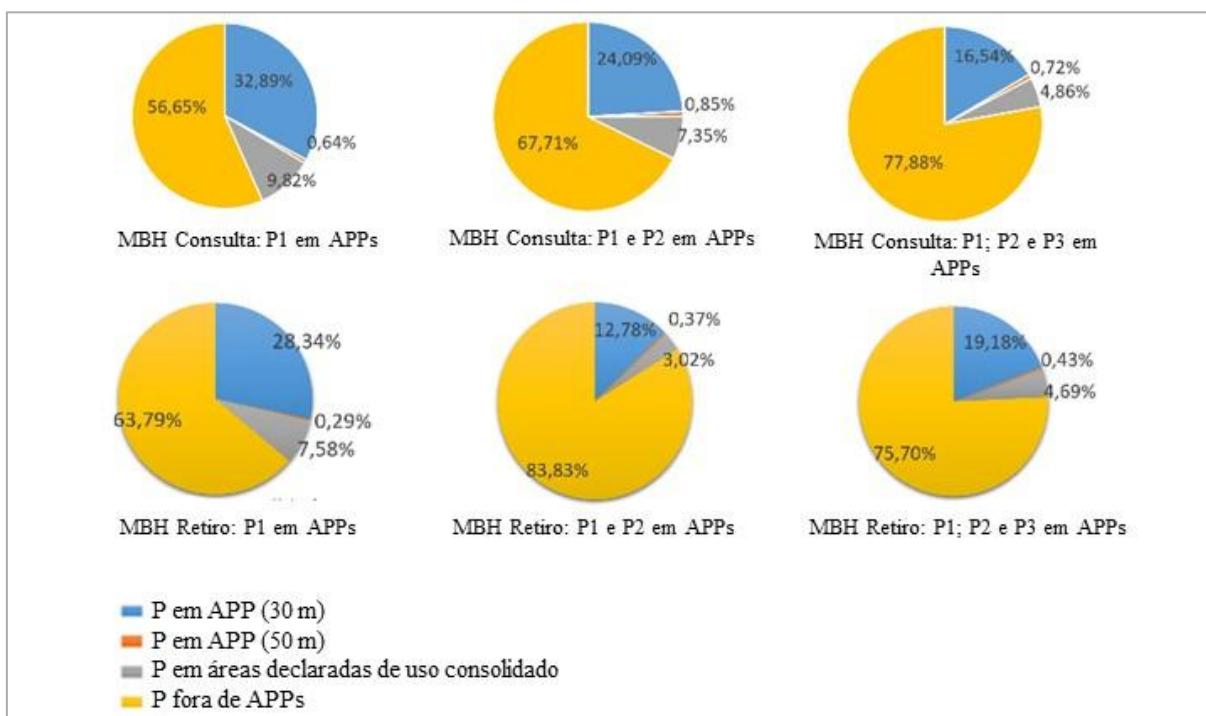
A delimitação P1 apontou 166 ha e 134 ha como locais sem vegetação florestal, e que podem abranger boa parte das áreas variáveis de afluência nas MBHs. A delimitação das áreas Prioritárias 1 (P1) ocorrem ao longo dos canais de drenagem das MBHs, variando

em diferentes larguras: de 15 metros (tamanho mínimo de representação possível pelo pixel) a 235 metros, por exemplo, excedendo a faixa mínima de proteção florestal de 30 metros determinada pela Lei Florestal (12.651, 2012, artigo 4º) estabelecido com base na largura do curso hídrico. As classes P2 e P3 mostram uma expansão longitudinal das áreas prioritárias P1 e dos canais de drenagem, e também em largura das áreas úmidas nas MBHs, sugerindo uma relativa predisposição ao acúmulo hídrico nestes locais.

De um total de 166 hectares apontadas como áreas P1, pouco mais de 50% destas áreas estão ocupadas por áreas agrícolas (85 ha) na MBH do Córrego da Consulta, sendo que o restante consiste em vegetação herbácea não cultivada. Para a MBH do Retiro, esse índice passa para 68% de áreas agrícolas na delimitação P1. Este fato pode implicar em consequências indesejadas para a qualidade hídrica destes tributários de destinação de água potável para o abastecimento público, considerando o potencial de entrada de poluentes (p. ex. herbicidas, elementos químicos de adubação e agrotóxicos) e resíduos orgânicos, além de interferir na estruturação da rede dos canais de drenagem e ecossistema ripário, prejudicando a restauração florestal passiva destas áreas.

O total de áreas prioritárias (P1, P2 e P3) somam 457 ha e 447 ha para as MBHs Consulta e Retiro, respectivamente. Se as áreas prioritárias previstas fossem integralmente assertivas, as MBHs Consulta e Retiro, teriam um saldo negativo, respectivamente de 356,5 ha e 375 ha de áreas de importância hidrológica e ambiental que não estariam cobertas pelas APPs (Tabela 16 e Tabela 17; Figura 26). Portanto, estes resultados mostram que os limites estabelecidos na legislação ambiental referente às APPs não são suficientes para garantir cobertura florestal em áreas importantes das MBHs.

Figura 26. Cenários de áreas prioritárias para restauração florestal em relação às Áreas de Preservação Permanente nas microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro.



Por outro lado, parte das áreas prioritárias que extrapolam os limites das APPs poderiam ser destinadas às áreas de Reserva Legal (RL) de propriedades rurais destas microbacias, de acordo com os limites mínimos previstos para o domínio fitogeográfico, propriedades que se inserem integralmente nos limites das MBHs e especificidades da regularização ambiental das propriedades. Não fez parte deste trabalho uma caracterização específica sobre as RLs das propriedades rurais das MBHs, mas é possível verificar que parte de áreas de florestas já são destinadas a RL¹⁹.

As classes prioritárias que se encontram fora das APPs correspondem, respectivamente, a 8,87% e 10,39% nas MBHs. Na MBH Consulta, 300 ha são áreas florestais fora de APPs, ou seja, 7,5% da MBH. Já, a MBH Retiro²⁰, 202 ha, 5,6% da MBH. As áreas prioritárias mapeadas fora das APPs, somadas às áreas de ocupação florestal, correspondem a uma quantidade inferior a proporção de 20% das áreas das respectivas MBHs, mostrando assim a possibilidade de conservação parcial ou integral das áreas indicadas como prioritárias se considerar também as áreas de Reserva Legal neste planejamento e uma

¹⁹ Shape da Reserva Legal do SiCar/ CAR para o município de Bebedouro (SP).

²⁰ Parte das reservas florestais da microbacia Retiro estão concentradas numa Unidade de Conservação (UC) estadual, correspondente a 99 ha, segundo o Instituto Florestal (2017). Estima-se que a UC abrange 50,5 hectares de vegetação florestal consideradas neste trabalho, por meio de uma observação em SIG.

abordagem integrada numa perspectiva de paisagem para a gestão destas microbacias hidrográficas.

De acordo com o descrito na caracterização de uso e ocupação das MBHs (subcapítulo 5.1.3), as áreas de vegetação herbácea não cultivada oferecem indícios de áreas de carácter ripário. Portanto, entende-se que a contemplação destas áreas na representação dos índices topográficos utilizados neste trabalho dá uma ideia da consistência de previsão de umidade dos solos nas microbacias. Na MBH Consulta, 61% destas áreas foram previstas como prioritárias, e na MBH Retiro, 39%. No entanto, em áreas que exerce-se algum tipo de atividade agrícola, se torna difícil a identificação visual de áreas de carácter ripário por meio da visualização da vegetação classificadas por imagens de sensores orbitais, tanto pelas modificações de uso e ocupação, e modificações físicas que podem interferir na dinâmica hidrológica em locais antrópicos, como por exemplo o terraceamento agrícola, construções de estradas, mecanização agrícola, etc. Desta forma, a simulação por meio dos índices topográficos permitiria auxiliar na identificação destas áreas para posteriores constatações de campo.

Tabela 16. Resultado do cruzamento de informações de uso e ocupação dos solos, caracterização morfométrica das áreas úmidas e áreas de preservação permanente (APPs) da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta.

CLASSES MBH CONSULTA	APP 30 m	Em	APP 50 m	Em	Áreas declaradas de Uso consolidado	Em relação	Áreas fora da delimitação legal de APPs	Em	Total da Classe
		relação a área APP		relação a área APP 50 m		a área declaradas consolidadas		relação a área da MBH	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	Área (ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)
Prioritária 1	54,61	30,8%	1,06	11,1%	16,31	40,5%	94,05	2,3%	166,03
Prioritária 2	14,45	8,1%	1,37	14,4%	4,77	11,8%	100,06	2,5%	120,65
Prioritária 3	6,64	3,7%	0,88	9,2%	1,17	2,9%	162,38	4,0%	171,07
Corpos d'água	16,04	9,1%	0,00	0,0%	0,11	0,3%	3,35	0,1%	19,51
Áreas edificadas	13,86	7,8%	0,00	0,0%	0,00	0,0%	299,52	7,5%	313,38
Florestal	37,76	21,3%	3,71	38,9%	5,06	12,6%	122,00	3,0%	168,53
Silvicultura	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%	17,51	0,4%	17,51
Cultivadas	15,44	8,7%	2,12	22,2%	6,14	15,3%	2980,31	74,1%	3004,00
Vegetação herbácea não cultivada	18,47	10,4%	0,41	4,2%	6,71	16,6%	13,75	0,3%	39,33
	177,26	100,0%	9,54	100,0%	40,28	100,0%	3792,92	94,4%	4019,99

Tabela 17. Resultado do cruzamento de informações de uso e ocupação dos solos, caracterização morfométrica das áreas úmidas e áreas de preservação permanente (APPs) da microbacia hidrográfica do Córrego do Retiro.

CLASSES MBH - RETIRO	APP	Em relação a	APP	Em relação a	Áreas	Em relação	Áreas fora da	Em	Total da Classe
	30 m	área APP	50 m	área APP 50 m	de Uso consolidado	a área declaradas consolidadas	delimitação legal de APPs	relação a área da MBH	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)
Prioritária 1	37,94	21,13%	0,3825	5,6%	10,15	37,4%	85,39	2,4%	133,85
Prioritária 2	13,46	7,50%	0,765	11,1%	2,43	8,9%	117,47	3,3%	134,12
Prioritária 3	5,81	3,23%	0,495	7,2%	0,92	3,4%	172,28	4,8%	179,51
Corpos d'água	5,54	3,08%	0,0225	0,3%	0,11	0,4%	1,08	0,0%	6,75
Áreas edificadas	0,05	0,03%	0	0,0%	0,00	0,0%	190,33	5,3%	190,37
Florestal	80,30	44,74%	3,87	56,2%	6,64	24,4%	202,07	5,6%	292,88
Silvicultura	0,00	0,00%	0	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00
Cultivadas	17,35	9,66%	1,0125	14,7%	4,41	16,2%	2611,06	72,3%	2633,83
Vegetação herbácea não cultivada	19,08	10,63%	0,3375	4,9%	2,50	9,2%	16,61	0,5%	38,52
	179,51	100,00%	6,885	100,0%	27,16	100,0%	3396,29	94,1%	3609,83

6. CONCLUSÕES

As microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e Córrego do Retiro, apesar de possuírem área de drenagem relativamente pequena, são responsáveis pelo abastecimento de água de grande parte da população urbana de Bebedouro, SP. Isto impõe a gestão de seu território de forma a evitar a degradação desses mananciais.

O uso de dados espaciais disponíveis, tratados por meio de sistemas de informação geográfica, permitiu a elaboração de um banco de dados geográficos da área de estudo com informações de uso e ocupação dos solos, classes de solo, remanescentes florestais, áreas de preservação permanente (APP), áreas de uso consolidado que, juntamente com o processamento dos modelos digitais de elevação analisados, permitiram identificar as áreas ripárias, as rotas de drenagem preferenciais e áreas de acumulação hídrica nas MBHs

O ITU e os elementos de paisagem permitiram inferir a localização das áreas ripárias, mas foi preciso ponderar a utilização de modelos digitais de elevação com diferentes escalas espaciais. O modelo do SRTM de resolução de 90 m se mostrou mais adequado para a determinação do ITU, pois apresentou consonância de representação em relação aos canais perenes das MBHs de estudo, enquanto que a resolução espacial de 30 m do modelo do ASTER caracterizou os elementos de paisagem com maior detalhamento. O estudo apontou as áreas onde a infiltração de água no solo tende a ser menor e que necessitariam de práticas agrícolas e de restauração que visem aumentar o volume de água armazenado.

Visando uma gestão mais eficiente de MBHs que têm usos prioritários de água, foram estabelecidos três cenários para a restauração com vegetação nativa nas áreas onde existe tendência de maior acumulação de água, considerando as áreas de recomposição florestal obrigatória e as áreas de uso consolidado. Nos três cenários de áreas prioritárias, as APPs não seriam suficientes para a proteção integral de locais de caráter ripário nas microbacias do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro.

Esse estudo pode ser replicado em outras MBHs com características diferentes das estudadas neste trabalho, no sentido de se aprimorar a metodologia que, no caso das MBH do Córrego da Consulta e Córrego do Retiro, se mostrou eficiente para apontar ações de gestão de recursos hídricos em escalas maiores.

REFERÊNCIAS

- ATTANASIO, C. M.; LIMA, W. P.; GANDOLFI, S.; ZAKIA, M. J. B; JÚNIOR, J. C. T. V. **Método para a identificação da zona ripária:** microbacia hidrográfica do Ribeirão São João (Mineiros do Tietê, SP). *Scientia Florestalis*, Campinas, n. 71, p.131-140, 2006.
- BETSON, R. P. **What is watershed runoff?** Journal of Geophysical Research. v. 69, n.8, p. 1541-1552, 1964.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. **A physically based, variable contributing area model of basin hydrology** / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 24, p. 43-69, 1979.
- BIERAS, A. R.; SANTOS, M. J. Z. dos. Condições climáticas e incidência de pragas e doenças na cultura de citros nas principais regiões produtoras do estado de São Paulo. In: GERARDI, L. H. O. (org.). **Ambientes, estudos de Geografia**. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/geografia/pos/downloads/2003/condicoes.pdf>. Acesso em: 29 de agosto de 2016.
- BORSATO, F. H.; MARTONI, A. M. **Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná.** *Acta Scientiarum*. Human and Social Sciences, Maringá, PR, v.26, n.2, p. 273-285, 2004.
- BOSQUILIA, R. W. D.; FIORIO, P. R.; BARROS, P. P. S.; MARTINS, J. A.; DUARTE, S. N. Comparação entre modelos de mapeamento automático de drenagens utilizando SIG. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Foz do Iguaçu: INPE, p. 5872-5879, 2013.
- BRASIL. Código Florestal. **Lei 12651 de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção de vegetação nativa, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acesso em: 20 de jun. 2016.
- BRASIL. **Lei N. 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm. Acesso em: 18 de jun. 2016.
- BUCHANAN, B. P.; FLEMING, M.; SCHNEIDER, R. L.; RICHARDS, B. K., ARCHIBALD, J.; QIU, Z; WALTER, M. T. **Evaluating topographic wetness indices across central New York agricultural landscapes.** *Hydrology and Earth System Sciences*, n.18, p. 3279-3299, 2014.
- CAR – Cadastro Ambiental Rural/ SICAR – Sistema de Cadastro Ambiental Rural – SICAR-SP <<http://www.ambiente.sp.gov.br/sicar/>>. Acesso em: jan. 2017.
- CARDOSO, C. A; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. **Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ.** *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.30, n.2, p. 241-248, 2006.

CARLOS, I. M.; ELIS, V. R.; PRADO, R. L.; PORSANI, J. L. **Métodos geofísicos integrados para a caracterização hidrogeológica dos aquíferos da microbacia Andes, Bebedouro, em São Paulo**. Revista Brasileira de Geociências, v. 42, n.3, p.597-614, 2012.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Bluncher Ltda. e EDUSP, 1974, 149p.

COSTA-CABRAL, M. C.; BURGESS, S. J. **Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas**. Water resources, v. 30, n. 6, p. 1681-1692, 1994.

DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis. In: RAPER, J. F (Ed.) **Three dimensional applications in geographical information systems**. London: Taylor & Francis, 1989. Capítulo 5, p. 51-77.

DROVER, D. R.; JACKSON, C. R.; BITEW, M.; DU, E. **Effects of DEM scale on the spatial distribution of the TOPMODEL topographic wetness index and its correlations to watershed characteristics**. Hydrology Earth System Science, n. 12, p. 11817 -11846, 2015.

ELMORE, W.; BESCHTA, R. L. **Riparian Areas: Perceptions in Management**. Rangelands v. 9, n. 6, p. 260- 265, 1987.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. **Revisão estratigráfica da parte oriental da bacia Bauru (Neocretáceo)**. Revista Brasileira de Geociências, v. 30, n.4, p. 717-728, 2000.

FERRARI, J. L.; SILVA, S. F.; SANTOS, A. R.; GARCIA, R. F. **Análise morfométrica da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre, ES**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife, v.8, n.2, p.181-188, 2013.

FREEMAN, T. G. **Calculation catchment area with divergent flow based on a regular grid**. Computers and Geosciences, v. 17, n. 3, p. 413-422, 1991.

GREGORY, S. V.; SWANSON, F. J.; McKEE, A. W.; CUMMINS, K. W. **An Ecosystem Perspective of Riparian Zones: Focus on links between land and water**. BioScience, Washington, v. 41, n. 8, p. 540-550, 1991.

GRUBER, S.; PECKHAM, S. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (Ed.), **Geomorphometry: Concepts, Software, Application**. Amsterdam: Elsevier, Developments in Soil Science, 2009, Capítulo 7, p.171-194.

HALL, G. F.; OLSON, C. G. Predicting variability of soils from landscape models. In: MAUSBACH, M. J. (Org.). **Spatial variabilities of soils and landforms**. Madison: Soil Science Society of America, 1991, p 9-24.

HAMILTON, L. S.; DUDLEY, N.; GREMINGER, G.; HASSAN, N.; LAMB, D.; STOLTON, S.; TOGNETTI, S. **Forest and water: A thematic study in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005**. Roma: FAO Forestry Paper, n 155, 2008.

HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A. R. Factors affecting the response of small watershed to precipitation in humid areas. In: Sopper, W. E.; Lull, H. W. (Eds.), **Forest Hidrology**. New York: Pergamon Press, 275 -290. Disponível em: <http://soilandwater.bee.cornell.edu/research/VSA/papers/HewlettHibbert67.pdf>. Acesso em: nov. 2015.

HORTON, R. E. **Drainage basin characteristics**. Transactions American Geophysical Union, p. 446-460, 1932.

HORTON, R. E. **Erosional development of streams and their drainage basin-hydrophysical approach to quantitative morphology**. Geological Society of America Bulletin, v. 56, p. 275-370, 1945.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades. Informações complementares. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=350610&search=||infoogr%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas>. Acesso em: jul. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/cartas>. Acesso em: 15 jul. 2016.

IVANAUSKAS, N. M.; RODRIGUES, R. R.; NAVE, A. G. **Aspectos ecológicos de uma mata de brejo em Itatinga, SP: Florística, Fitossociologia e seletividade de espécies**. Revista Brasileira de Botânica, São Paulo, v.20, n.2, p.139-153, 1997.

IWAHASHI, J.; PIKE, R. J. **Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature**. Geomorphometry, v.86, p. 409-440, 2007.

KUNTSCHIK, D. P., EDUARTE, M.; UEHARA, T. H. K. **Matas Ciliares**. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo: SMA- Secretária do Meio Ambiente, Coordenadoria de Biodiversidade e Recursos Naturais, nº 7, 2010, 84 p.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. **The measurement of observer agreement for categorical data**. Biometrics, v. 33, p. 159-174, 1977.

LAPIG – LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO. Mapa interativo. Camada de **Áreas Remanescentes da Mata Atlântica**. [2016a]. Disponível em < <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>>. Acesso em: nov. 2016.

LAPIG – LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO. Mapa interativo. Camada de **Áreas Remanescentes do Cerrado**. [2016b]. Disponível em < <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>>. Acesso em: nov. 2016.

LAPIG – LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO. Mapa interativo. Camada de **Chuvas do Brasil**. [2016c]. Disponível em <<http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>> Acesso em nov. 2016 e mar. 2017.

LEE, S.; WOLBERG, G., SHIN, S. Y. **Scattered data interpolation with Multilevel B-Splines**. IEEE Transactions on visualization and computer graphics, v. 3, n.3, p. 228- 244, 1997.

LEITÃO-FILHO, H. F. **Aspectos taxonômicos das florestas do Estado de São Paulo**. In: Congresso Nacional de essências nativas, 16., 1982, Campos do Jordão, 1982. p. 197-206.

LEPSCH, I. F.; BELLINAZZI, R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. **Manual para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso**. 5ª Aproximação. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1991, 175p.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicado ao manejo de bacias hidrográficas**. 2ª edição. Piracicaba: ESALQ/ USP, 2008. 245p.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. **Hidrologia de Matas Ciliares. Piracicaba (SP)**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF. Disponível em: <http://www.ipef.br/hidrologia/mataciliar.asp>. Acesso em: jun. 2015.

LINDMAN, C. A. M; FERRY, M. G. **A vegetação do Rio Grande do Sul**. São Paulo: EDUSP/ Livraria Itatiaia, 1974.

LOWRENCE, R. Riparian zone effects on water quality. In.: Georgia Water Resources Conference, 1989, Georgia: University of Georgia. Disponível em: <http://www.gwri.gatech.edu/sites/default/files/files/docs/1989/LowranceR-89.pdf>. Acesso em: nov. 2016.

LUGO, A. E.; BRINSON, M. M.; BROWN, S. Synthesis and Search for paradigms in wetland ecology. In: **Ecosystems of the World 15**. Forested wetlands, Amsterdam: Elsevier, 2009. Capítulo 19, p. 447-460.

MAYER, P.; REYNOLDS Jr., S. K.; CANFIELD, T. J. **Riparian buffer width, vegetative cover, and nitrogen removal effectiveness: A review of current Science and regulations**. Environmental Protection Agency – EPA, Oklahoma, 2005. 28p.

MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (E.). **Geomorphometry: Concepts, Software, Application**. Amsterdam: Elsevier, Developments in Soil Science, 2009. Capítulo 9, p. 227-254.

MINELLA, J. P. G; MERTEN, G. H. **Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental**. Ciência Rural, Santa Maria (RS), v.42, n.9, p. 1575-1582, 2012.

MOORE, I. D.; BURCH. G. J.; MACKENZIE, D. H. **Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies**. Transactions of the ASAE, v.31, p. 1098-1107, 1988.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. **Digital terrain modeling: A review of hidrological, geomorfological, and biological application**. Hydrological Processes, v. 5, p. 3-30, 1991.

NAIMAN, R. J.; DÉCAMPS, H.; McCLAIN, M. E. **Riparia**. Ecology, Conservation, and Management of Streamside Communities. San Diego: Elsevier, Academic Press. 2005. 430 p.

NARENDRA, K.; NAGESWARARAO, K. **Morphometry of the Meghadrigedda watershed, Visakhapatnam District, Andhra Pradesh using GIS and resources at data**. Photonirvachak, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, v. 34, n. 2, p. 101- 100, 2006.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. **The extraction of drainage networks from digital elevation data**. Computer vision, graphics, and image processing, n.28, p. 323- 344, 1984.

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M. & CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas, Instituto Agrônômico/EMBRAPA Solos. Campinas. 1999. 64p. Inclui mapas.

PEIXOTO; C. A. B. Geodiversidade do estado de São Paulo. Carlos Augusto Brasil Peixoto (Org.). São Paulo: CPRM, 2010, 176p. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html>. Acesso em: jul. 2016.

PENNOCK, D. J.; ZEBARTH, B. J.; De JONG, E. **Landform classification and soil distribution hummocky terrain, Saskatchewan, Canada**. Geoderma, v.40, p. 297- 315, 1987.

PENNOCK, D. J. **Terrain attributes, landforms segmentation, and soil redistribution**. Soil e Tillage Research, v.69, p.15-26, 2003.

PETERJOHN, W. T.; CORRELL, D. L. **Nutrient dynamics in a agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest**. Ecological Society of America, v.65, n.5, p. 1466-1475, 1984.

PINAY, G. DECAMPS, H. **The role of riparian woods in regulating nitrogen fluxes between the alluvial aquifer and surface water: A conceptual model**. Regulated rivers: Research and Management, v. 2, p. 507- 516, 1988.

PINTO, J. R. R.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. **Perfil florístico e estrutura da comunidade arbórea de uma floresta de vale no Parque Nacional da chapada dos Guimarães, Mato Grosso, Brasil**. Brazilian Journal of Botany, São Paulo, v.22, 1999.

PLANCHON, O.; DARBOUX, F. **A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models**. Catena, v. 46, p. 159-176, 2001.

QIN, C. Z.; ZHU, A. X.; PEI, T.; LI, B-L.; SCHOLTEN, T.; BEHRENS, T.; ZHOU, C-H. **An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient**. Precision Agriculture, v.12, p.32-43, 2011.

QUINN. P. F. **The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models**. Hydrological processes, v. 5, p. 59-79, 1991.

QUINN, P. F.; BEVEN, K. J.; LAMB, R. **The $\ln(\alpha/\tan\beta)$ index**: How to calculate it and how to use it within the Topmodel framework. *Hydrological Processes*, Lancaster, v. 9, p. 161- 182, 1995.

RANALLI, A. J.; MACALADY, D. L. **The importance of riparian zone and in-stream processes in nitrate attenuation in undisturbed and agricultural watersheds – A review of the scientific literature**. *Journal of Hydrology*, n.389, p.406 - 415, 2010.

REICHARDT, K. **Processos de Transferência no Sistema Solo-planta-atmosfera**. 4ª.ed. revisada e ampliada. Campinas: Fundação Cargil, 1985, 466 p.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomia do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de. **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina (DF): Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária – Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados – CPAC, 1998, p. 89 -166.

RUHE, R. V. **Elements of the soil landscape**. Transactions of the 7Th Congress of the International Society of soil Science, v.4. International Soil Science Society, Madison, 1960, p. 165- 170.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de classificação dos Solos**. 4ªed. Revisada e ampliada. Brasília (DF): Embrapa, 2014, 353 p.

SAULNIER, G-M.; BEVEN, K.; OBLED, C. **Digital elevation analysis for distributed hydrological modeling**: Reducing scale dependence in effective hydraulic conductivity values. *Water Resources Research*, v. 33, n.9, p. 2097-2101. 1997.

SEIBERT, J.; McGLYNN, B. L. **A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation model**. *Water Resources Research*, v. 43, 2007.

SHARY, P. A. **Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures**. *Mathematical Geology*, v. 27, n.3, p. 373 -390, 1995.

SILVA, E. R.; DELGADO, R. C.; SOUZA, L. P.; SILVA, I. S. **Caracterização física em duas microbacias hidrográficas do Alto Juruá, Acre**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v.18, n.7, p.714-719, 2014.

SILVA, R. V.; KOBIYAMA, M. **Topmodel**: Teoria integrada e revisão. *Ra'e Ga – O espaço geográfico em análise*, Curitiba, n.14, p. 97-110, 2007.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2ªed. Porto Alegre (RS): Editora da Universidade: ABRH, 1997.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MANTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. **Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos**. *Scientia Agraria*, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 317-329, 2008.

SETZER, J. **Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo**. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai, 1966, 61p.

STANFORD, J. A. Landscape and Riverscape. In: HAUER, F; LAMBERTI, G (E.). **Methods in stream ecology**. 2ªed. Elsevier, 2007. Capítulo 1, p.3-22.

STRAHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. Transactions American Geophysical Union, v.38, n.6, p. 913-920, 1957.

SØRENSEN, R.; ZINKO, U.; SEIBERT, J. **On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of the different methods based on field observation**. Hydrology and Earth System Sciences, v.10, p. 101-112, 2006.

SØRENSEN, R.; SEIBERT, J. **Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components**. Journal of Hydrology, v.347, p. 79-89, 2007.

TABACCHI, E.; LAMBS, L.; GUILLOY, H.; PLANTY-TABACCHI; A.M.; MULLER, E.; DECAMP, H. **Impacts of riparian vegetation on hydrological process**. Hydrological Processes, v. 14. n.16-17, p. 2959-2976, 2000.

TAGIL, S.; JENNESS, J. **GIS-Based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey**. Journal of Applied Sciences, v.8, n.6, p. 910-921, 2008.

TARBOTON, D. G. **A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models**. Water Research, v. 33, n.2, p. 309-319, 1997.

THOMPSON, J. A.; BELL, J. C.; BUTLER, C. A. **Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling**. Geoderma, v.100, p. 67-89, 2001.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. **As mudanças da cobertura vegetal no escoamento: Revisão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre (RS), v. 2. n.1, p.135-152, 1997.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. M. **Impactos potenciais das alterações do Código Florestal nos recursos hídricos**. Biota Neotropica, São Carlos, v.10, n.4, p. 67-76, 2010.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION - UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a sustainable world**. Paris, 2015. 121p.

WALTER, M. T.; WALTER, M. F.; BROOKS, E. S.; STEENHUIS, T. S.; BOLL, J. WEILER, K. **Hydrological Sensitive Areas: Variable Source Area Hydrology – Implications for Water Quality Risk Assessment**. Journal of Soil and Water Conservation, v.3, p.277-284, 2000.

WILSON, J. P. e GALLANT, J. C. Digital Terrain Analysis. In: _____ (E.). **Terrain analysis: principles and applications**. John Wiley & Sons, 2000. Capítulo 1, p. 1-28.

WOLOCK, D. M.; PRICE, C. V. **Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography based watershed model.** Water Resources Research, v. 30, n.11, p.3041-3052, 1994.

WOLOCK, D. M.; McCABE, G. J. **Differences in topographic characteristics computed from 100- and 1000-m resolution digital elevation model data.** Hydrological Processes, v.14, p. 987-1002, 2000.

ZAKIA, M. J. B. **Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental:** implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de floresta. 1998. 99 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

ZAKIA, M. J. B.; FERRAZ, F. F. B; RIGHETO, A. M; LIMA, W. P. **Delimitação da zona ripária em uma microbacia.** Revista Agrogeoambiental, p.51-61, 2009.

ZEVENBERGEN, L.; THORNE, C. R. **Quantitative analysis of land surface topography.** Earth surface process and landforms, v. 12, p.47-56, 1987.

ZINKO, U.; SEIBERT, J.; DYNESIUS, M.; NILSSON, C. **Plant species numbers predicted by a topography-based groundwater flow index.** Ecosystems, v.8, p 430-441, 2005.

APÊNDICES

Apêndice A- Dados da série temporal de 17 anos de chuvas para a região de Bebedouro (SP) obtidas a partir de imagens de satélite de resolução 3000 m.

Ano de referência	Prec. total (mm)	Prec. Min./ ano (mm)	Mês de Mín.	Prec. Máx./ano (mm)	Mês de Máx.	Precipitação para o período seco anual (mês 4 ao mês 9 do mesmo ano) (mm)	Relação Período seco/ Prec. total (%)	Média para o período seco (mm)	Precipitação para o período chuvoso anual (mês10 ao mês 3) (mm)	Ref. Período chuvoso	Relação Período Chuvoso/Precipitação (%)**	Média mensal para o período
1999	1408	0	Junho	294	Dezembro	87	6,18%	14,5	1577	1999-2000	94,77%	262,83
2000	1529	3	Junho	349	Janeiro	199	13,02%	33,17	923	2000-2001	82,26%	153,83
2001	1317	0	Junho	285	Dezembro	222	16,86%	37	1426	2001-2002	86,53%	237,67
2002	1427	0	Junho	329	Janeiro	160	11,21%	26,67	1379	2002-2003	89,60%	229,83
2003	1505	5	Junho	504	Janeiro	217	14,42%	36,17	1118	2003 – 2004	83,75%	206
2004	1620	1	Agosto	326	Fevereiro	367	22,65%	61,17	1236	2004-2005	77,11%	172,67
2005	1527	0	Agosto	409	Janeiro	291	19,06%	48,5	1036	2005-2006	78,07%	261
2006	1590	5	Abril	324	Novembro	305	19,18%	50,83	1566	2006-2007	83,70%	174
2007	1394	0	Agosto	443	Janeiro	232	16,64%	38,67	1044	2007-2008	81,82%	201,17
2008	1495	0	Julho	305	Janeiro	117	9,00%	19,5	1207	2008-2009	91,16%	217,17
2009	1754	35	Julho	397	Dezembro	400	22,81%	66,67	1303	2009-2010	76,51%	231
2010	1255	0	Agosto	284	Janeiro	126	10,04%	21	1386	2010-2011	91,67%	186,67
2011	1715	0	Julho	389	Março	199	11,60%	33,17	1120	2011-2012	84,91%	193,33
2012	1332	0	Agosto	275	Janeiro	385	28,90%	64,17	1160	2012-2013	75,08%	162,83
2013	1728	1	Agosto	296	Dezembro	401	23,21%	66,83	977	2013-2014	70,90%	162,83
2014	987	0	Agosto	243	Novembro	177	17,93%	29,5	952	2014 – 2015	84,32%	158,67
2015	1288	3	Agosto	210	Dezembro	322	25,00%	53,67	1073	2015 – 2016	76,92%	178,83
2016*												

* Obtidos dados parciais

Fonte: LapiG. Imagens de satélite 3000 m

** Relação de chuvas do período chuvoso compreendido entre os dois anos (anterior/ seguinte) pela estação seca anual (anterior) + período chuvoso (anterior/ seguinte)

Apêndice B- Percentil dos valores do Índice Topográfico de umidade (\ln^*ac/B) das Microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e Córrego do Retiro.

MBH Consulta		MBH Retiro	
Percentil (%)	Valor do ITU	Percentil (%)	Valor do ITU
1	9,41	1	9,26
5	9,87	5	9,92
10	10,09	10	10,17
20	10,36	20	10,46
25 (1ºQuartil)	10,47	25 (1ºQuartil)	10,58
30	10,57	30	10,68
40	10,77	40	10,89
50 (mediana)	10,98	50 (mediana)	11,01
60	11,21	60	11,33
70	11,5	70	11,62
75 (3º Quartil)	11,68	75 (3º Quartil)	11,8
80	11,9	80	12,03
90	12,64	90	12,78
95	13,69	95	13,82
99	19,69	99	19,49

Apêndice C- Classes de frequência do ITU para a Microbacia do Córrego da Consulta. Valores em negrito apresentaram frequência relativa maior que 1% em relação ao total de amostras.

Classes	LIMITE inf.	LIMITE sup.	Fa (pixel)	Fi%
1	7,7511	8,6558	78	0,04%
2	8,6558	9,5604	3073	1,72%
3	9,5604	10,4650	40635	22,74%
4	10,4650	11,3696	74042	41,43%
5	11,3696	12,2742	35915	20,10%
6	12,2742	13,1789	12913	7,23%
7	13,1789	14,0835	4461	2,50%
8	14,0835	14,9881	1799	1,01%
9	14,9881	15,8927	1115	0,62%
10	15,8927	16,7974	856	0,48%
11	16,7974	17,7020	790	0,44%
12	17,7020	18,6066	584	0,33%
13	18,6066	19,5112	550	0,31%
14	19,5112	20,4158	491	0,27%
15	20,4158	21,3205	504	0,28%
16	21,3205	22,2251	394	0,22%
17	22,2251	23,1297	352	0,20%
18	23,1297	24,343	164	0,09%
			178.716	100,00%

Apêndice D- Classes de frequência para a Microbacia Retiro. Valores em negrito apresentaram frequência relativa maior que 1% em relação ao total de amostras.

Classes	LIMITE inf.	LIMITE sup.	Fa (pixel)	Fi%
1	7,6428	8,5555	171	0,11%
2	8,5555	9,4681	2533	1,58%
3	9,4681	10,3807	24155	15,05%
4	10,3807	11,2934	66866	41,67%
5	11,2934	12,2060	39775	24,78%
6	12,2060	13,1186	14652	9,13%
7	13,1186	14,0313	4974	3,10%
8	14,0313	14,9439	1877	1,17%
9	14,9439	15,8565	1195	0,74%
10	15,8565	16,7692	762	0,47%
11	16,7692	17,6818	803	0,50%
12	17,6818	18,5944	597	0,37%
13	18,5944	19,5071	524	0,33%
14	19,5071	20,4197	483	0,30%
15	20,4197	21,3323	532	0,33%
16	21,3323	22,2449	323	0,20%
17	22,2449	23,1576	155	0,10%
18	23,1576	24,2302	106	0,07%
			160.483	100,00%

Apêndice E- Representatividade em hectares das sete classes do Índice Topográfico de Umidade nas microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro.

Microbacia hidrográfica do Consulta			Microbacia hidrográfica do Retiro		
Classes ITU	Área (ha)	(%)	Classes ITU	Área (ha)	(%)
1	70,7625	1,76%	1	74,25	2,06%
2	923,4675	22,97%	2	659,3625	18,26%
3	1657,1025	41,21%	3	1488,8025	41,24%
4	805,3875	20,03%	4	816,7275	22,62%
5	292,8375	7,28%	5	306,09	8,48%
6	99,945	2,49%	6	102,735	2,85%
7	171,18	4,26%	7	162,5175	4,50%
Área MBH	4020,6825	100%	Área MBH	3610,485	100%
ITU> Média	563,96	14%	ITU> Média	571,34	16,81%

Apêndice F- Formas dos elementos de paisagem das microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, elaborado por meio de imagens MDE-90

Forma dos elementos de paisagem		Área (m ²)	Área (ha)	(%)
Microbacia Consulta				
Classe 1	OMC	11925	1,1925	0,03%
Classe 2	OMD	10125	1,0125	0,03%
Classe 3	OM	5582925	558,2925	13,92%
Classe 4	SCC	25875	2,5875	0,06%
Classe 5	SCD	19125	1,9125	0,05%
Classe 6	SC	19934550	1993,455	49,70%
Classe 7	P	8681400	868,14	21,65%
Classe 8	MESC	0	0	0,00%
Classe 9	MESD	0	0	0,00%
Classe 10	MÊS	5834025	583,4025	14,55%
Classe 11	MEIC	0	0	0,00%
Classe 12	MEID	0	0	0,00%
Classe 13	MEI	5850	0,585	0,01%
		40105800	4010,58	100,00%
Microbacia Retiro				
Classe 1	OMC	9675	0,9675	0,03%
Classe 2	OMD	7200	0,72	0,02%
Classe 3	OM	4468725	446,8725	12,41%
Classe 4	SCC	24075	2,4075	0,07%
Classe 5	SCD	20250	2,025	0,06%
Classe 6	SC	17975025	1797,5025	49,92%
Classe 7	P	8707275	870,7275	24,18%
Classe 8	MESC	0	0	0,00%
Classe 9	MESD	0	0	0,00%
Classe 10	MÊS	4786200	478,62	13,29%
Classe 11	MEIC	0	0	0,00%
Classe 12	MEID	0	0	0,00%
Classe 13	MEI	8325	0,8325	0,02%
		36006750	3600,675	100,00%

Apêndice G- Formas dos elementos de paisagem da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, elaborado por meio do MDE-30

Forma dos elementos de paisagem		Área (m ²)	Área (ha)	(%)
Microbacia Consulta				
Classe 1	OMC	39825	3,9825	0,10%
Classe 2	OMD	197550	19,755	0,49%
Classe 3	OM	8037900	803,79	19,99%
Classe 4	SCC	48825	4,8825	0,12%
Classe 5	SCD	31275	3,1275	0,08%
Classe 6	SC	8579475	857,9475	21,34%
Classe 7	P	8878950	887,895	22,09%
Classe 8	MESC	450	0,045	0,00%
Classe 9	MESD	675	0,0675	0,00%
Classe 10	MÊS	12643650	1264,365	31,45%
Classe 11	MEIC	0	0	0,00%
Classe 12	MEID	0	0	0,00%
Classe 13	MEI	1741275	174,1275	4,33%
		40199850	4019,985	100,00%
Microbacia Retiro				
Classe 1	OMC	41850	4,185	0,12%
Classe 2	OMD	213525	21,3525	0,59%
Classe 3	OM	7802100	780,21	21,61%
Classe 4	SCC	60075	6,0075	0,17%
Classe 5	SCD	36450	3,645	0,10%
Classe 6	SC	8851275	885,1275	24,52%
Classe 7	P	7247475	724,7475	20,08%
Classe 8	MESC	225	0,0225	0,00%
Classe 9	MESD	1575	0,1575	0,00%
Classe 10	MÊS	10057725	1005,7725	27,86%
Classe 11	MEIC	0	0	0,00%
Classe 12	MEID	0	0	0,00%
Classe 13	MEI	1786050	178,605	4,95%
		36098325	3609,8325	100,00%

Apêndice H- Classificação das Formas dos elementos de paisagem (FEP) para as microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta e microbacia do Córrego do Retiro (MDE-30).

Classe	FEP	Área (ha)	(%)
MBH Consulta			
1	OM	827,57	20,58%
2	SC	865,96	21,54%
3	P	716,67	17,83%
4	MES	1264,59	31,45%
5	MEI	174,13	4,33%
6	SA	171,40	4,26%
Total		4020,3225	100%
MBH Retiro			
1	OM	805,88	22,32%
2	SC	894,80	24,78%
3	P	599,4	16,60%
4	MES	1006,18	27,87%
5	MEI	178,61	4,95%
6	SA	125,39	3,47%
Total		3610,26	100%

Apêndice I- Classes de declividade para a microbacia do Consulta e do Retiro, obtido pelo índice de declividade do MDE-90.

Classe	Classificação	Área	
		ha	Fi (%)
MBH Consulta			
Classe 1: 0 – 3%	Plano	514,86	12,80%
Classe 2: 3 – 6%	Suave ondulado	1825,11	45,38%
Classe 3: 6 – 12%	Moderadamente ondulado	1649,37	41,01%
Classe 4: 12 – 20%	Ondulado	32,68	0,81%
Classe 5: 20 – 40%	Forte ondulado	0	0,00%
Total		4022,02	100%
MBH Retiro			
Classe 1: 0 – 3%	Plano	503,45	13,91%
Classe 2: 3 – 6%	Suave ondulado	1809,54	50,00%
Classe 3: 6 – 12%	Moderadamente ondulado	1279,69	35,36%
Classe 4: 12 – 20%	Ondulado	25,39	0,70%
Classe 5: 20 – 40%	Forte ondulado	0,94	0,03%
Total		3619,01	100%

Apêndice J- Classificação das Forma dos elementos de paisagem em relação ao Índice Topográfico de Umidade da microbacia hidrográfica do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro – Álgebra de mapas do Índice Topográfico de Umidade e elementos de paisagem (ITU/FEP)

Elemento	Área (ha)	(%)	Elemento	Área (ha)	(%)	Elemento	Área (ha)	(%)
Microbacia hidrográfica do Consulta								
SA/ ITU max	71,17	41,13	MES/ ITU med	32,54	31,44	MES/ ITU min	90,27	29,64
SC/ ITU max	34,13	19,73	SC/ ITU med	23,04	22,27	SC/ ITU min	73,15	24,02
MES/ ITU max	25,81	14,92	P/ ITU med	20,88	20,18	P/ ITU min	62,01	20,36
P/ ITU max	23,67	13,68	OM/ ITU med	17,19	16,61	OM/ ITU min	52,16	17,13
OM/ITU max	14,87	8,60	SA/ ITU med	7,45	7,20	SA/ ITU min	17,26	5,67
MEI/ ITU max	3,38	1,95	MEI/ ITU med	2,39	2,30	MEI/ ITU min	9,68	3,18
	173,03	100		103,48	100		304,52	100
Microbacia hidrográfica do Retiro								
SC/ ITU max	44,64	26,97	SC/ ITU med	30,96	28,40	MES/ ITU min	87,26	26,89
SA/ ITU max	44,15	26,68	MES/ ITU med	25,85	23,72	SC/ ITU min	85,23	26,27
MES/ ITU max	27,02	16,33	P/ ITU med	23,9	21,92	OM/ ITU min	64,01	19,73
P/ ITU max	22,84	13,80	OM/ ITU med	19,01	17,44	P/ ITU min	59,4	18,31
OM/ITU max	22,23	13,43	SA/ ITU med	4,95	4,54	MEI/ ITU min	14,42	4,44
MEI/ ITU max	4,61	2,79	MEI/ ITU med	4,34	3,98	SA/ ITU min	14,15	4,36
	165,49	100		109,01	100		324,47	100