



Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Humanas
Departamento de Geografia
Programa de Pós-Graduação em Geografia

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**IDENTIFICAÇÃO DE CANAL NATURAL DE ESCOAMENTO
SUPERFICIAL POR ANÁLISE MORFOMÉTRICA NA UNIDADE
HIDROGRÁFICA DO PIPIRIPAU - DF**

Tatiane Eugênia Rezende Correia

Dissertação de Mestrado

Brasília-DF:junho/2016.



Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Humanas
Departamento de Geografia
Programa de Pós-Graduação em Geografia

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**IDENTIFICAÇÃO DE CANAL NATURAL DE ESCOAMENTO
SUPERFICIAL POR ANÁLISE MORFOMÉTRICA NA UNIDADE
HIDROGRÁFICA DO PIPIRIPAU - DF**

Tatiane Eugênia Rezende Correia

Orientador: Dr. Éder de Souza Martins

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

Dissertação de Mestrado

Brasília-DF:junho/2016.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DEPARTAMENTODE GEOGRAFIA

**IDENTIFICAÇÃO DE CANAL NATURAL DE ESCOAMENTO
SUPERFICIAL POR ANÁLISE MORFOMÉTRICA NA UNIDADE
HIDROGRÁFICA DO PIPIRIPAU - DF**

Tatiane Eugênia Rezende Correia

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, linha de pesquisa Geoprocessamento.

Aprovado por:

Dr. Éder de Souza Martins (Embrapa Cerrados)
(Orientador)

Osmar Abílio de Carvalho Junior (UnB)
(Examinador Interno)

Raúl Sánchez Vicens(UFF)
Examinador Externo

Brasília-DF, 06 de junho de 2016.

CORREIA, TATIANE EUGÊNIA REZENDE

Identificação de Canal Natural de Escoamento Superficial por Análise Morfométrica na Unidade Hidrográfica do Pípiripau - DF, 83p, 297 mm, (UnB-GEA, Mestre em Gestão Ambiental e Territorial, 2016).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia.

1. Morfometria

2. Índice Topográfico

3. Geoambientes

4. SIG

I. UnB-IH-GEA

II.

É concebido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Tatiane Eugênia Rezende Correia

DEDICATÓRIA

*Dedico todo o meu trabalho a meus pais,
João Eustáquio e Tereza Eugênia,
pelo incentivo e apoio em todas as minhas escolhas e decisões.*

AGRADECIMENTOS

Após este percurso é difícil agradecer a todas as pessoas que fizeram parte desta conquista. Por isso peço perdão aos que equivocadamente não forem citados diretamente, mas que de alguma forma merecem minha consideração.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a meus pais, João Eustáquio Correia e Tereza Eugênia Rezende Correia, pelo apoio sempre prestado e pela compreensão nos momentos ausentes.

Ao meu marido, Bruno Toniolo Lorensi, pela paciência, amparo e compreensão em toda jornada.

Ao meu irmão, Diógenes Eustáquio Rezende Correia, pelo incentivo, inspiração e auxílio.

A minha cunhada, Beatriz Toniolo Lorensi, pela assistência prestada e disponibilidade.

Ao meu orientador, Eder de Souza Martins, pela serenidade nos momentos de angústia, pela paciência nos momentos de ansiedade e pela prontidão em instruir.

Ao orientador Roberto Arnaldo Trancoso Gomes, pelo apoio técnico e pessoal. Apesar da distância sempre buscou me orientar da forma correta e abrandar minhas expectativas, atributos de um Sensei.

Aos meus familiares e amigos, que formam um grande grupo que incentivou minha caminhada, pelas orações, pela força, por ter compreendido minha ausência e pela crença de que eu seria capaz: Alisson Neves; Amanda Porto; Ana Gabriela; Cirineu Lorensi; Clarine Corrêa; Daniel Vieira; Dilberto Batista; Edmar Pessoa; Elisa Lorensi; Erica Gurgel; Fernanda Zanini; Fernando Costa; Hely Toniolo; José Flávio; Juliana Freitas; Marcia Pessoa; Marcos Cristino; Nayara Pessoa; Patrícia Gomes; Rafael Barbosa; Sabrina Pessoa; Stephane Paula. Em especial ao Mestre Natanael Antunes Abade que me instigou a alcançar meus objetivos e que por várias vezes me auxiliou de forma substancial.

Aos Professores Dr. Osmar Abílio de Carvalho Junior e Dr. Renato F. Guimarães pela lucidez com que conduziram minha banca de qualificação, com suas inestimáveis contribuições.

A UnB e a todos os docentes que fizeram parte da minha formação acadêmica.

RESUMO

A identificação de porções da paisagem compropensão à saturação e ao escoamento superficial é fundamental, pois são ambientes que propiciam o transporte de poluentes e detritos, bem como podem ser áreas de risco à erosão. A avaliação geoambiental e de parâmetros morfométricos em modelos digitais de terreno permitem definir com precisão ambientes sensíveis na paisagem, assim como, constitui uma estratégia que pode ser automatizada exigindo poucos insumos, recursos e tempo para sua aplicação. O objetivo do presente trabalho foi diferenciar canais efêmeros, intermitentes e perenes por análise morfométrica. Foram utilizados a análise geoambiental, o Índice Topográfico (IT) e o modelo limiar de escoamento superficial para distinguir os canais quanto a sua perenidade. Foram realizadas vistorias *in loco* na Unidade Hidrográfica (UH) do Pípiripau-DF para a diferenciação dos canais constituindo a verdade de campo, bem como foram avaliadas as características geomorfológicas, de uso, ocupação e cobertura vegetal da área na atualidade e em 1967. Pelas análises, foi possível identificar os geoambientes mais propensos a ocorrência de canal natural de escoamento superficial (efêmero), e que a relação área de contribuição e declividade permite a diferenciação de canais quanto a sua perenidade. A aplicação de modelos como o IT e limiar de escoamento, comparados a realidade de campo, indicaram um limiar de 11 no caso do IT e 225 para o modelo de limiar de escoamento para a diferenciação de canais perenes e intermitentes de canais efêmeros. Considerando a similaridade das características dos geoambientes no grupo geológico do Paranoá, entende-se ser possível aplicar os limiares encontrados para a diferenciação de canais em 65% do DF e contribuir na definição de áreas protegidas, assim como, possibilita a identificação de áreas hidrologicamente sensíveis na paisagem que necessitam de proteção para a gestão dos recursos hídricos no território. O estudo da paisagem como visto aqui, além de fornecer subsídio à análise de vertentes, pode auxiliarem trabalhos futuros, na identificação de campos de murundus e veredas, bem como na discussão a respeito do tamanho adequado das áreas de preservação permanente. Serve ainda de subsídio para a definição de áreas propícias à Reserva Legal, com o intuito de proteger áreas de contribuição e hidrologicamente sensíveis em bacias hidrográficas.

Palavras Chave: Morfometria; Geoambientes; Índice Topográfico

ABSTRACT

The identification of landscape portions prone to saturation and surface runoff is critical since those provide the transport of pollutants and debris and may be erosion risk areas. The geo-environmental and morphometric parameters evaluation in digital terrain models allows the precise definition of sensitive environments in the landscape. In addition, this strategy requiring few inputs, resources, and time for automated application. The main goal of this study was to distinguish ephemeral, intermittent and perennial waterways using morphometric analysis. In order to achieve this goal, some methods were used such as the geo-environmental analysis, the Topographic Index (IT) and the threshold model flow to distinguish the waterways for its continuity. Inspections were carried out *in situ* in the Hydrographic Unit (UH) of Pípiripau in Brazilian Federal District (DF) for the differentiation of waterways establishing this work's ground truth. Data collected in 1967 and by the time of this project were evaluated for its geomorphological characteristics of use and occupation and the area vegetation. The analysis of this study enabled to identify Geoenvironments where is most likely to occur gullies and also concluded that the relation between the contribution area and slope allowed to classify the waterways by its continuity. The use of the models showed a threshold of 11 by using IT and 225 by using the threshold model flow to distinguish the waterways for its continuity. Considering the similarities of the Geoenvironments characteristics in geological Paranoá Group one can conclude the applicability the thresholds results to distinguish 65% of waterways in DF and also to identify areas that should be protected. The results also enabled the identification in the landscape of hydrologically sensitive areas in need for protection, contributing for the territory water resources management. This landscape study can provide assistance for further studies in identifying termite mounds fields and for the discussion on the appropriate size of permanent preservation areas. In addition, it is an instrument on the definition of areas prone to legal reserve, in order to protect areas of contribution and hydrologically sensitive in watersheds.

Keywords: morphometry; Geoenvironments; topographic index

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE EQUAÇÕES

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 MECANISMOS DE GERAÇÃO DE ESCOAMENTO	4
2.2 LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA	7
2.3 GEOMORFOMETRIA	8
2.3.1 Modelo Digital do Terreno	9
2.3.2 Direção de Fluxo e Área de contribuição	13
2.3.3 Análises Topográficas	16
2.4 GEOAMBIENTES	21
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	25
4. METODOLOGIA	29
4.1 VISTORIAS	29
4.2 MDT HIDROLOGICAMENTE CORRIGIDO	29
4.3 GEOAMBIENTES	30
4.4 MODELAGEM DE PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS	30
4.4.1 Declividade	30
4.4.2 Direção de Fluxo e Área de contribuição	31
4.4.3 Modelos Topográficos	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 VISTORIAS	32
5.2 MDT HIDROLOGICAMENTE CORRIGIDO	33
5.3 PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS	34

5.4	GEOAMBIENTES	36
5.5	MODELAGEM DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS	42
5.5.1	Limiar de escoamento	42
5.5.2	Índice Topográfico	49
5.6	ANÁLISE DE ACURÁCIA	54
5.6.1	Limiar de Escoamento	54
5.6.2	Índice Topográfico	55
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 Principais mecanismos de geração de escoamento (Modificado de: BEVEN, 1986)	4
Figura 2. 2 Principais condicionantes no processo de escoamento (Modificado de: DUNNE, 1983).....	5
Figura 2. 3 (a) espaçamento regular; (b) espaçamento irregular; (c) isolinhas	10
Figura 2. 4 (a) GRID; (b) TIN; (c) Curvas de Nível (Fonte: RENNÓ; SOARES, 2014).	10
Figura 2. 5 (a) Perfil de uma depressão antes e após o preenchimento; (b) Perfil de um pico antes e após sua remoção (modificado de: ESRI, 1993).	13
Figura 2. 6 Escalas de cinza de Área de Contribuição. (a) valores teóricos, (b) direção única - D8, (c) procedimento de Quinn et al. (91) (MS), (d) método Léa (92), (e) Demon de Costa-Cabral e Borges (94), (f) D-Infinito de Tarboton (97) (Fonte: TARBOTON, 1997).....	14
Figura 2. 7 Algoritmos de fluxo (Fonte: PELLETIER, 2008)	15
Figura 2. 8 (a) Plano de drenagem do terreno; (b) perfil da área parcial de captação (Modificado de: O'LOUGHLIN, 1986).....	17
Figura 2. 9 Limiar de erosão (Adaptado de MONTGOMERY e DIETRICH, 1992)	19
Figura 2. 10 Relação área de contribuição e declividade (modificado de: DIETRICH et al, 1993).....	20
Figura 2. 11 Histograma de frequência de parâmetros morfométricos na BHRSB (SENA-SOUZA et al., 2013).....	24
Figura 3. 1 Localização da UH Pípiripau.	25
Figura 3. 2 Geologia no DF com detalhe na UH do Pípiripau (Modificado de: CAMPOS, 2004).....	26
Figura 3. 3 Compartimentação geomorfológica na UH do Pípiripau (Modificado de: SENA-SOUZA et al., 2013).....	27
Figura 3. 4 Pedologia na UH do Pípiripau – DF (Modificado de: REATTO et al., 2004).....	27
Figura 3. 5 Uso do solo na UH do Pípiripau (Modificado de: ANA, 2010)	28
Figura 4. 1 Fluxograma de mapeamento dos geoambientes.....	30
Figura 4. 2 Fluxograma da modelagem dos parâmetros topográficos.....	31

Figura 5. 1 Diferenciação de canais in loco. (1) nascente; (2) área permanentemente brejosa de vereda que configura um curso até o rio Pipiripau; (3) nascente; (4) efêmero; (5) nascente.	32
Figura 5. 2 (a) Modelo Digital do Terreno da UH do Pipiripau com indicação de perfil topográfico A-B; (b) Perfil topográfico A-B sem correções; (c) Perfil topográfico A-B com correções.....	33
Figura 5. 3 Declividade na UH do Pipiripau.	34
Figura 5. 4 Área de Contribuição (log de 10) na UH do Pipiripau.....	35
Figura 5. 5 Solos na UH do Pipiripau e classificação de canais.....	36
Figura 5. 6 Gráficos de ocorrência de canais nos solos. (a) efêmeros; (b) intermitentes e perenes.....	36
Figura 5. 7 Composição colorida (RGB) dos atributos morfométricos (R- altitude; G- declividade; B- área de contribuição) na UH do Pipiripau.....	37
Figura 5. 8 Geoambientes na UH do Pipiripau e indicação de alguns pontos e perfis de análise.	38
Figura 5. 9 Perfil de áreas em análise dos pontos da figura 5.4 (altitude-m x distância-m) . (P1) Perfil A-B: com rampa de colúvio no extremo norte da propriedade; (P2) Perfil C-D: com transição da chapada para a rampa de colúvio; (P3) Perfil E-F: transição da rampa de colúvio para a frente de recuo erosivo; (P4) Perfil G-H: transição da rampa de colúvio para a chapada (fundo); (P5) Perfil I-J: transição da rampa de colúvio para a frente de recuo erosivo; (P6) Perfil K-L: vista da rampa de colúvio para a frente de recuo erosivo; (P7) Perfil M-N: transição da rampa de colúvio e frente de recuo erosivo; (P8) Perfil O-P: frente de recuo erosivo.	39
Figura 5. 10 Geoambientes na UH do Pipiripau dos pontos identificados na Figura 5.4 (a) Campos de murundus no ponto 9; (b) e (c) relevo acidentado com colinas e vales encaixados caracterizando a depressão dissecada no ponto 10.....	40
Figura 5. 11 Gráficos de ocorrência de canais nos geoambientes. (a) efêmeros; (b) intermitentes e perenes.	41
Figura 5. 12 Relação entre área de contribuição e declividade na UH do Pipiripau.....	42
Figura 5. 13 Outlier no ponto de análise 2 (Perene). (a) indicação do outlier no gráfico (b) aerofoto Terracap 2015 indicando a localização do ponto com barramento; (c) Indicação do ponto na unidade hidrográfica.	43

Figura 5. 14 Outlier no ponto de análise 77 (intermitente). (a) indicação do outlier no gráfico; (b) Indicação do ponto na unidade hidrográfica; (c) área de contribuição indicando fluxo mais acentuado ao final do canal; (d) aerofotos Terracap 2015 indicando a localização do ponto e o uso do solo extensivo aclave; (e) foto in loco.	43
Figura 5. 15 Outliers de declividade nos pontos 42 e 81 (Efêmero). (a) indicação dos outliers no gráfico; (b) indicação dos pontos na UH; (c) aporte vindo das vias no ponto 42; (d) deslocamento de fluxo devido ao uso do solo no ponto 81.	44
Figura 5. 16 Relação da área de contribuição e declividade na unidade hidrográfica do Pípiripau. (a) canais efêmeros; (b) canais intermitentes; (c) canais perenes.	45
Figura 5. 17 Limiar de escoamento na UH do Pípiripau.	46
Figura 5. 18 Frequência acumulativa do limiar de escoamento na UH do Pípiripau.	47
Figura 5. 19 Outlier no ponto de análise 6 (intermitente). (a) localização do ponto 6 na UH do Pípiripau; (b) área de contribuição no ponto 6 com tendência de contribuições mais aclave; (c) aerofotos TERRACAP 2015 indicando uma e o uso de solo extensivo na área; (d) aerofotos SEGETH de 1967 com uma provável área úmida; (e) foto tirada in loco do outro lado da via do curso com grande acumulação e solo encharcado.	48
Figura 5. 20 Outlier no ponto de análise 122 (intermitente). (a) localização do ponto 122 na UH do Pípiripau; (b) foto in loco da área por trás da ocupação; (c) Aerofotos TERRACAP 2015 mostrando a intensa ocupação na área (d) área de contribuição no ponto.	48
Figura 5. 21 Outlier no ponto de análise 14(perene). (a) Localização do ponto na UH do Pípiripau; (b) imagem de satélite Terracap (2015); (c) área de contribuição no ponto de análise.	49
Figura 5. 22 Índice topográfico na Unidade Hidrográfica do Pípiripau, DF.	50
Figura 5. 23 Índice Topográfico nos canais da Unidade Hidrográfica do Pípiripau.	50
Figura 5. 24 Frequência acumulativa do IT na Unidade Hidrográfica do Pípiripau.	51
Figura 5. 25 Relação do índice topográfico e o uso do solo. (a) indicação do foco da área analisada onde predomina solo hidromórfico; (b) índice topográfico superior a 14 indicando uma probabilidade alta de saturação do solo na região; (c) uso do solo em 2014 sem indicio de curso ou acumulações; (d) uso do solo anteriormente a ocupação (1967) com indícios de saturação e caminho preferencial de curso.	52
Figura 5. 26 Relação do índice topográfico e o uso do solo. (a) indicação do foco da área analisada com pedologia; (b) índice topográfico superior a 14 indicando uma probabilidade alta de saturação do solo na região; (c) uso do solo em 2014 com retirada de mata de galeria e	

drenos; (d) uso do solo anteriormente a ocupação (1967) com mata de galeria intacta e curso contribuindo ao curso principal. 52

Figura 5. 27 Relação do índice topográfico e áreas alagadas. (a) indicação do foco da área analisada com pedologia; (b) índice topográfico superior a 14 indicando uma probabilidade alta de saturação do solo na região e possível curso; (c) imagem das áreas identificadas; (d) Fotos das áreas in loco – (0) afloramento; (1) área brejosa com afloramento; (2) nascente; (3) área permanentemente alagada de vereda. 53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 Variáveis Morfométricas (Modificado de: FLORINSKY, 2012).....	9
Tabela 2. 2 Parâmetros do Topo to Raster (Fonte: FREITAS, 2012)	12
Tabela 2. 3 Métodos de direção de fluxo.	14
Tabela 2. 4 Unidades Geomorfológicas em Composição Colorida de dados altimétricos na BHRSB (Modificado de: SENA-SOUZA et al, 2013).	24
Tabela 5. 1 Frequência de canais por tipo na UH do Pipiripau	33
Tabela 5. 2 Contingência entre verdade de campo x limiar de escoamento.....	55
Tabela 5. 3 Kappa da classificação no limiar de escoamento	55
Tabela 5. 4 Contigência entre verdade de campo versus Índice Topográfico	56
Tabela 5. 5 Kappa da classificação no Índice Topográfico	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHS	Áreas Hidrologicamente Sensíveis
ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Área de Preservação Permanente
AQd	Neossolo Quartzarênico
AVA	Área Variável de Afluência
BHRSB	Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu
CD	Cambissolo
DF	Distrito Federal
GRID	Grade Regular
Hi	Solos Hidromórficos
HLd	Plintossolo Distrófico
IDW	Inverso do Quadrado de Distância
IN	Instrução Normativa
IT	Índice Topográfico
KRA	Kinematic Routing Algorithm
LEd	Latossolo Vermelho
LVd	Latossolo Vermelho-Amarelo
MDT	Modelo Digital do Terreno
MS	Multiple Directions Based on Slope
PPC	Psamo-Pelito Carbonatada
RA	Região Administrativa
RGB	Red Green Blue
SEGETH	Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TERRACAP	Companhia Imobiliária de Brasília
TIN	Triangulated Irregular Network
TOPMODEL	Topography-based Hydrological Model
TRe	Nitossolo
UH	Unidade Hidrográfica
UnB	Universidade de Brasília

1. INTRODUÇÃO

O conceito de Área de Preservação Permanente (APP), oficializado em 1965 com a promulgação da lei 4.771, visava a proteção das margens de cursos d'água, a época o termo utilizado era "qualquer curso d'água". Essa definição implicava na interpretação de que canais de escoamento superficial seriam áreas objeto de APP. Buscando dirimir este conflito o Distrito Federal - DF editou em 2009 o Decreto 30.315 com o objetivo de diferenciar os cursos d'água dos canais advindos do escoamento superficial. Classificou então os canais perenes como aqueles que ocorrem o fluxo hídrico por todo ano, os intermitentes como os canais onde o fluxo ocorre temporariamente com leito fluvial seco durante a época da estiagem, e, por fim, o canal natural de escoamento superficial onde ocorre o fluxo de água durante e logo após o evento da chuva. O decreto indica ainda que o canal natural de escoamento superficial não compõe um curso hídrico, conseqüentemente não é objeto de APP, mas reconhece que se trata de áreas que compõem a drenagem de uma bacia e que necessitam de proteção, neste caso atribui uma área não edificante de uso restrito.

Posteriormente na atualização do código florestal, lei 12.651/2012, tal distinção foi reconhecida com a atribuição de APP aos cursos perenes e intermitentes excluindo os efêmeros, este denominado naquele Decreto Distrital como canal natural de escoamento superficial. Logo, é importante a diferenciação de canais para a definição do que vem ser uma APP e o que é área de uso restrito (não edificante). Pelo Decreto citado tal diferenciação necessita de relatório ambiental contendo levantamentos de campo constatando a relação temporal do canal em resposta a precipitação. Essa relação temporal se dá pela análise in loco do canal por um ano hidrológico buscando diferenciar os canais quanto a sazonalidade de sua perenidade.

Considerando a extensão do território e da rede de drenagem nele inserida é moroso o processo de mapeamento e classificação destas feições em tempo hábil para o licenciamento e regularização ambiental de imóveis. A automação desses processos auxiliaria na identificação dos canais naturais de escoamento superficial (efêmeros) para a definição de áreas sensíveis objeto de proteção e gestão ambiental do território.

Neste intuito a análise da paisagem vem contribuir, pois é amplamente utilizada como instrumento de identificação e análise de questões ambientais, manejo do solo e disponibilidade hídrica. O fluxo de água na paisagem permite a identificação de áreas propensas à saturação em uma bacia hidrográfica. Estas áreas são consideradas Áreas

Hidrologicamente Sensíveis (AHS), pois propiciam transporte de poluentes pelo processo de escoamento, bem como e atuam como áreas coletoras onde podem ocorrer a concentração de poluentes. De forma sucinta pode-se afirmar que os processos de infiltração e escoamento governam o ciclo hidrológico na superfície do solo.

A modelagem matemática vem sendo utilizada para a identificação de áreas saturadas na paisagem. Esta possibilita representar um ambiente a fim de permitir a análise e previsão dos processos que nela irão ocorrer. Modelos que tratam da distribuição espacial da água em bacias hidrográficas requerem dados baseados nas características topográficas da bacia (MOORE, 1993). Estes modelos objetivam simular os caminhos preferenciais que caracterizam rotas de organização do escoamento superficial (CASSETI, 2014). Por se tratarem de elementos de ligação entre a paisagem e os canais perenes, sua identificação auxilia a análise de áreas prioritárias à preservação ambiental (SIEFERT, 2010).

O Modelo Digital do Terreno (MDT) tem sido amplamente utilizado como insumo para representar esses fluxos na paisagem. A partir dessa representação podem ser calculados atributos morfométricos relacionados às formas do relevo. Sena-Souza et al. (2013) utilizou a declividade e a curvatura mínima para definir unidades da paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu (BHRSB). Hermuche et al. (2003) e Farias (2008) utilizaram declividade, aspecto e área de contribuição para a definição de unidades da paisagem para classificar o solo. Couto Junior et al. (2010) utilizaram a declividade e altimetria para delimitar unidades da paisagem em relação a fitofisionomias na Serra da Canastra – MG.

Os parâmetros morfométricos, mais especificamente área de contribuição e declividade, têm sido utilizados na modelagem hidrológica para avaliar sua correspondência com a formação de canais. Patton e Schum (1975) analisaram a relação inversa entre a área de contribuição e a declividade identificando a existência de uma declividade crítica na formação de canais. Essa relação também norteou o conceito de índice topográfico (IT) proposto inicialmente por Beven e Kirkby (1979). Montgomery e Dietrich (1992) relataram que a área de contribuição de canais decresce com o aumento da declividade indicando uma correlação entre essas duas variáveis. Deste modo, a relação inversa da área de contribuição e da declividade define o limiar topográfico de ocorrência de regiões na paisagem com ou sem canais. Sendo assim, análises morfométricas permitem obter uma base física para prever a magnitude de mudanças hidrológicas na paisagem (O'LOUGHLIN, 1986).

O elevado custo de levantamentos *in situ* de canais de drenagem com diferentes atribuições de manejo ambiental obriga a utilização de modelos alternativos. Os modelos matemáticos de mapeamento derivados de MDT são muito eficientes em indicar o comportamento hidrológico da paisagem, e, ao mesmo tempo, são de baixo custo (DAMASCENA et al, 2010).

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi diferenciar os canais naturais de escoamento superficial (efêmeros) dos cursos intermitentes e perenes por análise morfométrica.

A metodologia da análise morfométrica foi desenvolvida em duas abordagens de modelagem matemática dos canais de drenagem, que constitui os seguintes objetivos específicos:

- determinar os limiares de escoamento;
- definir os índices topográficos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MECANISMOS DE GERAÇÃO DE ESCOAMENTO

A natureza da superfície do solo governa os processos de infiltração e escoamento (Figura 2.1), teoria essa inicialmente estabelecida por Horton (1933) que descreveu o mecanismo de geração do escoamento superficial e a capacidade de infiltração de água no solo. Cappus (1960) afirma que para a geração do escoamento superficial há necessidade das áreas estarem impermeáveis ou saturadas. Tsukamoto (1963) demonstra em um perfil vertical do solo, a diferença de armazenamento indicando a dinâmica de saturação do solo, onde áreas com maior déficit de umidade tendem a atingir a saturação mais lentamente. Betson (1964) considera que o escoamento superficial provém de áreas parciais de afluência propensas a saturação e não de toda bacia.

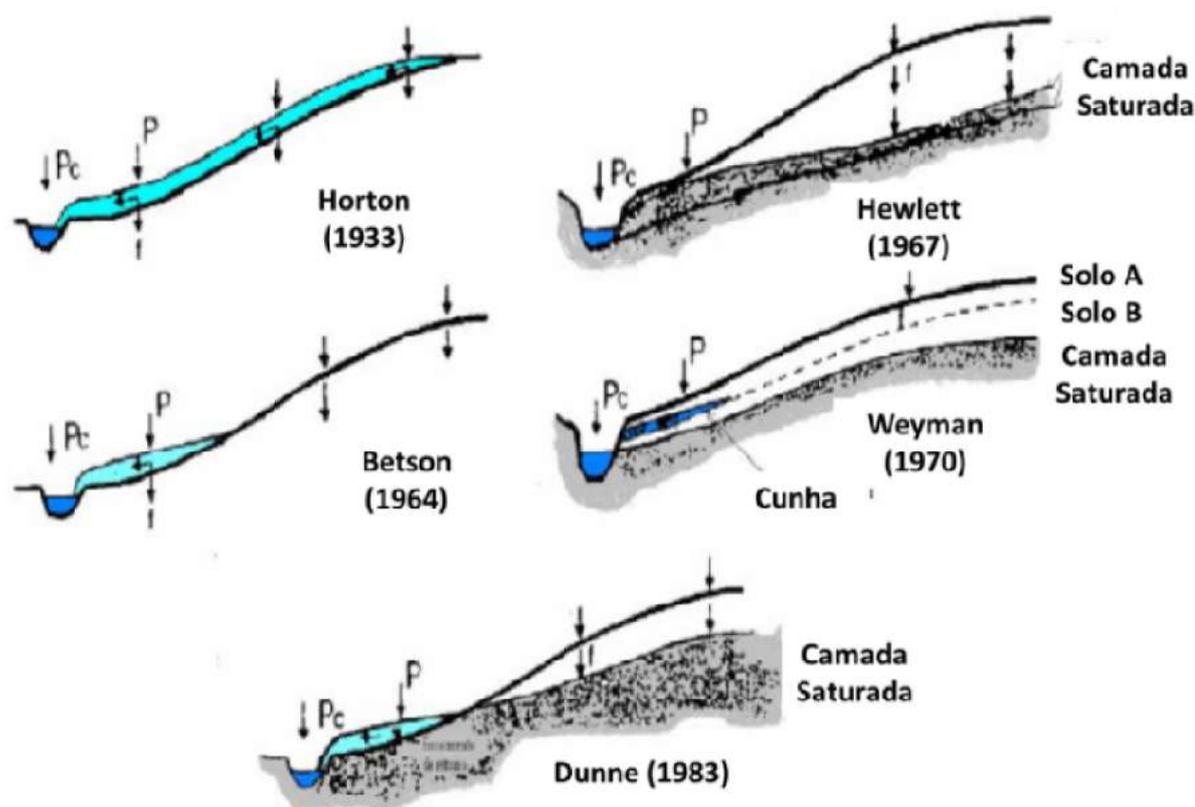


Figura 2. 1 Principais mecanismos de geração de escoamento (Modificado de: BEVEN, 1986)

Hewlett e Hibert (1967) incorporam a dinâmica de áreas saturadas no tempo e no espaço onde a precipitação e a umidade do solo influenciam na expansão e contração de zonas de saturação na formação da rede de drenagem. Essas áreas dinâmicas, que se expandem e

contraem, constituem a base para a formação do conceito de Áreas Variáveis de Afluência (AVA). Neste sentido Weyman (1970), analisou a anisotropia das camadas superficiais para verificar a relação com a rede de drenagem. Nesta análise foi verificado que a diferença de condutividade hidráulica dos solos implica no aparecimento de uma cunha na transição de horizontes aumentando o escoamento subsuperficial lento responsável pela vazão em períodos secos. Por fim, Dunne (1983) propõe um modelo onde indica a influência da topografia, solo, clima, vegetação e o uso do solo na compreensão dos mecanismos de escoamento incorporando os conceitos de AVA (Figura 2.2).

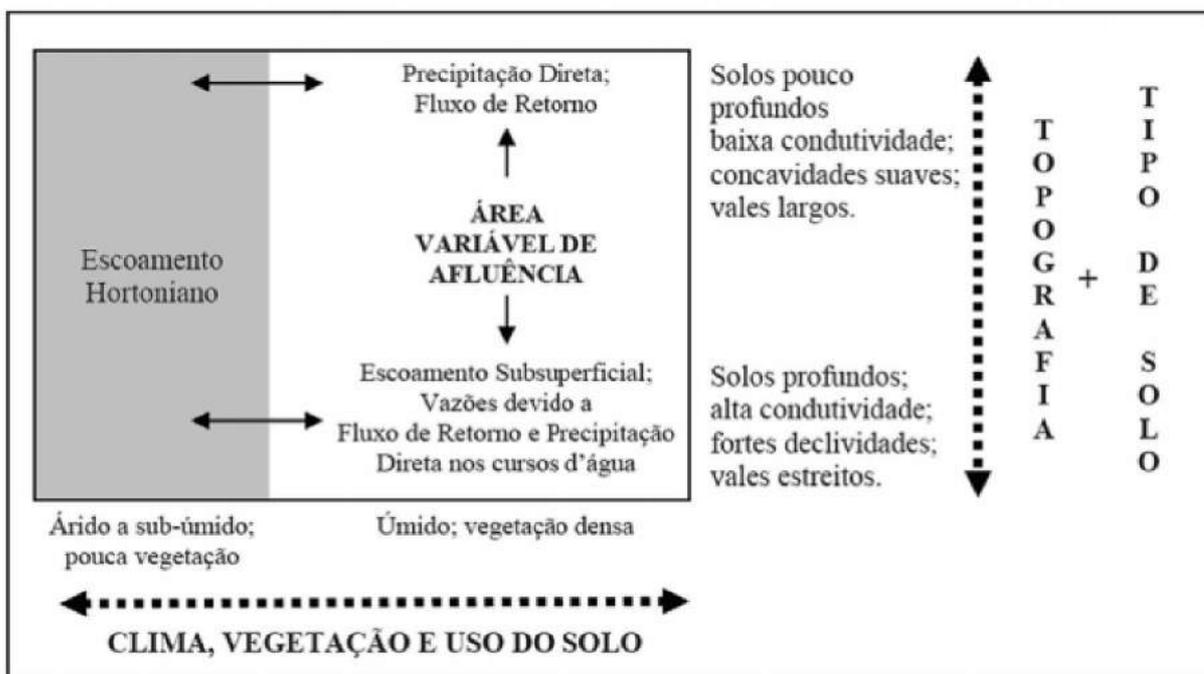


Figura 2. 2 Principais condicionantes no processo de escoamento (Modificado de: DUNNE, 1983)

Neste sentido há duas formas de ocorrência do fluxo de água no solo, sob saturação e não saturação. A primeira, denominada de escoamento hortoniano, ocorre quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração havendo acúmulo de água na superfície. A segunda, escoamento de Dunne, acontece quando a capacidade de armazenamento até certa profundidade é preenchida ocasionando saturação do solo. Mesmo que consideradas independentes as duas formas de escoamento podem ocorrer simultaneamente (LIMA, 2010).

Por influenciar a dinâmica hidrológica na paisagem, a topografia condiciona a espacialização das AVAs sendo insumo à elaboração de modelos hidrológicos em bases físicas, como o desenvolvido por Beven e Kirkby (1979). Logo, as características físicas/geomorfológicas influenciam a saturação do solo, pois determinam o caminho da água

da chuva até a infiltração. Neste contexto diversos trabalhos desenvolveram procedimentos computacionais voltados para a definição de áreas de contribuição e de zonas de saturação no relevo (O'LOUGHLIN, 1986; MOORE et al, 1988; MOORE e GRAYSON, 1991; O'CALLAGHAN e MARK, 1984; TARBOTON, 1991; QUINN, 1991; FAIRFIELD, 1991; FREEMAN, 1991; COSTA CABRAL, 1994).

A modelagem hidrológica se trata de uma reprodução matemática do comportamento da água na superfície e/ou subsuperfície do solo (O'LOUGHLIN, 1986). Geralmente os modelos descrevem a distribuição espacial da precipitação, o movimento da água no solo (escoamento e percolação), perdas por evapotranspiração e escoamento (FREITAS, 2012).

Beven e Kirkby (1979) desenvolveram um modelo baseado em dados físicos a partir de características topográficas e do solo que busca estimar a deficiência de água no solo e a área de contribuição a montante. Esses autores mostraram que a saturação do solo está relacionada a razão da área drenada pela unidade de comprimento de contorno (a/b) em um ponto dividido pelo gradiente da superfície local, permitindo o cálculo, durante e entre chuvas, de saturação do solo.

O'Loughlin (1981) mostrou que uma simples análise física de fluxo lateral em encostas ideais prevê a zona de saturação do solo. A saturação do solo ocorre onde o fluxo de drenagem do aclave exceder a capacidade do perfil do solo de conduzir tal fluxo. A variação de saturação no perfil do solo configura a dinâmica temporal das áreas saturadas nos conceitos de Beven e Kirkby (1979) e de O'Loughlin (1981).

O'Loughlin (1986) considera como importante consequência do movimento lateral da água o desenvolvimento de zonas de saturação do solo. Face a aleatória heterogeneidade das propriedades do solo existem mudanças laterais sistemáticas que resultam em pelo menos 2 fenômenos. O primeiro segue o efeito da condutividade da variável hidráulica do solo, onde a percolação vertical que ocorre pelas camadas da rampa diminui a condutividade hidráulica do solo, um fluxo lateral de água no solo ocorrerá. O segundo fator que afeta a diferença na mistura lateral é a topografia convergente ou divergente. Os 2 fatores juntos resultam na saturação do perfil do solo.

Neste viés, uma variedade de métodos vem sendo desenvolvidos para medir a área de contribuição e suas propriedades (O'CALLAGHAN E MARK, 1984; JENSON E DOMINGUE, 1988; TARBOTON, 1991; QUINN, 1991).

Destaca-se a importância das áreas saturadas como um indicador para compreensão dos processos hidrológicos no que tange aos caminhos superficiais da água na paisagem (CREED et al, 2008). As áreas com maior propensão de saturação são os elementos de ligação da paisagem aos canais propiciando o transporte de poluentes por meio do escoamento (SIEFERT, 2012).

2.2 LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA

A paisagem, em suas singularidades, desempenha importante papel ecológico. Esse reconhecimento implicou, dentro da história brasileira, uma série de regramentos de caráter ambiental para a proteção do meio ambiente. Dentre eles, destaca-se o conceito de área de preservação permanente (APP), oficializado em 1965 com a promulgação da lei 4.771, que estabeleceu o Código Florestal Brasileiro.

No Código Florestal de 1965 essa faixa de proteção conceitualmente visava a proteção das margens de cursos d'água, a época o termo utilizado era "qualquer curso d'água", diferenciando-os apenas pelo tamanho e não pela perenidade. Fato este implicava em interpretações de que os caminhos preferenciais de águas pluviais seriam também objeto de preservação permanente. No novo Código Florestal, Lei 12.651/2012 esta subjetividade foi corrigida especificando-se a proteção ao curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros.

Antes mesmo da atualização do Código Florestal, em busca de diferenciar os canais e atribuir a devida proteção aos canais efêmeros, no intuito de proteger áreas com potencial erosivo, o Distrito Federal (DF) homologou o Decreto 30.315/2009. A normativa define canal natural de escoamento superficial como sulco ou ravina onde não há presença de nascentes perenes ou intermitentes. Deste modo, prepondera o escoamento superficial concentrado das águas da chuva, durante e logo após a precipitação. Para este, a faixa de proteção é denominada faixa não edificante e possui critérios de proteção diferentes de uma APP. Apesar de constituir fluxo momentâneo, esses canais efêmeros contribuem para o transporte de sedimentos e poluentes na paisagem necessitando também de proteção específica, vislumbrados no referido Decreto e negligenciados no novo código.

O Decreto Distrital 30.315/2009 determina a apresentação de um relatório ambiental com o fim de distinguir os cursos e canais e consequentemente definir a faixa de proteção dos canais de escoamento superficial. Para tal identificação, a norma institui a realização de

levantamento de campo para verificar a situação do canal constatando sua relação com nascente perene ou intermitente e sua relação temporária como resposta direta à precipitação. Para a correta diferenciação faz-se necessária a análise de um ano hidrológico, a fim de caracterizar a sua temporalidade. Processo moroso considerando como referência a proteção de Áreas Hidrologicamente Sensíveis (AHS).

2.3 GEOMORFOMETRIA

A geomorfometria é uma subdisciplina da geomorfologia que descreve quantitativamente as formas da superfície pelo uso conjunto da modelagem matemática, engenharia, ciências da computação e da terra. Esta subdisciplina é também conhecida como análise do terreno, geomorfologia quantitativa ou modelagem digital do terreno (MARK, 1975).

Mark (1975) divide as variáveis geomorfológicas em: (1) regional, quando sua medição depende dos valores extremos na distribuição das elevações dentro de uma subárea finita de uma superfície e (2) local, quando é definido o cálculo em todos os pontos da superfície e os valores em cada ponto dependem das elevações dos vizinhos próximos. Gallant e Wilson (2000), no entanto, separam os atributos topográficos em: primários, aqueles que podem ser calculados diretamente da elevação, e secundários os que são gerados pela combinação de dois ou mais atributos topográficos primários.

Florinsky (2012) classifica em 5 grupos principais as variáveis morfométricas: locais; não locais; Linhas estruturais; solares; e combinadas. Cabe salientar que as variáveis locais são funções de derivadas parciais de elevação (equação 2.1). A tabela 2.1 indica a algumas fórmulas das variáveis locais, não locais e combinadas.

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (\text{eq. 2.1})$$

Tabela 2. 1 Variáveis Morfométricas (Modificado de: FLORINSKY, 2012)

Classificação	Variável/ Unidade	Símbolo	Definição	Interpretação	Fórmula
Local de fluxo	Gradiente de inclinação (Declividade)/ ⁰ Figura 2.3a	G	G é ângulo entre o plano tangente P e o plano horizontal S em determinado ponto A da superfície topográfica	G determina a velocidade da gravidade de fluxo direcionado.	$G = \arctan \sqrt{p^2 + q^2}$ Onde: p e q são derivadas parciais de elevação (equação 2.1)
	Área de captação/ m ² Figura 2.3e	CA	Figura fechada CA formada por parte do contorno b em determinado ponto da superfície topográfica e duas linhas de fluxo provenientes da curva ascendente até o fim da parte do contorno.	Uma medida da área de contribuição	-
Não local	Área de captação específica m ² Figura 2.3e	-	Uma proporção de CA para o comprimento da parte do contorno b	-	$\frac{CA}{b}$ Onde: CA é a área de captação e b o comprimento de parte do contorno
	Índice topográfico	IT	O logaritmo da proporção de CA a tangente G em determinado ponto da superfície topográfica.	Uma medida do grau de acumulação de fluxo	$\ln \left(\frac{CA}{\tan G} \right)$ Onde: CA é a área de captação e G a declividade
Combinadas	Índice de potência do canal	SI	O logaritmo do produto de CA e tan G no determinado ponto da superfície topográfica	SI pode ser usado para descrever o potencial erosivo de fluxos e processos de deformação da paisagem relacionados	-

2.3.1 Modelo Digital do Terreno

Para a produção das variáveis morfométricas é necessária a confecção de um MDT que é uma representação matemática da superfície. Na geografia, geomorfologia, geofísica, entre outros, a representação do MDT vem se tornando usual tendo em vista sua efetividade na representação de terrenos de paisagens contínuas (PIKE, 1988).

Os dados de modelo digital são representados pelas coordenadas x, y e z. Sua aquisição pode ser realizada em campo, pela digitalização de mapas e por medições fotogramétricas a partir de modelos estereoscópicos (feitos por levantamentos através do uso de aviões ou satélites) e, dados de altimetria obtidos por GPS. Os métodos de aquisição de

dados podem ser por pontos amostrados de espaçamento regular (figura 2.3a) e irregular (figura 2.3b) e por isolinhas (figura 2.3c) (ZANARDI, 2006).

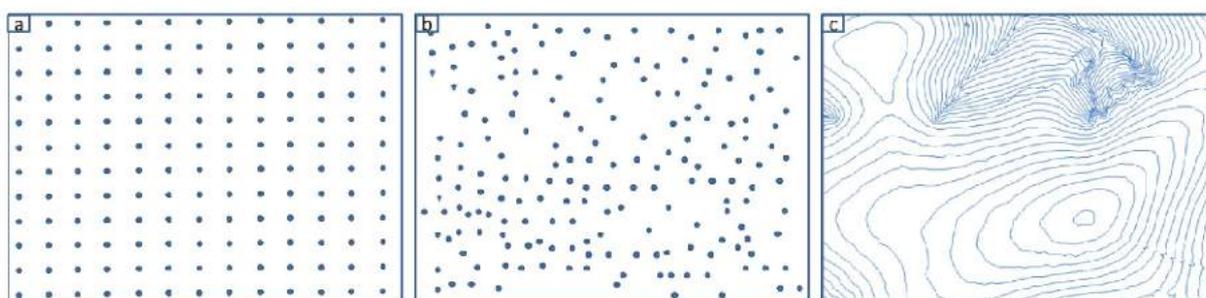


Figura 2. 3(a) espaçamento regular; (b) espaçamento irregular; (c) isolinhas

Largamente utilizada na análise de paisagem e outras aplicações é crescente a demanda por modelos digitais e seus atributos derivados. A precisão dos modelos digitais, e consequentemente de seus atributos derivados, depende da qualidade dos insumos primários, quantidade de pontos amostrados, da distribuição espacial, da estrutura dos dados (vetorial ou matricial), da complexidade topográfica da área e dos algoritmos utilizados para a interpolação (THOMPSON et al, 2001).As três principais formas de interpolação de um MDT estão ilustradas na figura 2.4: a) grades regulares (GRID); b) Grades Triangulares (TIN) e c) Curvas de nível (RENNÓ; SOARES, 2014).

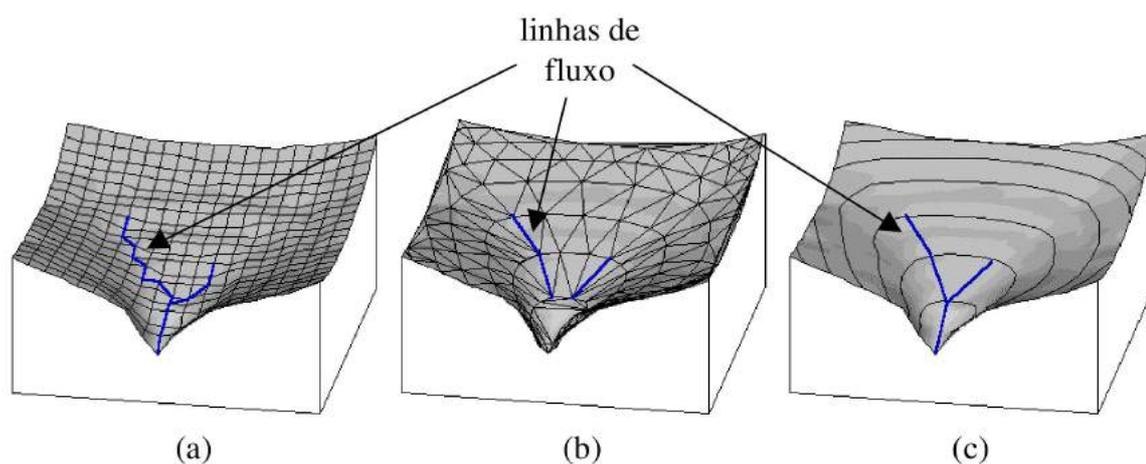


Figura 2. 4(a) GRID; (b) TIN; (c) Curvas de Nível (Fonte: RENNO; SOARES, 2014).

O modelo baseado em grade regular (GRID) é amplamente utilizado por apresentar grande facilidade de implementação e execução computacional (COLLINS e MOON, 1981). No entanto, podem não representarmudanças abruptas no relevo e, como o espaçamento dos

dados é de forma regular poderá afetar os resultados. Exemplo disso, é a geração de fluxos de drenagem que tendem a produzir linhas em zigzag (Figura 2.4a) (RENNÓ e SOARES, 2014).

O TIN é uma interpolação de estruturas vetoriais que representam a superfície através do conjunto de faces triangulares de grade irregular. Este modelo é mais utilizado em representação de relevo complexo por preservar as características topográficas do terreno e possibilitar a adaptação pela incorporação de divisores e hidrografia (Figura 2.4b) (FERNANDES e MENEZES, 2005). Dentre as desvantagens tem-se a sua utilização restrita a pequenas áreas, pois em grande escala pode haver problemas de armazenamento, transmissão e visualização de terrenos rugosos (LIU et al, 2008). Há também a necessidade de um maior processamento, pois a modelagem matemática dos dados é mais complexa (SIMÕES, 1993).

A utilização de curvas de nível (Figura 2.4c) tem desvantagem computacional por requerer estruturas de armazenamento de dados, porém representam explicitamente regiões de convergência e divergência necessárias a modelagem hidrológica (MOORE et al, 1993).

Pinheiro et al (2012) procuraram avaliar a qualidade, na representação das variáveis morfométricas derivadas dentre diversas técnicas para obtenção de um modelo digital, pela interpolação de feições vetoriais (pontos cotados, curvas de nível e hidrografia ou diretamente de sensores remotos) e indicaram um modelo misto de dados provenientes de curva de nível e de imagem Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) como o mais adequado para representar a superfície e para derivar os atributos topográficos empregados nas etapas posteriores do mapeamento digital dos solos.

Alguns interpoladores de dados topográficos para a geração de um MDT (em grade regular) voltado aos estudos de hidrologia são: o Inverso do Quadrado da Distância (IDW), Kriging, ANUDEM (Topo toRaster) (TAN e XU, 2014). Hutchinson (1989) desenvolveu o ANUDEM que combina a interpolação local (IDW) com a interpolação global (Kriging) permitindo a utilização da rede de drenagem no processo de interpolação.

Para melhorar o resultado do processo de interpolação a ferramenta Topo toRaster no ArcGis, permite o ajuste de alguns parâmetros. A modificação dos valores padrão possibilita minimizar o “efeito escada” do modelo e atenuar a declividade ao longo da encosta (FREITAS, 2012). Os parâmetros de entrada no interpolador e sua descrição podem ser visualizados na Tabela 2.2.

Tabela 2. 2 Parâmetros do Topo toRaster (Fonte: FREITAS, 2012)

Parâmetro	Descrição
Margem em células	Distância em células para interpolar além da extensão de saída especificada e limite
Menor valor z para ser utilizado na interpolação	Limitar o menor valor e o maior valor para a interpolação
Maior valor z para ser utilizado na interpolação	
Aplicação da drenagem	O tipo de aplicação da drenagem na interpolação. Utilizado para remoção de depressões no canal de drenagem
Tipo do dado primário	O tipo do dado de entrada com informações de elevação dominante
Número máximo de interações	Número máximo de interações de interpolação. Valores acima de 30 limpam pequenas depressões, já valores acima de 45 raramente tem utilidade na limpeza de mais depressões
Penalidade de rugosidade	Utilizado para suavizar a interpolação. Para linhas o sugerido é 0 e pontos 0,5.
Fator de erro de discretização	Utilizado para ajustar a intensidade da suavização. Valores menores resultam em menor suavização
Erro padrão vertical	A quantidade de erro aleatório nos valores de z do dado de entrada
Tolerância 1	Essa tolerância reflete a acurácia e densidade dos pontos de elevação em relação a drenagem. Por padrão o valor é ajustado 2,5 quando o dado é linha e 0 quando o dado é ponto.
Tolerância 2	Essa tolerância previne que a drenagem ultrapasse barreiras com altitudes irreais. O padrão é 100 para linha e 200 para ponto.

Para a obtenção de um MDT hidrologicamente corrigido os seguintes aspectos devem ser considerados: eliminação de depressões artificiais; introdução de informações sobre as localizações de rede de drenagem; determinação de direção de fluxo (TURCOTTE et al 2001). O processo de interpolação de dados pode conferir imperfeições no modelo criando áreas com depressões e picos artificiais. Para garantir a continuidade do fluxo no perfil do relevo as depressões e picos devem ser corrigidos no MDT (LINDSAY e CREED, 2005). Neste sentido as células contidas dentro de depressões são elevadas enquanto os picos são removidos (figura 2.5) (TARBOTON, 1991).

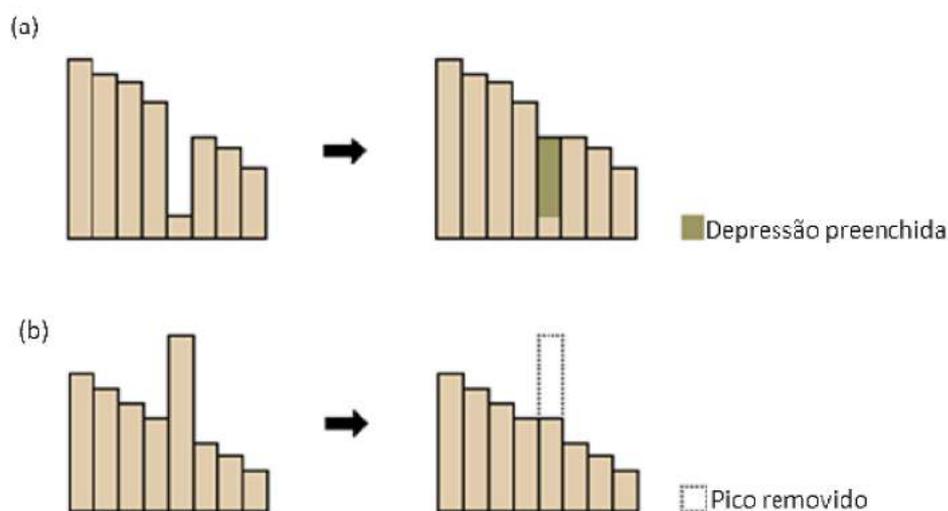


Figura 2. 5(a) Perfil de uma depressão antes e após o preenchimento; (b) Perfil de um pico antes e após sua remoção (modificado de: ESRI, 1993).

2.3.2 Direção de Fluxo e Área de contribuição

Dunne e Black (1970), em estudo realizado em Vermont, indicam que a maior porção de escoamento ocorre em pequenas áreas saturadas na bacia. Essas áreas parciais de contribuição são dinâmicas variando sazonalmente devido à ocorrência de chuvas. Sua posição e expansão estão relacionadas à topografia, solos e características dos períodos de chuva. A declividade direciona o fluxo podendo ser considerada um fator que potencializa o arranjo das áreas de contribuição.

A área de contribuição é derivada do MDT, no entanto, é necessário realizar uma etapa intermediária, que é o cálculo da direção de fluxo (MOORE et al, 1991). Uma vez definida a direção do fluxo é possível identificar qual pixel contribui com água e, portanto, a área de contribuição de cada ponto pode ser obtida. (WISE, 2001).

O uso de metodologias diferentes pode levar a resultados bastante distintos. Para o cálculo da área de contribuição a confiabilidade dos dados está relacionada à produção de um MDT preciso, bem como à modelagem adequada da trajetória do fluxo (RAMOS et al, 2003).

A direção de fluxo pode ser estimada por diferentes algoritmos, sendo os principais destacados na tabela 2.3 e figura 2.6 a seguir:

Tabela 2. 3 Métodos de direção de fluxo.

Método	Referência
D8	O'callaghan e Mark, 1984
Rho8 quase Random	Fairfield, 1991
FD8/FRho8- dispersive	Freeman, 1991
MS	Quinn et al, 1991
KRA	Lea, 1992
Stream-tube DEMON	Costa Cabral, 1994
D ∞	Tarboton, 1997

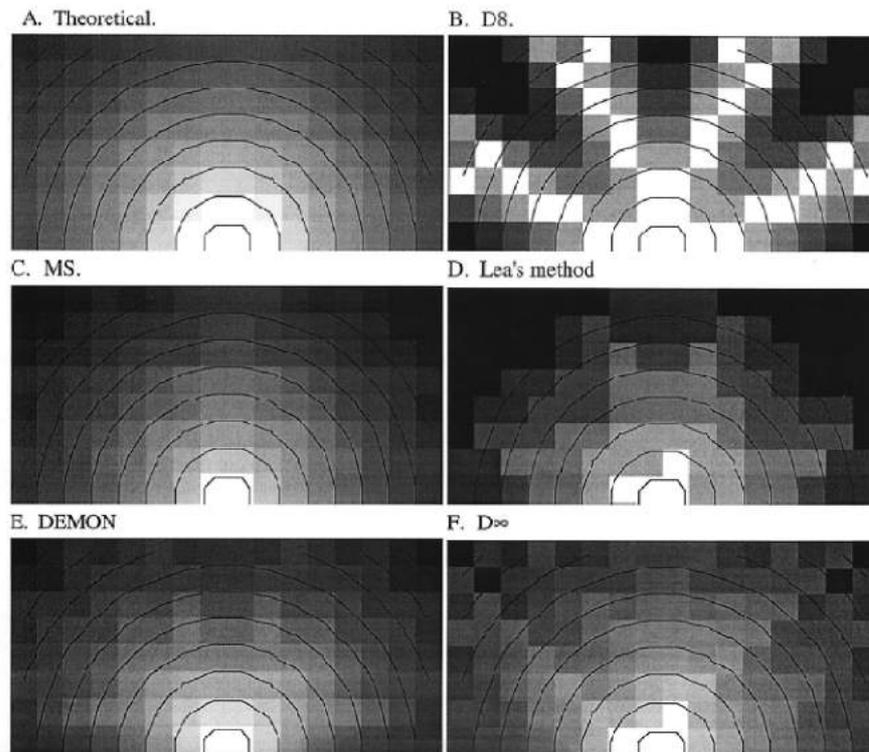


Figura 2. 6 Escalas de cinza de Área de Contribuição. (a) valores teóricos, (b) direção única - D8, (c) procedimento de Quinn et al. (91) (MS), (d) método Léa (92), (e) Demon de Costa-Cabral e Borges (94), (f) D-Infinito de Tarboton (97) (Fonte: TARBOTON, 1997).

De modo geral, os algoritmos de fluxo se dividem em 2 grupos (Figura 2.7): fluxo simples, onde o fluxo é dirigido para uma única direção; e fluxo múltiplo, onde há dispersão do fluxo na superfície do relevo. Os algoritmos de fluxo simples dependem principalmente da topologia da rede de drenagem, enquanto os de fluxo múltiplo consideram topologia e relevo combinados para direcionar o fluxo (PELLETIER, 2008).

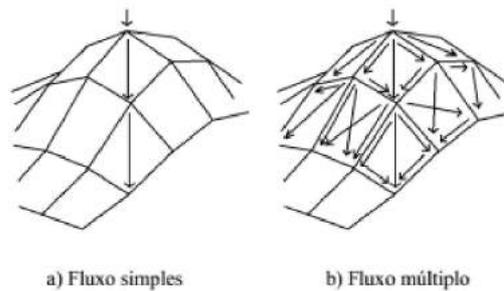


Figura 2. 7 Algoritmos de fluxo (Fonte: PELLETIER, 2008)

O método D8 consiste em determinar a direção do fluxo de cada célula de grade considerando a maior declividade entre a célula central e as oito células vizinhas. Este apresenta desvantagens, pois expressa padrões de fluxo convergentes nas direções dos pontos cardeais ou diagonais, não havendo valores intermediários a esses. O Rho8 evita esse problema por cálculos de média de direção de fluxo, no entanto distorce a distribuição de frequência da área de contribuição (NARDI et al, 2008).

O KRA (Kinematic Routing Algorithm) baseia-se na orientação de vertente para determinar a direção do fluxo. Este considera cada célula como um plano unitário e a direção do fluxo é determinada pela média das elevações adjacentes à elevação do pixel central. Este procedimento indica a direção de fluxo contínuo (LEA, 1992).

Dentre os algoritmos de fluxo múltiplo tem-se o FD8/Frho8, MS, DEMON e o D^∞ . O FD8/FRho8 representa a divergência de fluxo em topografia convexa dispersando-o por um fator de preponderância de declive as células em declive. O DEMON utiliza tubos de fluxo não limitados a célula e modela diretamente o fluxo divergente e convergente em resposta ao formato da superfície sem precisar recorrer a dispersão do fluxo. O FRho8 e o DEMON resultam em distribuição de frequência de área de contribuição similar (WILSON e GALLANT, 2001). Quinn et al (1991) propôs a direção de fluxo múltiplo (MS – multipledirectionsbasedonslope), em que o percentual de fluxo transferido para cada célula à jusante é proporcional ao produto da distância de fluxo acumulado e ao fator de peso geométrico. Por fim o método D^∞ de Tarboton (1997) considera a inclinação mais íngreme em uma faceta triangular. Este método permite ângulos contínuos de fluxo e o particionamento da direção entre duas ou mais células vizinhas.

Em vertentes convexas com fluxo divergente, a área de contribuição tende a diminuir. Para vertentes côncavas, a área de contribuição específica tende a aumentar, causando incremento no fluxo acumulado (MINELLA et al, 2010).

Ramos et al (2003) avaliou a área de contribuição a partir de duas metodologias, fluxo simples (D8 de O'Callaghan e Mark, 1984) e múltiplo (MS – Quinn et al, 1991), e concluiu que o fluxo múltiplo se mostrou mais adequado localizando maiores áreas de contribuição de montante para jusante.

2.3.3 Análises Topográficas

Um dos processos que controlam a dissecação do relevo é o escoamento superficial, que define canais em sulcos concentrados de erosão (DIETRICH et al, 93). Essa dissecação da paisagem tem sido estudada nas últimas décadas e, alguns estudos apontam uma relação intrínseca entre a área de contribuição e a declividade (PATTON e SCHUMM, 1975; BEVEN E KIRKBY, 1979; SCHUMM, 1979; MONTGOMERY e DIETRICH, 1988; TARBOTON et al, 1991; DIETRICH et al., 1992; MONTGOMERY e DIETRICH, 1992; MONTGOMERY e GEORGIU-FOUFOULA, 1993; DIETRICH et al., 1993; MONTGOMERY, 2001; SIEFERT, 2010; ARAUJO e PEJON, 2015). Neste sentido, diversos estudos têm utilizado esses parâmetros morfométricos na modelagem hidrológica a fim de avaliar a correspondência com a formação de canais.

O conceito de formação de canais foi estabelecido inicialmente por Horton (1945) que relacionou a tensão de cisalhamento superior à resistência do solo para a formação de sulcos e ravinas. Patton e Schumm (1975) iniciaram a modelagem desses processos avaliando a tensão de cisalhamento que excede o valor crítico. Neste sentido, indicaram uma relação inversa entre declividade e área de contribuição para a identificação de áreas onde ocorre o início de canais, evidenciando que os valores limiares desta ocorrência dependem da geologia, solos, clima e vegetação.

Essa relação norteou trabalhos e teorias posteriores sobre a formação de canais, dentre elas o conceito de índice topográfico (IT). O IT é expresso pela fração entre a área de contribuição (A) e a tangente da declividade do terreno ($\tan\beta$), equação (2.2) (BEVEN e KIRKBY, 1979).

$$IT = \ln\left(\frac{A}{\tan\beta}\right) \quad (\text{eq. 2.2})$$

O IT é função da declividade e está sujeito a restrição: $0^\circ < \beta < 90^\circ$. Valores de declividade a 0° indicam alto valor de IT, onde o relevo plano está combinado com uma grande área de contribuição a montante. O inverso, elevadas declividades e pequenas áreas de contribuição, condiciona a ocorrência de baixos valores de IT (SIEFERT, 2012).

Esse algoritmo foi utilizado inicialmente no TOPMODEL (Topography-Based Hydrological Model) de Beven e Kirkby (1979) e vem sendo utilizado isoladamente ou não na indicação de áreas com maior probabilidade de saturação (BECKER, 2005; SIEFERT, 2012; SILVA, 2012; SANTOS, 2013). Sua premissa baseia-se nas condições topográficas locais, expressas na distribuição espacial do IT, sendo capaz de reproduzir o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica (SIEFERT, 2012).

Com o mesmo objetivo O'Loughlin (1986) desenvolveu um modelo hidrológico denominado TOPOG baseado na análise da área de contribuição a montante, da transmissividade do solo e da declividade local (Figura 2.8).

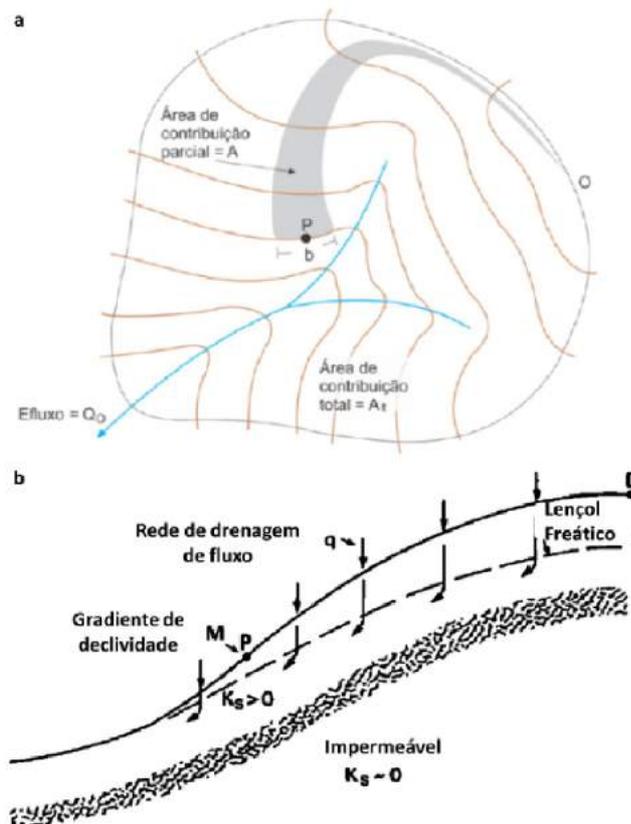


Figura 2.8 (a) Plano de drenagem do terreno; (b) perfil da área parcial de captação (Modificado de: O'LOUGHLIN, 1986).

O critério para o desenvolvimento de saturação local ocorre quando o fluxo de acumulação de água, composto pelo produto da captação do aclave "A" e a área de drenagem

do fluxo “q”, que passam pelo elemento contorno de comprimento “b”,excede o produto da transmissividade“T” do solo em determinado gradiente de declividade“M” (equação 2.3).

$$\frac{Aq}{b} \geq TM \quad (\text{eq.2.3})$$

Outra teoria que explora a relação da área de contribuição e declividade é o limiar de escoamento que implica na identificação da localização do início dos canais. Montgomery e Dietrich (1992) relataram que a área de drenagem das cabeças de canais decresce sistematicamente com o aumento da declividade. Os valores de área de contribuição com canais acima e abaixo da cabeceira do canal indicam que as cabeceiras se situam em um limiar topográfico. A relação inversa da área de contribuição e da declividade define o limiar topográfico de ocorrência de regiões na paisagem com ou sem canais.

Montgomery e Dietrich (1992) coletaram dados de comprimento (L), declividade (S) e área de drenagem (A) em locais de topografia convergente, em cabeceiras de canais e em vales sem canais encontrando uma relação de $L=(3A)^{0.5}$ em uma pequena bacia no norte da Califórnia, US. Essa relação da área de contribuição e declividade define um limiar de escoamento que implica na identificação da localização do início dos canais.

Para testar a hipótese de limiar de escoamento, Montgomery e Dietrich (1992) correlacionaram a área de contribuição e a declividade(Figura 2.9). Esta correlação indica correspondência com análises observadas em outros estudos de deslizamentos e escoamento superficial onde a transição de áreas com e sem canais é definida por limites impostos pelos parâmetros topográficos analisados. Com os valores limite de área de contribuição (A), unidade de contorno (b) e de declividade (S), das áreas com e sem canal, aplicou-se a equação 2.4 (abaixo) onde foi encontrado o valor de 200m,para o limite superior onde ocorre o início dos canais, e o valor de 25m, para o limite inferior das áreas de vales não canalizados.

$$\frac{A}{b} S^2 \quad (\text{eq. 2.4})$$

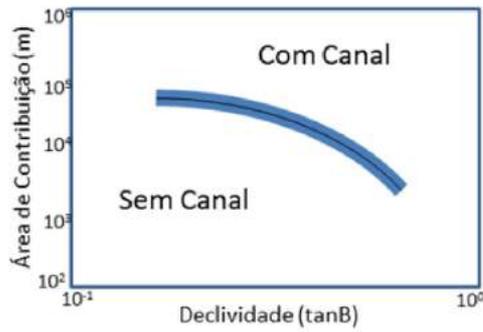


Figura 2.9 Limiar de erosão (Adaptado de MONTGOMERY e DIETRICH, 1992)

A relação de dissecação da paisagem pelo escoamento e a iniciação de canais é de difícil análise empírica, pois o clima e o uso do solo afetam sua localização dificultando a demonstração de um equilíbrio (MONTGOMERY e DIETRICH, 1992).

Dietrich et al (1993) analisa as 3 principais teorias de iniciação de canais: Modelo de escoamento; Limiar de estabilidade de declive; e limiar de erosão por saturação de escoamento superficial. No modelo de escoamento, onde a intensidade de precipitação não excede a capacidade de infiltração, o escoamento subsuperficial ocorre após a saturação do solo. Este escoamento existe quando a proporção de área de contribuição excede a relação de transmissividade e precipitação em determinada declividade expressa pela equação 2.5.

$$\frac{a}{b} \geq \frac{T}{q} S \quad (\text{eq. 2.5})$$

onde a/b é a área de contribuição, T é a transmissividade, q é a precipitação e S é o seno da declividade.

O limiar de estabilidade de declive consiste no entendimento de que a pressão da água nos poros reduz a força de fricção do solo ao ponto que a tensão de cisalhamento devido ao peso declive do solo exceda a força. A proporção neste caso é a mesma dada pelo modelo de escoamento acrescentada a variável de densidade do solo (ρ_s) e da água (ρ_w), equação 2.6.

$$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \frac{T}{q} S \quad (\text{eq. 2.6})$$

Por fim no limiar de erosão por saturação, o transporte de sedimento varia em relação a tensão de cisalhamento. Uma vez que a tensão de cisalhamento crítica (τ_c) é excedida o fluxo forma o canal, essa relação é expressa para fluxo turbulento, equação 2.7, e fluxo

laminar, equação 2.8, onde ν é viscosidade cinemática, k é uma constante para determinada rugosidade e g é a aceleração gravitacional.

$$\frac{a}{b} \geq \frac{1,4\tau_c^{\frac{3}{2}}}{\rho_w^3 K \nu g^2 S^2 q} + \frac{T}{q} S \quad (\text{eq. 2.7})$$

$$\frac{a}{b} \geq \frac{2\tau_c^{\frac{3}{2}}}{\rho_w^3 K \nu g^2 S^2 q} + \frac{T}{q} S \quad (\text{eq. 2.8})$$

No intuito de comprovar as relações existentes no limiar de escoamento, em uma bacia ao norte da Califórnia (EUA), Dietrich et al (1993) verificaram uma correlação entre a área de contribuição e declividade para a definição de formas do relevo e iniciação de canais (Figura 2.10).

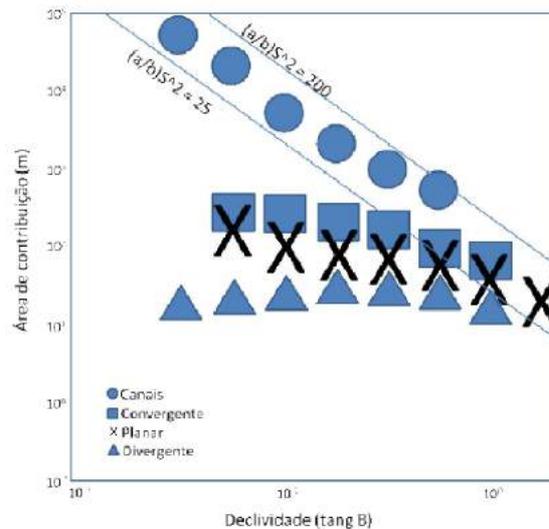


Figura 2. 10Relação área de contribuição e declividade (modificadode: DIETRICH et al, 1993)

Deste modo, verifica-se que usualmente a relação área de contribuição e declividade é utilizada para demonstrar os efeitos do relevo e extensão das áreas mais propensas a atingirem o estado de saturação hídrica do solo e, conseqüentemente a distribuição das zonas mais propícias há saturação (MOORE et al., 1993).

Vandekerckhove (1998) utilizou o IT e o limiar de erosão para prever a localização de canais efêmeros em áreas com intensa atividade agrícola, no sudeste da Espanha e no

nordeste de Portugal. Nestes casos, os modelos individualmente não foram suficientes para descrever a tendência das áreas estudadas sendo necessárias informações complementares do ambiente, como curvatura e direção de fluxo das áreas de lavoura. Atribuíram a falta de correlação com as áreas analisadas por se tratarem de índices que se fundamentam na formação de canais como consequência da tensão exercida pelo escoamento superficial, o que não se aplica a área de estudo pois, o uso do solo com intensa atividade agrícola altera não só a direção do fluxo, mas as características inerentes ao solo.

No município de São Pedro – SP, Araújo (2011) buscou limiares para identificação de canais efêmeros diferenciando-as pela profundidade considerando a relação dos atributos de declividade e área de contribuição. No caso os índices encontrados foram $S=0,0219A^{-0,376}$ para canais profundos e $S=0,0128A^{-0,443}$ para canais rasos.

Torri et al (2012) aplicaram o limiar de escoamento proposto no trabalho de Montgomery e Dietrich (1992) para a predição de início de canais na bacia EsaroCrotonena Calábria, Itália. Foram selecionadas amostras para a validação de dados in loco. A validação do modelo e avaliação de seu desempenho foram realizadas por fotointerpretação de voos de baixa altitude. Os resultados indicaram que a aplicação do limiar foi satisfatória, no entanto, atribuíram a necessidade de compartimentação da análise considerando a relação com a rocha matriz, a dispersibilidade do solo e a vegetação, para uma melhor definição dos limiares em cada caso.

2.4 GEOAMBIENTES

A cartografia geomorfológica é um instrumento que espacializa dados geomorfológicos para representar a gênese das formas do relevo, suas relações com a estrutura e processos. A morfometria, por sua vez, procura representar informações métricas do relevo baseadas principalmente em cartas topográficas (TRICART, 1965).

Os atributos morfométricos mais utilizados consistem na altimetria e os produtos provenientes de sua derivação, como: primeira derivada (declividade e aspecto) e segunda derivada (curvaturas). Entre estes atributos de terreno, a altimetria caracteriza-se por ser uma superfície suavizada evidenciando fragmentos homogêneos relativamente maiores que a declividade e a curvatura. A declividade representa a taxa de variação espacial da altimetria que permite salientar as quebras no relevo. Por fim, as curvaturas representam uma taxa de

variação espacial da declividade ou aspecto evidenciando um detalhamento das informações anteriores (VASCONCELOS et al, 2012).

Em estudos de compartimentação da topografia a curvatura vertical tem sido apontada como uma variável utilizada na identificação de unidades homogêneas devido a sua correlação com o substrato e processos de formação do relevo. A curvatura vertical está relacionada aos processos de migração e acúmulo de matéria, proporcionados pela gravidade. Por este mecanismo, atua indiretamente no equilíbrio entre os processos pedogenéticos/morfogenético, além de influenciar a distribuição local do regime hídrico e, conseqüentemente, o regime térmico. Por meio de uma reclassificação é possível transformar a curvatura calculada em classes (convexo, côncavo e retilíneo) onde valores positivos correspondem a terrenos convexos (vertical-aceleração/horizontal-divergente), os negativos a terrenos côncavos (vertical-desaceleração/horizontal-convergente) e os valores nulos indicam vertentes retilíneas (VALERIANO, 2004).

Logo, com o intuito de facilitar o processamento dos atributos topográficos morfométricos na análise da paisagem vem sendo utilizada uma técnica denominada classificação automática. Essa técnica é proveniente do sensoriamento remoto, onde as classes são definidas automaticamente por um algoritmo de classificação. A identificação e distribuição dos objetos imageados nas várias bandas de um sensor contemplam um grande volume de dados sendo necessária a aplicação de técnicas automáticas de análise. Essa classificação pode ser feita por meio de uma composição colorida que basicamente atribui as cores primárias (vermelha - R, verde - G e azul - B), a três bandas espectrais quaisquer, a depender das feições que se deseja realce para a análise (LILLESAND e KIEFER, 1987).

Para sintetizar a grande quantidade de informações em uma única imagem a associação de canais de cor por meio de uma composição colorida permite definir padrões tonais e texturais que caracterizam ambientes distintos (BORGES et al, 2007). Os mapas derivados tais como aspecto, declividade, área de contribuição, curvatura mínima entre outros, combinados permitem a geração de imagens coloridas que têm sido utilizadas para realçar os parâmetros morfométricos na discriminação de unidades do relevo (CÁRDENAS, 1999).

Farias (2008) utilizou dados morfométricos na definição de porções do relevo no intuito de mapear os solos no Parque Nacional de Brasília. Para a compartimentação do relevo ele confeccionou um MDT por meio de curvas de nível e hidrografia utilizando o TOPOGRID de Hutchinson, (1989) na interpolação. Os atributos morfométricos derivados do

MDT foram dispostos na seguinte composição colorida: altimetria (R), Declividade (G) e Área de Contribuição (B). Foi utilizada uma árvore de decisão onde o histograma de frequência do MDT permitiu a definição dos critérios para a classificação das unidades geomorfológicas em chapada, depressão e escarpa.

Lima et al (2009), por sua vez, processaram imagens obtidas pelo sensor SRTM por meio de remoção de ruídos, como vórtices e picos na imagem, aplicando-se filtro de mediana e interpolando os dados por meio de krigagem para a obtenção de um mapa de altimetria da Bacia do Alto do Rio Preto, GO. A partir dessa imagem, gerou atributos morfométricos utilizados em uma composição colorida: altimetria (R), declividade (G) e aspecto (B). Essa composição possibilitou a identificação de unidades geomorfológicas pela diferenciação de cor e textura. Em seguida, realizaram um refinamento pela análise visual do MDT com sombreamento e uma análise estatística dos dados de altimetria e declividade para a compartimentação da paisagem em 3 níveis: (1) planalto retocado, (2) planalto retocado do DF e do alto do rio Preto, e (3) topos de chapada, degraus estruturais, superfícies tabulares, planícies fluviais e vales encaixados.

Vasconcelos et al (2012) utilizaram atributos morfométricos em uma composição colorida para a classificação do relevo obtendo melhores resultados com a seguinte composição: altimetria no canal do Vermelho (R), declividade no canal do Verde (G) e mínima curvatura no canal do Azul (B). Em seguida, por interpretação visual identificaram três ambientes geomorfológicos variando do Rosa (ambientes mais planos), passando pelo Azul (ambientes mais dissecados) até chegar ao verde (ambientes mais íngremes). Com o emprego de técnicas de reconhecimento de padrões, a partir de métodos estatísticos multivariados, atribuíram uma “assinatura geomorfolométrica” que descreve os atributos de terreno presentes em uma determinada forma de terreno capaz de distinguir as diferentes paisagens. Cada unidade do terreno (célula de grade) é descrita por um espectro (curva dos atributos de terreno) que podem ser comparadas com as formas de relevo (assinaturas).

Sena-Souza et al. (2013) caracterizaram a geomorfologia da BHRSB utilizando dados altimétricos para extração de parâmetros morfométricos. Pela combinação desses parâmetros foi produzida uma composição colorida RGB com a altimetria em R, a declividade em G e a curvatura mínima em B. Com base nessa composição as unidades do relevo foram mapeadas por meio de vetorização digital de acordo com os padrões expostos na tabela 2.4 e de histogramas de frequência das características morfométricas de cada unidade (figura 2.11).

Tabela 2. Unidades Geomorfológicas em Composição Colorida de dados altimétricos na BHRSB (Modificado de: SENA-SOUZA et al, 2013).

Unidades Geomorfológicas	Características	Cor
Chapada	Áreas elevadas com relevo plano a suave-ondulado, característico das chapadas.	Vermelha
Chapada, Frente de Recuo Erosivo, Rampa de Colúvio	Transição de uma Chapada para uma rampa de colúvio. Relevo suave-ondulado, porém, em altitudes inferiores as cores vermelhas	Roxa
Chapada, Frente de Recuo Erosivo, Depressão Dissecada	Representa a ruptura do relevo separando e/ou uma chapada mais rebaixada de uma depressão ressecada	Verde
Mesa, Frente de Recuo erosivo, Depressão Dissecada	Mesmo padrão de relevo de chapada, porém é caracterizada como mesa por estar cercada por todos os lados pela frente de recuo em verde.	Roxo/Verde
Depressão Dissecada	Relevo acidentado com colinas (roxo/verde) e vales encaixados (Azuis), caracterizando a depressão dissecada.	Roxo/Verde /Azul

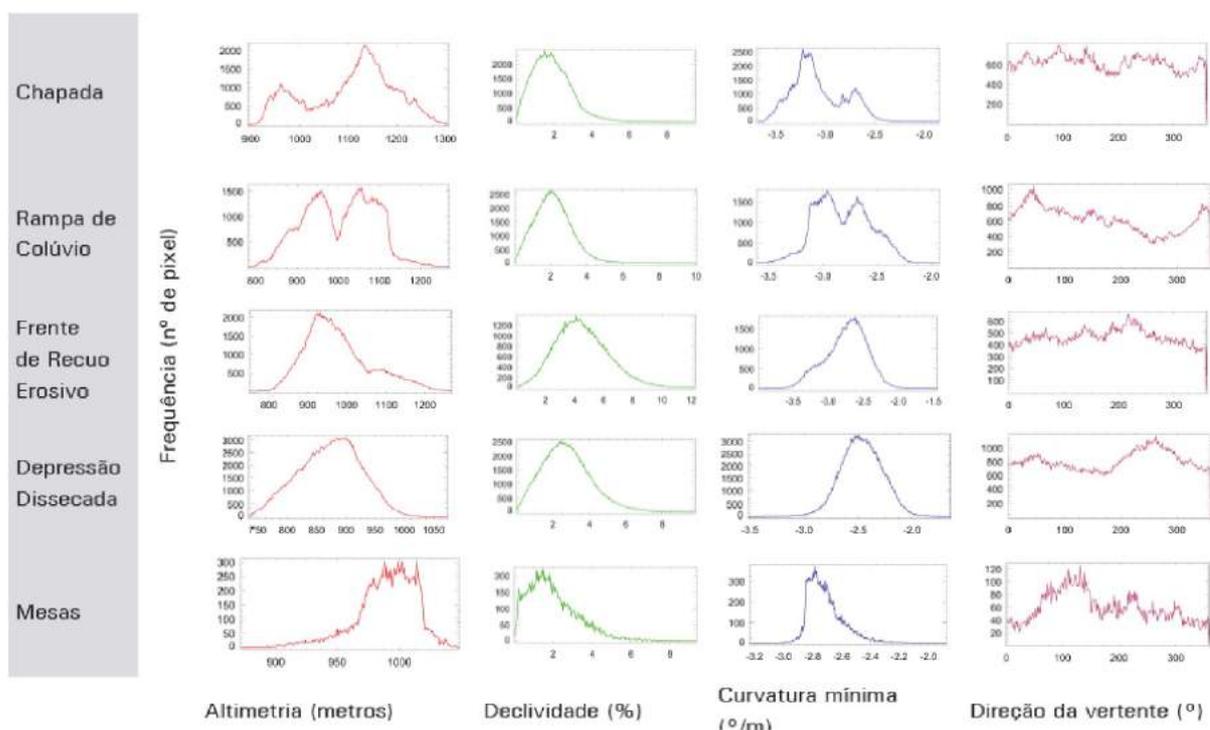
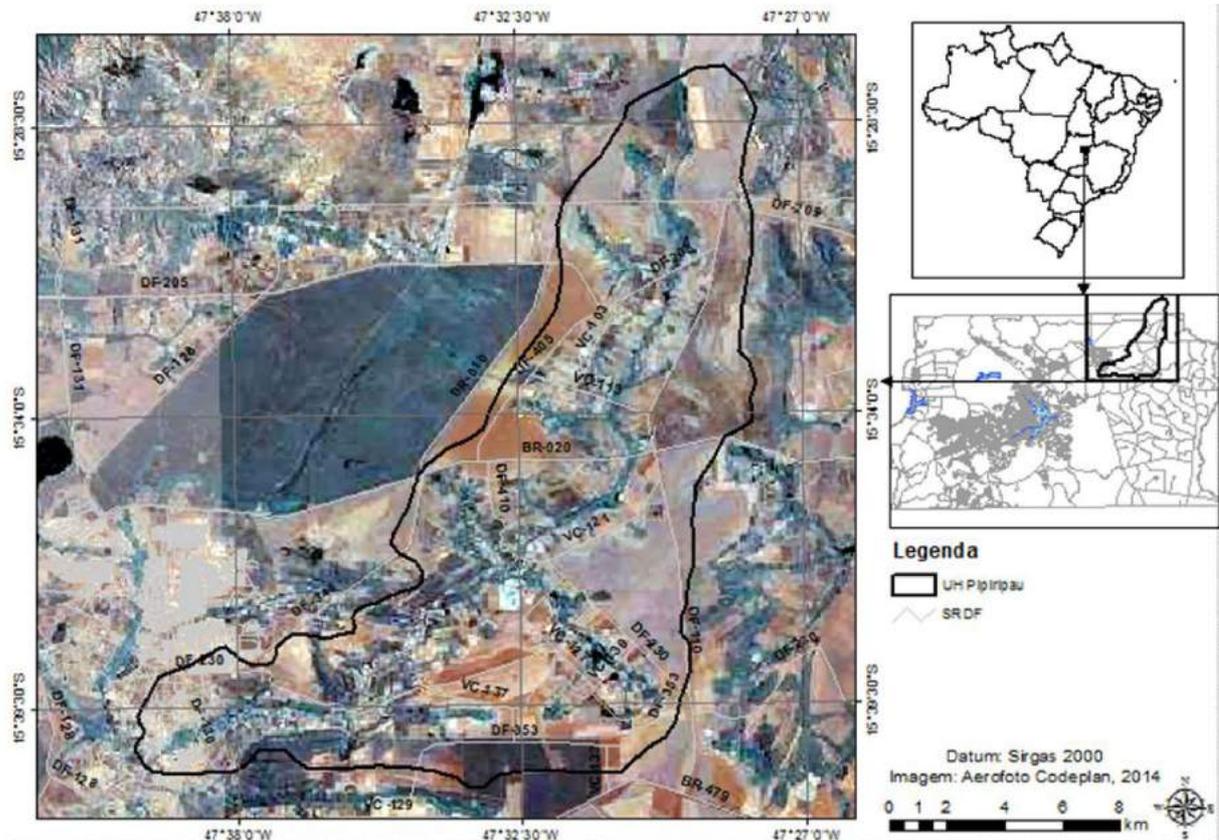


Figura 2. 11Histograma de frequência de parâmetros morfométricos na BHRSB (SENA-SOUZA et al., 2013).

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Unidade Hidrográfica (UH) do Pípiripau está localizada no extremo nordeste do DF (Figura 3.1) na Região Administrativa Planaltina (RA – VI) e possui área de 23.527 ha sendo 90,3% dentro do território do DF. O Rio Pípiripau possui 44 km desde a nascente até a foz (ANA, 2010).



As rochas predominantes que ocorrem na UH do Pípiripau são metarritmitos, quartzitos e ardósia, pertencem ao Grupo Paranoá (Figura 3.2) que compõe 65% do DF (CAMPOS, 2004), sendo bem representativa no aspecto geológico. A escolha da UH justifica-se também por possuir insumos necessários   análise e características ideais para a revitaliza o ambiental: tamanho adequado, características rurais, monitoramento hidrológico (série histórica de mais de 30 anos), alto grau de degrada o ambiental, capta o de água para abastecimento público e conflito pelo uso da  gua. Nesta  rea o Governo Federal subsidia o Programa Produtor de água, por meio da Agência Nacional de  guas (ANA), que tem como objetivo a revitaliza o ambiental de bacias hidrográficas.

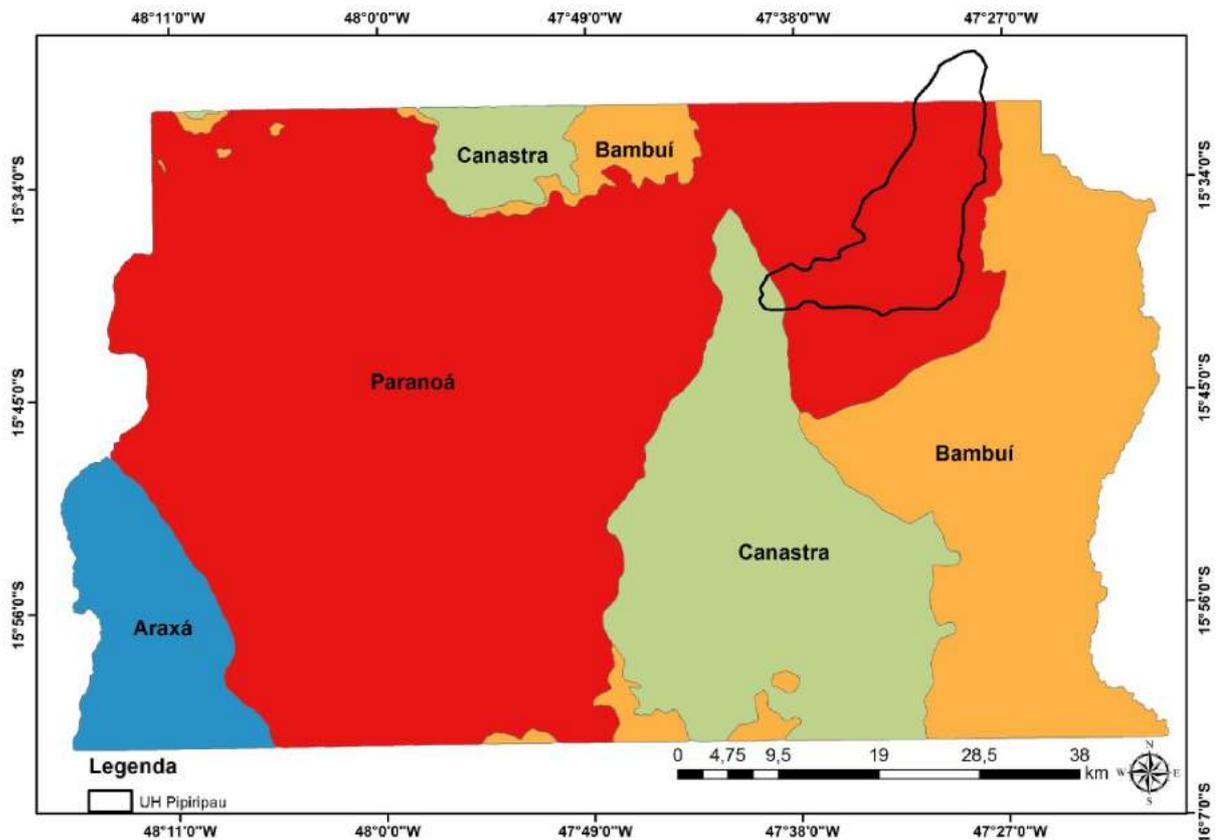


Figura 3. 2 Geologia no DF com detalhe na UH do Pipiripau (Modificado de: CAMPOS, 2004)

A precipitação anual média é de 1.600 mm e clima tropical úmido de savana com inverno seco (Aw) e com variação local com clima tropical de altitude (Cwa e Cwb) segundo a classificação de Köppen. A compartimentação geomorfológica da área inclui chapadas, depressão dissecada, frente de recuo erosivo e rampa de colúvio (Figura 3.3) (SENA-SOUZA et al., 2013).

Segundo o mapa pedológico da Embrapa (REATTO et al., 2004), a área em análise possui Neossolos Quartzarênicos, Cambissolos, Nitossolos, Solos Hidromórficos, Plintossolo Háplico e Latossolos, sendo que este último representa 83% da área da UH (Figura 3.4). Consequentemente predomina na unidade solos intemperizados com minerais do grupo da caulinita, óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos de Fe e Al como hematita, goethita, gibbsita e outros tendo o quartzo como mineral residual de alteração (REATTO et al., 2004).

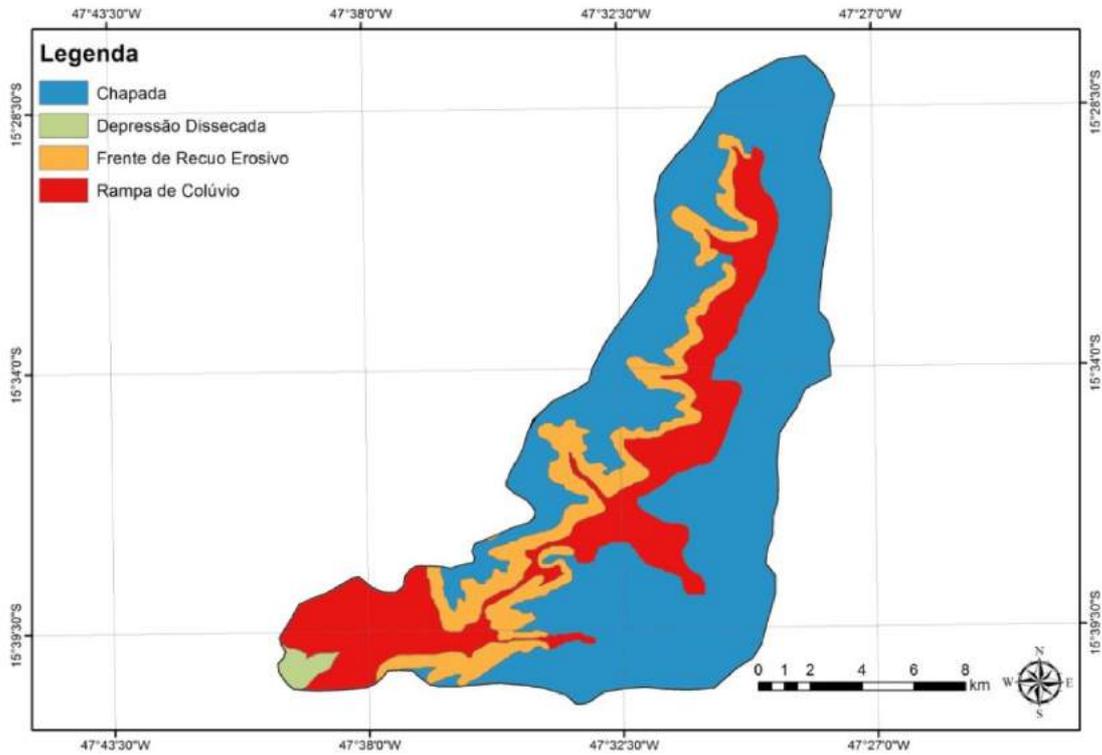


Figura 3. 3Compartimentação geomorfológica na UH do Pipiripau (Modificado de: SENA-SOUZA et al., 2013)

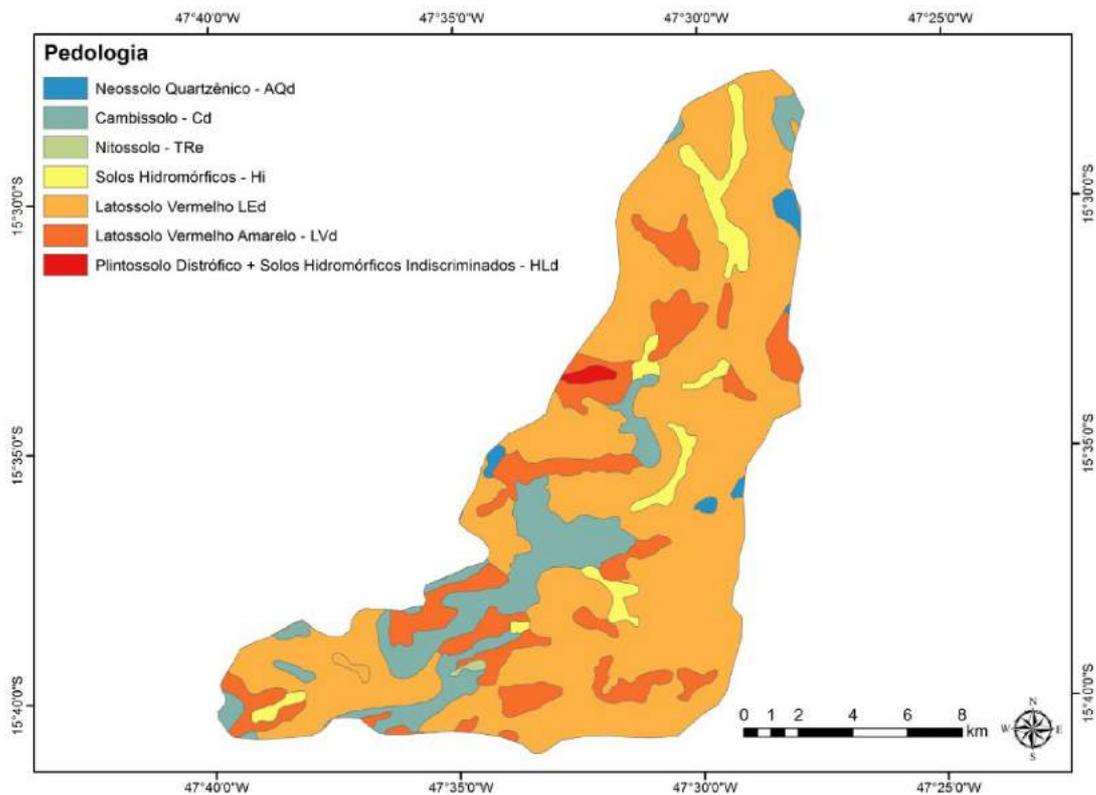


Figura 3. 4Pedologia na UH do Pipiripau – DF (Modificado de: REATTO et al., 2004)

Por possuir essa diversidade pedológica, a cobertura natural predominante é o cerrado ralo e as matas de galeria. No entanto, verifica-se também a ocorrência do campo sujo úmido e seco, campo sujo com murundus, veredas, campo limpo e mata seca (mas é pequeno percentual na área). A área foi predominantemente convertida para a agricultura com um pequeno trecho a sudoeste da bacia com ocupação urbana (Figura 3.5).

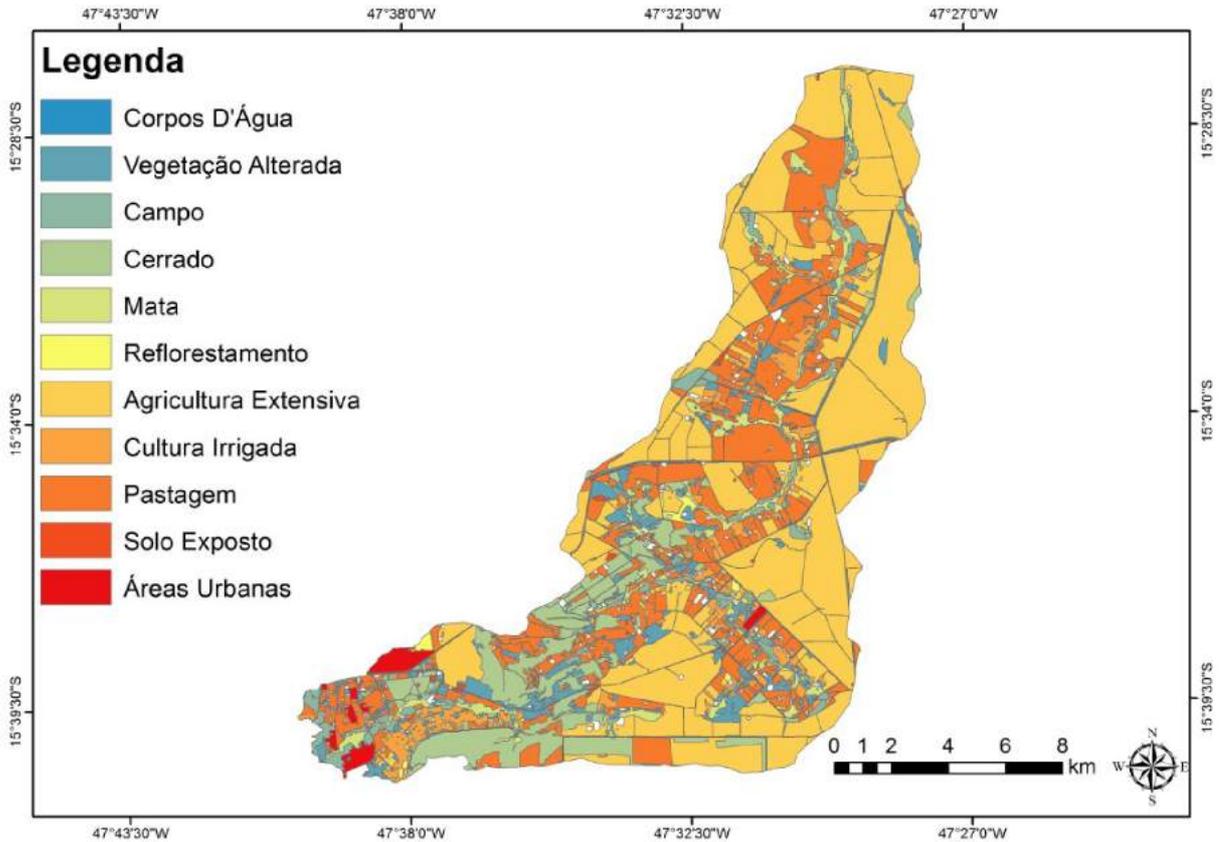


Figura 3. 5 Uso do solo na UH do Pipiripau (Modificado de: ANA, 2010)

4. METODOLOGIA

A metodologia possui 4 etapas: (a) vistorias in loco; (b) elaboração de um modelo hidrologicamente corrigido; (c) geoambientes; (d) modelagem de parâmetros morfométricos utilizando a relação entre área de contribuição e declividade.

4.1 VISTORIAS

Foram feitas vistorias na área de estudo por um ano hidrológico (2013 - 2014) com frequência trimestral para a diferenciação dos canais quanto a sua perenidade. Com os resultados das verificações in loco foi feita uma classificação da drenagem para a espacialização dos dados correspondendo a verdade de campo.

4.2 MDT HIDROLOGICAMENTE CORRIGIDO

O MDT foi elaborado por meio da ferramenta “Topo toRaster” do ArcGis a partir da interpolação das curvas de nível com equidistância de 5 m, pontos cotados e drenagem disponibilizados pela Terracap de levantamento realizado em 2010.

Para a obtenção deste pelo interpolador foi necessário corrigir a direção de drenagem e ajustar alguns parâmetros no interpolador para eliminar o “efeito escada” que pode inferir num perfil topográfico errôneo interferindo significativamente no resultado dos mapas derivados a serem utilizados nas análises aqui propostas (FREITAS, 2012).

O número máximo de interações estipulado no programa é de 40, sendo que para o trabalho foi utilizado 45 no intuito de limpar pequenas depressões. O parâmetro “roughnesspenalty” foi preenchido com o valor 0 para suavizar a interpolação, a intensidade dessa suavização é ajustada no parâmetro “discretisationerrorfactor” e o fator que apresentou melhor resultado foi 1,5. Por fim, a ferramenta possui dois campos denominados tolerância 1 e tolerância 2, onde a primeira implica na acurácia e densidade dos pontos de elevação em relação a drenagem e a segunda previne que a drenagem ultrapasse barreiras com altitudes irreais. Por padrão para dados de curvas de nível (feição linha), o valor de tolerância 1 é ajustado para 2,5 e tolerância 2 para 100.

A utilização dos valores citados é essencial para a retirada de falsas elevações do terreno que interferem nos atributos de terreno. Outra forma de prevenir a dispersão do fluxo é o preenchimento das imperfeições nos dados, para isso foi utilizada a ferramenta “Pit remove”

no TAUDEM do ArcGis.Tendo introduzido informações sobre as localizações de rede de drenagem e corrigidasas depressões artificiais e a direção de fluxo de hidrografia, o resultado é um MDT hidrológicamente corrigido que servirá de insumo aos mapas derivados.

4.3 GEOAMBIENTES

A compartimentação dos geoambientes foi feita com a técnica de composição colorida dos atributos do terreno (Figura 4.1). Sena-Souza et al (2013) adotaram uma composição colorida RGB do relevo (altimetria-R, Declividade-G, Curvatura mínima-B) para delimitar as unidades geomorfológicas da BHRSB por meio de vetorização digital em tela, que consiste na identificação e interpretação dos padrões de cores e texturas na imagem. Nesta pesquisa o mapeamento de Sena-Souza et al. (2013) foi aperfeiçoado da escala de 1:100.000 para 1:10.000.

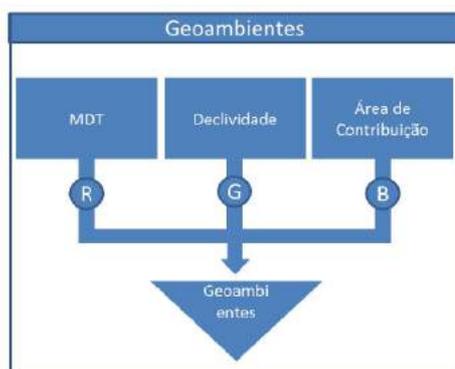


Figura 4. 1Fluxograma de mapeamento dos geoambientes.

4.4 MODELAGEM DE PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS

4.4.1 Declividade

O mapa de declividade em graus pode ser dividido nas seguintes classes: plano (0° a $2,9^{\circ}$); suave ondulado ($2,9^{\circ}$ a $5,7^{\circ}$); ondulado ($5,7^{\circ}$ a $8,5^{\circ}$); muito ondulado ($8,4^{\circ}$ a 14°); forte ondulado (14° a 25°); uso restrito (25° a 45°); e acima de 45° .As duas últimas classes representam o relevo escarpado e são de uso restrito e APP respectivamente, conforme a resolução CONAMA 387/06 e Lei 12.651/2012. No entanto, para a aplicação dos modelos de limiar de escoamento e índice topográfico a declividade deve estar em radiano para o cálculo de sua tangente.

4.4.2 Direção de Fluxo e Área de contribuição

O algoritmo de área de contribuição utilizado foi o proposto por Quinn et al (1991) de fluxo múltiplo (MS – multipledirectionsbasedonslope), em que o percentual de fluxo transferido para cada célula à jusante é proporcional ao produto da distância de fluxo acumulado e ao fator de peso geométrico. Este método permite o particionamento do fluxo entre dois ou mais representando de forma adequada o real comportamento de distribuição do fluxo.

4.4.3 Modelos Topográficos

A equação proposta por Dietrich e Montgomery (1992)(equação 2.4)foi utilizada para identificar se existe um valor limiar que identifique o início dos canais perenes e intermitentes, bem como um limiar que identifique a formação de canais efêmeros.

O IT (equação 2.2)foi utilizado na definição da probabilidade de saturação e validado com dados de campo.O cálculo das equações em análise foi realizado na ferramenta “rastercalculator” do ArcGisa partir dos insumos de declividade e área de contribuição (Figura 4.2).

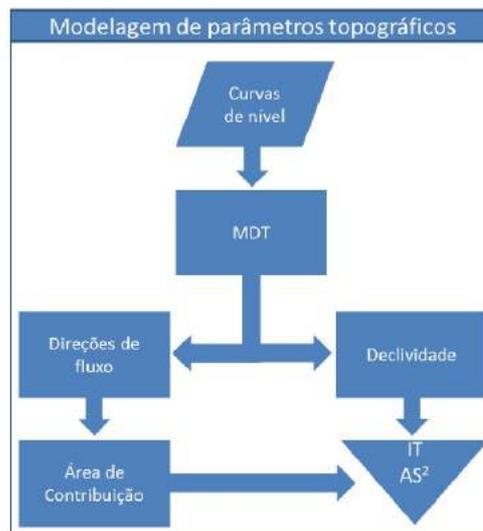


Figura 4. 2 Fluxograma da modelagem dos parâmetros topográficos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VISTORIAS

Por meio de vistorias *in loco*, em um ano hidrológico (2013 - 2014), foi possível diferenciar os canais onde ocorrem escoamento superficial dos cursos d'água Perenes e Intermitentes na UH do Pipiripau (Figura 5.1). Foi possível distinguir os ambientes em que ocorrem o escoamento com os dados espacializados de diferenciação comprovados *in loco*.

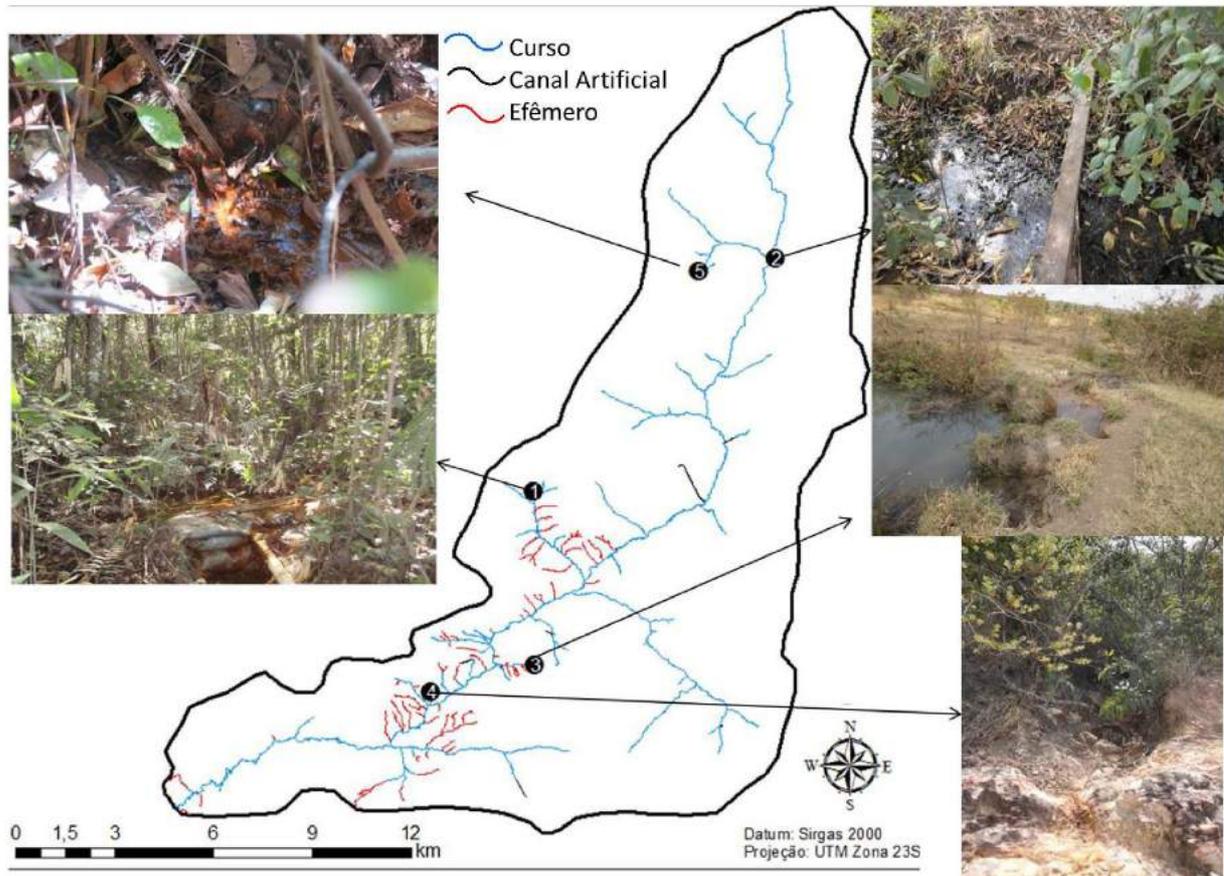


Figura 5.1 Diferenciação de canais *in loco*. (1) nascente; (2) área permanentemente brejosa de vereda que configura um curso até o rio Pipiripau; (3) nascente; (4) efêmero; (5) nascente.

Foram identificados 119 canais efêmeros que equivalem a uma extensão total de 40,2 km e estão localizadas preferencialmente à margem leste do Ribeirão Pipiripau, do seu centro para a parte inferior da bacia. Com relação aos canais intermitentes foram identificados 42 canais que correspondem a uma extensão de 18,66km.

Os cursos d'água Perenes na UH do Pipiripau totalizam 37 segmentos com extensão total de 93,38 km. A área é bem drenada contendo dentro de seus limites vários rios, ribeirões

e córregos. A frequência de canais por tipo na UH do Pípiripau pode ser visualizada na tabela 5.1 a seguir:

Tabela 5. 1 Frequência de canais por tipo na UH do Pípiripau

Tipo	Perene	Intermitente	Efêmero	Total
Quantidade	37	42	119	198

5.2 MDT HIDROLOGICAMENTE CORRIGIDO

A altimetria na UH do Pípiripau varia de 889 a 1228 m (Figura 5.2). A construção de um MDT hidrologicamente corrigido consiste basicamente na correção das direções de fluxo da hidrografia, adaptação dos parâmetros default do programa ao dado utilizado (vide item 4.1) e na correção de imperfeições provenientes da interpolação pelo preenchimento de sulcos e picos. Assim, os mapas derivados correspondem melhor a realidade permitindo resultados mais fidedignos, pois o fluxo não é redirecionado em imperfeições no perfil produzidas pelo “efeito escada” ou por depressões e picos inexistentes.

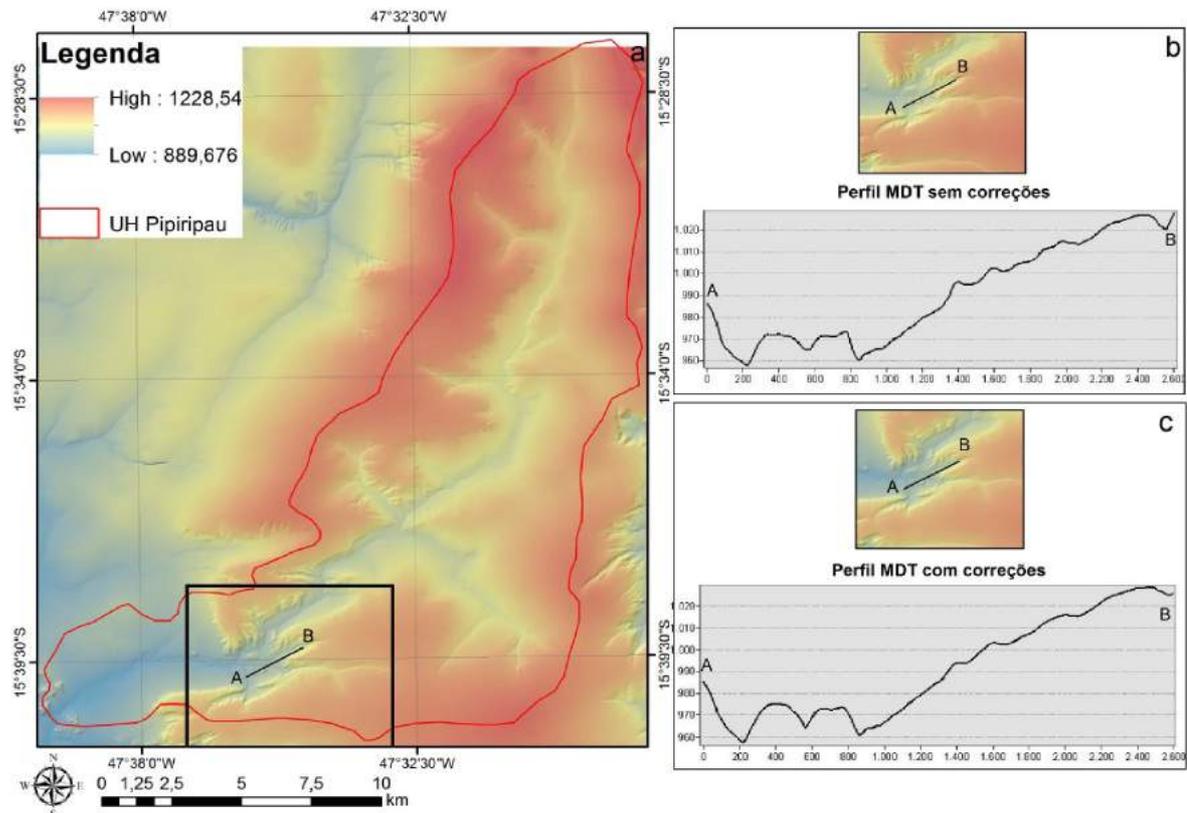


Figura 5. 2(a)Modelo Digital do Terreno da UH do Pípiripau com indicação de perfil topográfico A-B; (b) Perfil topográfico A-B sem correções; (c) Perfil topográfico A-B com correções.

A figura 5.2 indica ainda o perfil de um MDT sem as correções realizadas e o perfil de um MDT com os processamentos realizados neste. Apesar de não haver no perfil diferenças perceptíveis a diferença da utilização deles como insumo pode ser verificada no processamento dos dados derivados nos itens posteriores.

5.3 PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS

A declividade (Figura 5.3) na UH Pipiripau varia de 0 a 63°. As maiores declividades se encontram ao sul da UH Pipiripau e a Leste do Ribeirão Pipiripau

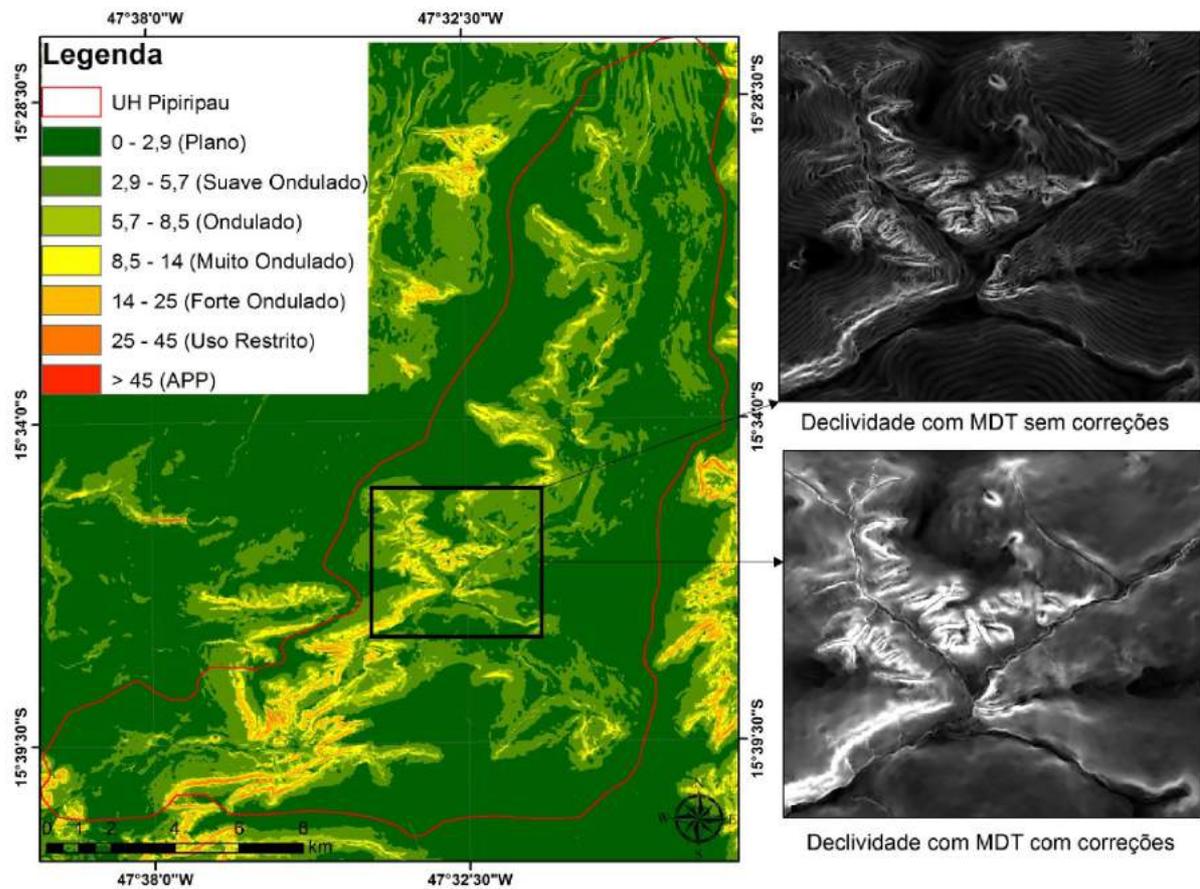


Figura 5.3 Declividade na UH do Pipiripau.

A figura 5.3 apresenta em detalhe a declividade na UH do Pipiripau derivada de MDT com e sem correções. Nota-se que com o MDT sem as devidas correções, apresenta imperfeições notórias na imagem conhecidas como “efeito escada” que devem ser corrigidas para que as análises hidrológicas não fiquem comprometidas. No detalhe referente ao MDT hidrológicamente corrigido não ocorrem tais imperfeições.

A área de contribuição (Figura 5.4) apresentou variação de 0,3 a 7,8(log de 10). A ocorrência dos maiores valores deu-se próximo às redes de drenagem e os menores valores no topo de áreas escarpadas.

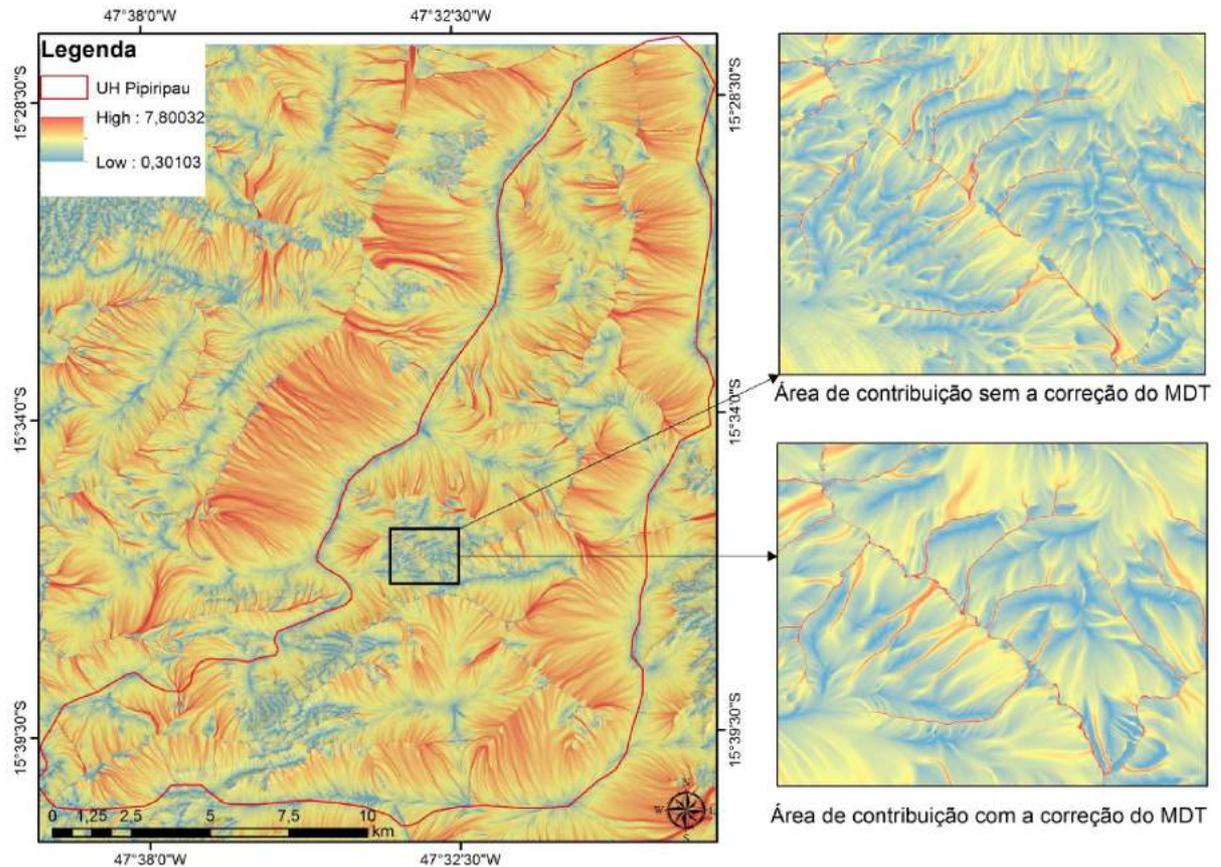


Figura 5.4 Área de Contribuição(log de 10) na UH do Pipiripau.

A figura 5.4 apresenta em detalhe a área de contribuição feita a partir de um MDT sem as correções aqui propostas. Neste, nota-se que há um reparticionamento do fluxo que acarreta em menores áreas de contribuição nos trechos com canais. Essa distribuição repartida advém de picos e depressões que criam barreiras na direção do fluxo e conseqüentemente na área de contribuição. Logo, a área de contribuição é distribuída de forma desigual no relevo não representando a real contribuição no ponto específico. A área de contribuição com MDT hidrologicamente corrigido representa melhor a realidade.

5.4 GEOAMBIENTES

Com a drenagem mapeada foi feita uma distribuição percentual de sua ocorrência na bacia com relação aos solos (Figura 5.5 e Figura 5.6). Esta distribuição considera toda a extensão dos canais em análise. Na ocorrência de canal em duas ou mais classes de solo esta extensão foi particionada e considerada em cada classe a extensão que faz parte.

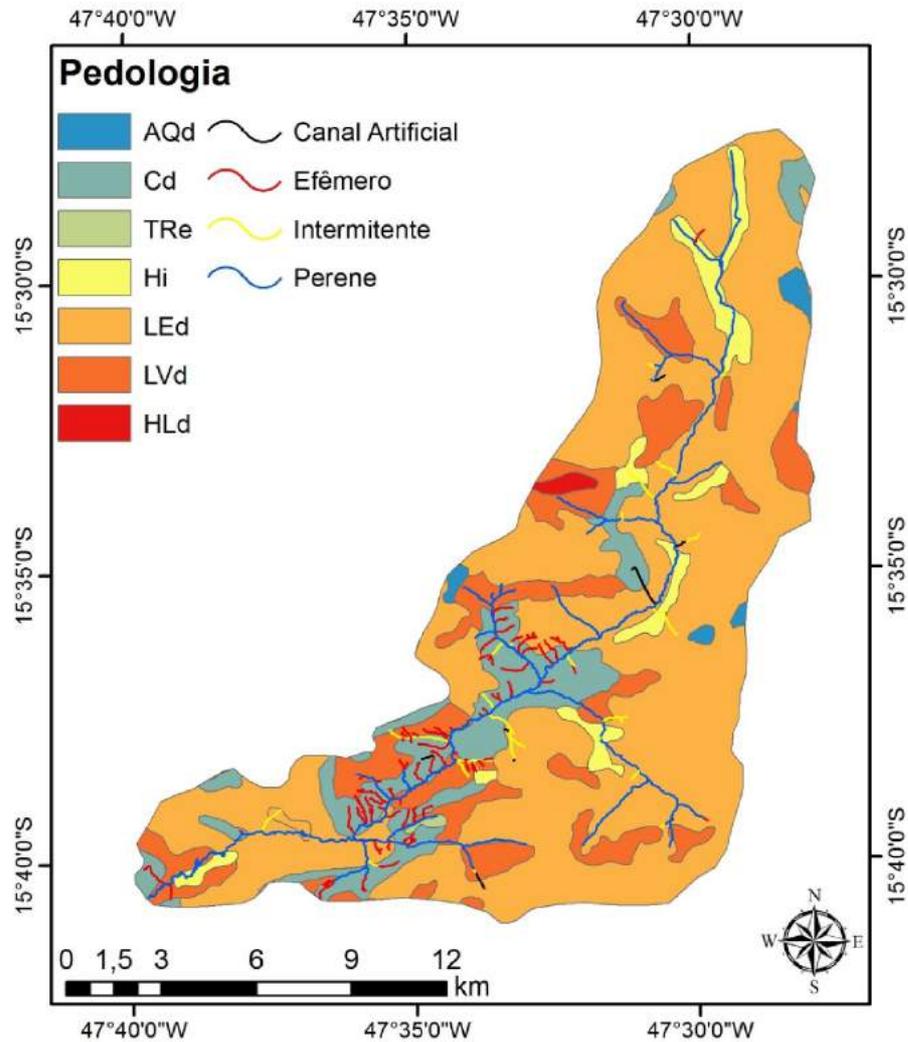


Figura 5. 5 Solos na UH do Píripau e classificação de canais.

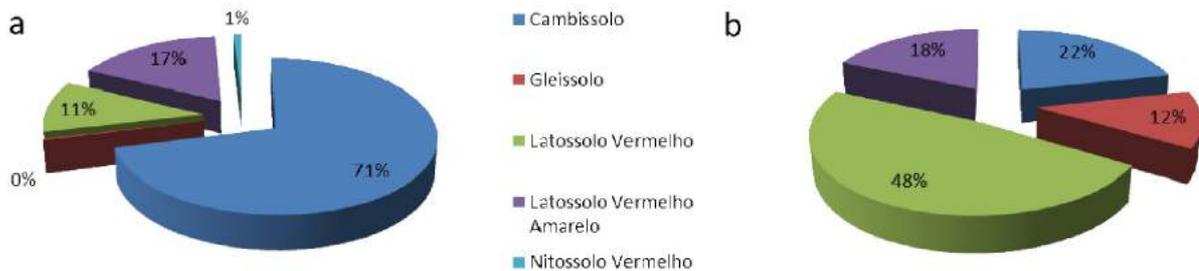


Figura 5. 6 Gráficos de ocorrência de canais nos solos. (a) efêmeros; (b) intermitentes e perenes.

Os canais naturais de escoamento superficial (efêmeros) na UH do Pípiripau ocorrem predominantemente em áreas com Cambissolo e eventualmente, na transição de Latossolo Vermelho-Amarelo para Cambissolo.

A composição colorida (Figura 5.7) salientou as seguintes unidades geomorfológicas: Chapada, depressão dissecada, frente de recuo erosivo e rampa de colúvio.

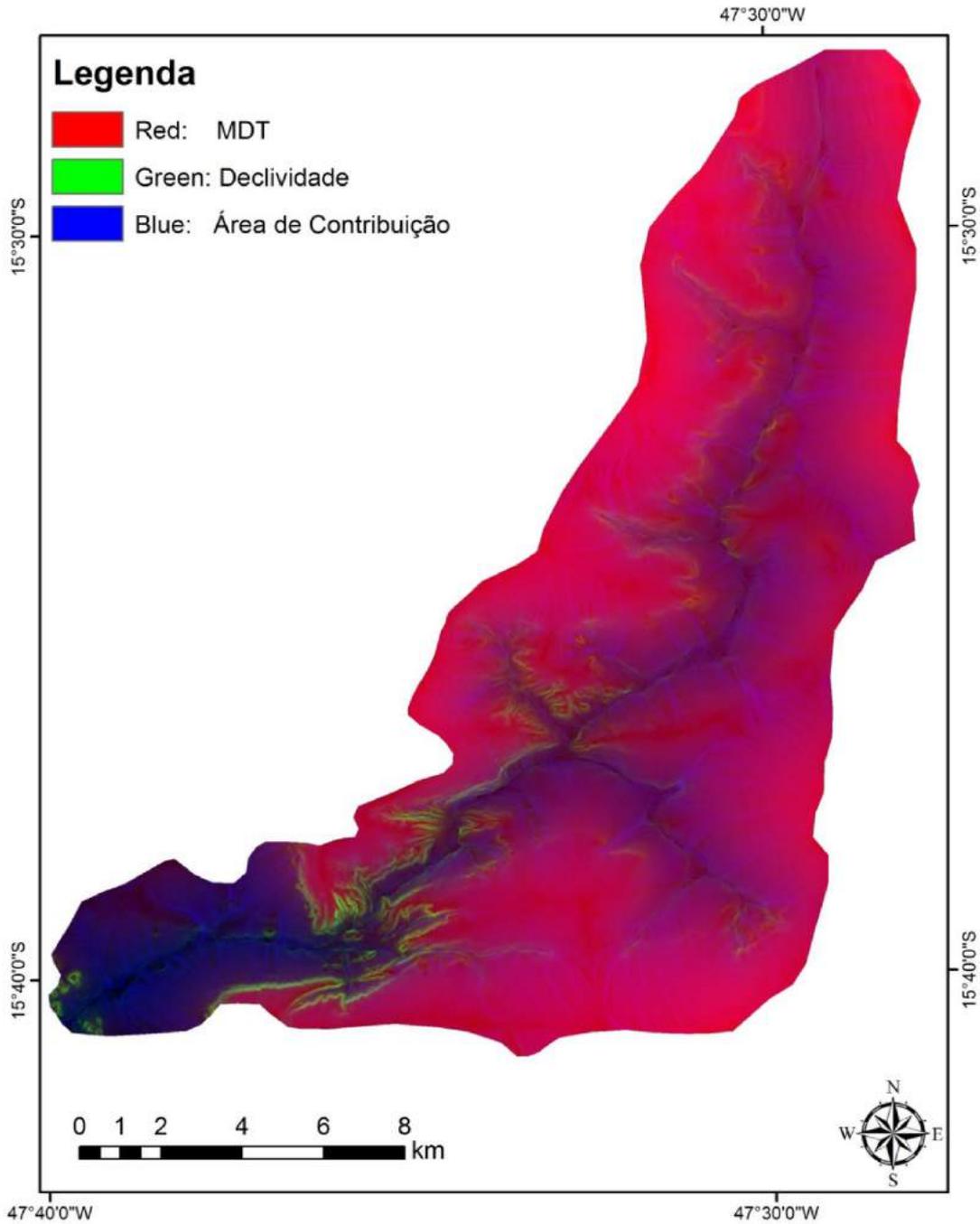


Figura 5.7 Composição colorida (RGB) dos atributos morfométricos (R- altitude; G- declividade; B- área de contribuição) na UH do Pípiripau.

A Chapada compõe a porção com tons avermelhados na composição que representam aproximadamente 64% da UH do Pípiripau e compõem um relevo predominantemente plano na faixa altimétrica de 1100 a 1200m. A transição da chapada para a rampa de colúvio apresentou feições arroxeadas que são caracterizadas por porções do relevo suave-onduladas com variação altimétrica de 1050 a 1150m. Estas representam 22% da UH Pípiripau e estão localizadas entre as Frentes de recuo erosivo e as depressões dissecadas. As porções esverdeadas mostram onde ocorre a ruptura de relevo, característica das frentes de recuo erosivo, que representam as áreas mais escarpadas do relevo com ampla variação de altitude de 900 a 1100m e compõem 12% da UH Pípiripau. As feições azuladas com verde são onde ocorre a depressão dissecada, que ocupa uma pequena parte ao sudoeste da UH (0,9%) possui relevo ondulado e constitui a parte mais baixa da área de estudo em altitude próxima a 890m.

Pela análise das figuras 5.8, 5.9 e 5.10 é possível visualizar as unidades geomorfológicas mapeadas e espacializar a ocorrência dos canais na paisagem.

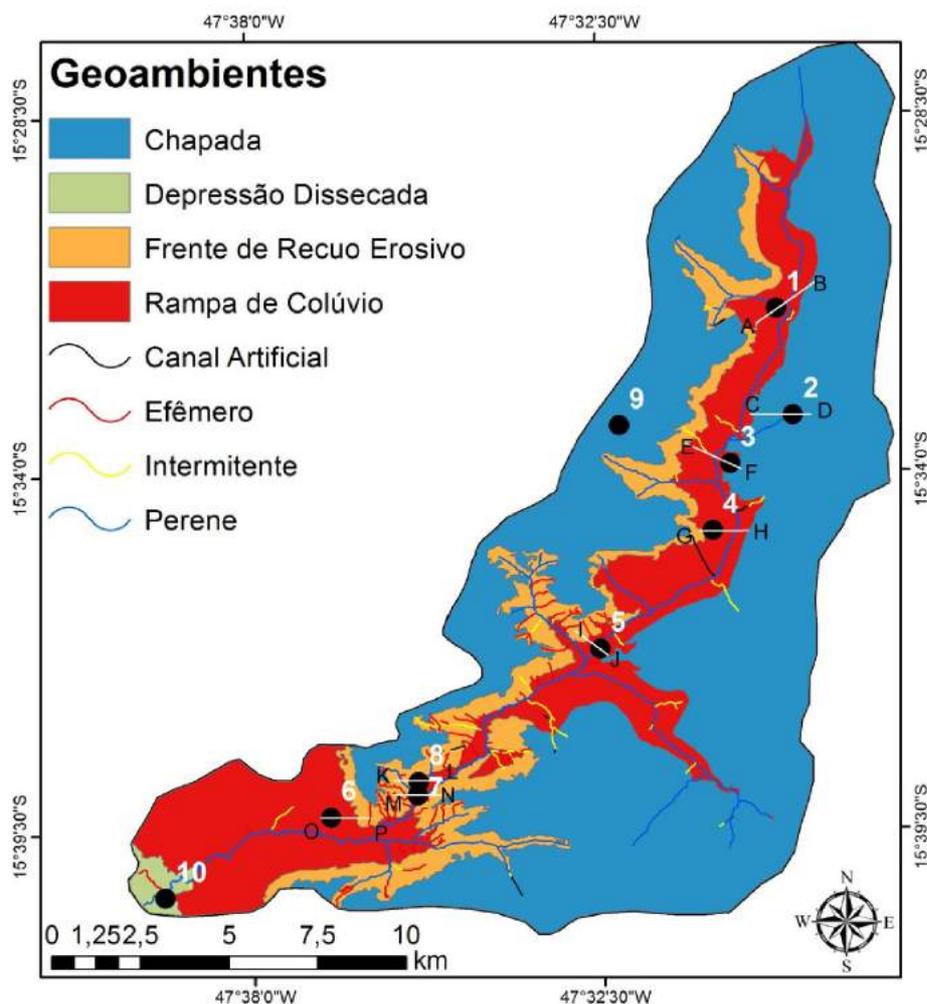


Figura 5. 8 Geoambientes na UH do Pípiripau e indicação de alguns pontos e perfis de análise.

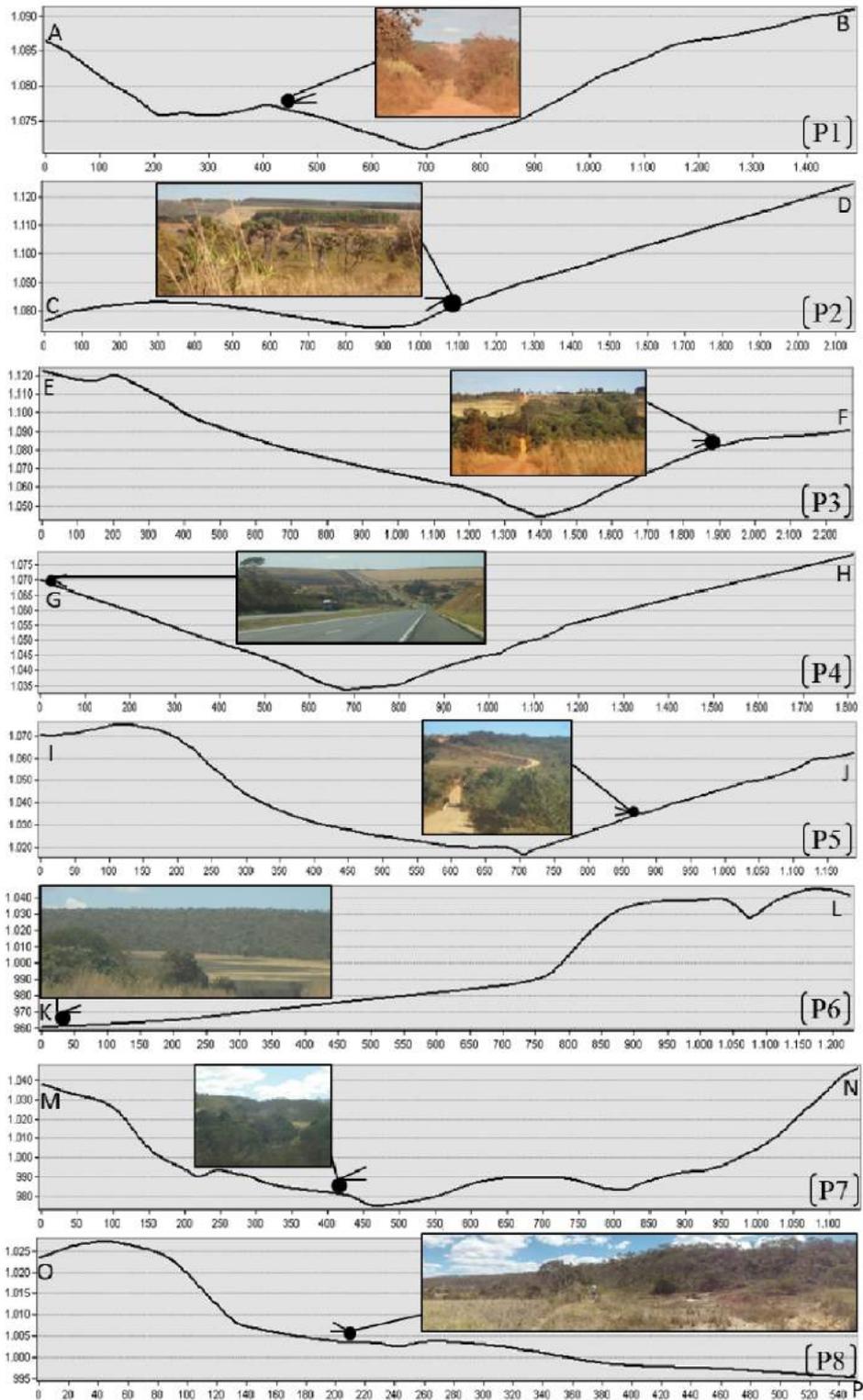


Figura 5. 9 Perfil de áreas em análises dos pontos da figura 5.4 (altitude-m x distância-m). (P1) Perfil A-B: com rampa de colúvio no extremo norte da propriedade; (P2) Perfil C-D: com transição da chapada para a rampa de colúvio; (P3) Perfil E-F: transição da rampa de colúvio para a frente de recuo erosivo; (P4) Perfil G-H: transição da rampa de colúvio para a chapada (fundo); (P5) Perfil I-J: transição da rampa de colúvio para a frente de recuo erosivo; (P6) Perfil K-L: vista da rampa de colúvio para a frente de recuo erosivo; (P7) Perfil M-N: transição da rampa de colúvio e frente de recuo erosivo; (P8) Perfil O-P: frente de recuo erosivo.



Figura 5. 10 Geoambientes na UH do Pipiripau dos pontos identificados na Figura 5.4 (a) Campos de murundus no ponto 9; (b) e (c) relevo acidentado com colinas e vales encaixados caracterizando a depressão dissecada no ponto 10.

Pela análise dos geoambientes (Figuras 5.8, 5.9 e 5.10) é possível verificar onde ocorrem preferencialmente os canais efêmeros na paisagem. A UH do Pipiripau localiza-se em um domo estrutural, onde seu rio principal é o eixo das dobras anticlinais na unidade. É uma bacia assimétrica, onde as vertentes na mesma direção da orientação das camadas a leste tendem a ser mais suavizadas e as vertentes a oeste no sentido oposto a orientação das camadas tem maior declividade.

A declividade elevada tende a constituir processos erosivos e favorecer a gênese dos canais naturais de escoamento superficial nos lineamentos das rochas, fraturas e zonas de falhas. Isso caracteriza a frente de recuo erosivo que compõe ambientes de baixa resiliência e potencial erosivo, responsável pelo transporte de sedimentos. Logo a frente de recuo constitui um ambiente propício à formação de canais naturais de escoamento superficial. No entanto, nessa mesma porção do ambiente ocorrem canais intermitentes e perenes. A compreensão da

formação do escoamento e da saturação do relevo nas análises de escoamento permitem a diferenciação dessas feições no ambiente.

Com a drenagem mapeada foi feita uma distribuição percentual de sua ocorrência na bacia com relação aos geoambientes mapeados (Figura 5.11). Esta distribuição considera toda a extensão dos canais em análise. Na ocorrência de canal em dois ou mais geoambientes a extensão foi particionada e considerada em cada geoambiente à extensão que faz parte.

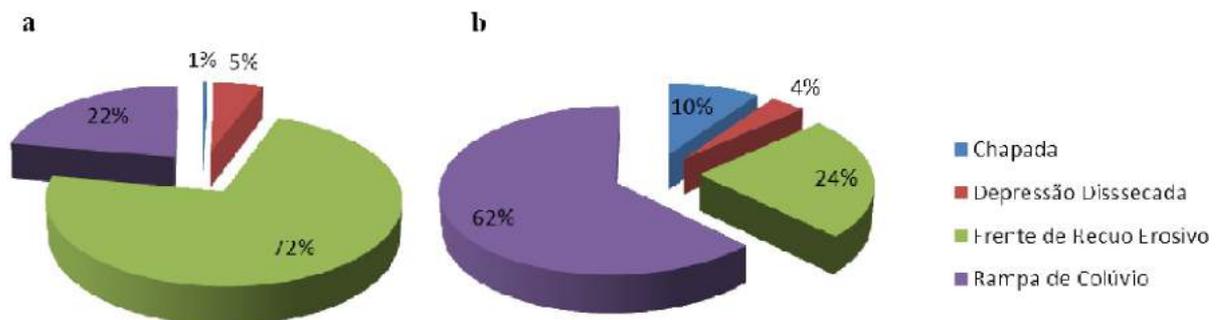


Figura 5. 11 Gráficos de ocorrência de canais nos geoambientes. (a) efêmeros; (b) intermitentes e perenes.

Os ambientes de canais efêmeros na UH são encontrados predominantemente em áreas de frente de recuo erosivo com Cambissolo. Os canais naturais de escoamento superficial ocorrem em menor representatividade nas rampas de colúvio. Nestas áreas os canais efêmeros tendem a ocorrer ou por continuação dos canais efêmeros, que se iniciam na frente de recuo erosivo, ou pelo uso do solo, que propicia caminhos preferenciais das águas pluviais.

No grupo geológico Paranoá, a frente de recuo erosivo por tratar-se de um ambiente onde ocorre ruptura do relevo na UH do Pípiripau com maiores variações altimétricas (800m a 1100m), possui direção preferencial inversa a dos ambientes coluvionares e seu relevo escarpado causa índices elevados de erosão. Esta característica geomorfológica associada à existência de Cambissolos, solos bem drenados, propiciam a ocorrência de escoamento superficial. No entanto, apenas estas características não são suficientes para diferenciar canais, tendo em vista que em áreas com frente de recuo erosivo e Cambissolo também ocorrem canais intermitentes e perenes, estando estes associados ao nível do lençol freático e/ou ocorrência de nascentes.

Os canais naturais de escoamento superficial estão predominantemente no Cerrado Stricto Sensu ou em áreas com atividades antrópicas que propiciam o escoamento superficial direcionado.

5.5 MODELAGEM DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS

5.5.1 Limiar de escoamento

A análise do escoamento, por meio das direções de fluxo e áreas de contribuição, indica os caminhos preferenciais e áreas de acumulação no relevo. A relação inversa da área de contribuição com a declividade proporciona limites, onde é possível identificar as áreas que iniciam a formação de canais na paisagem (Figura 5.12).

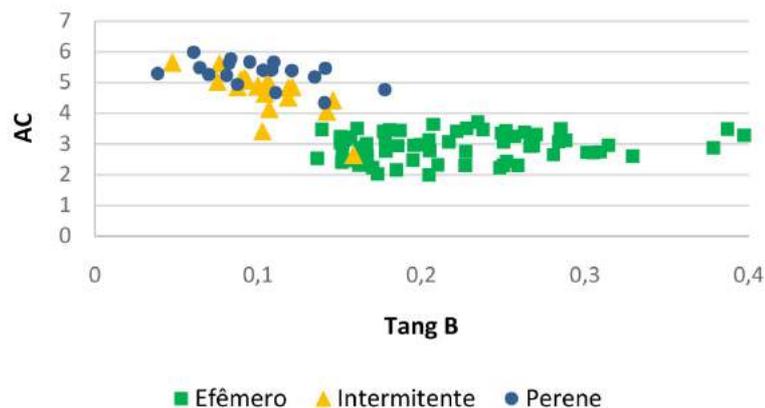


Figura 5. 12Relação entre área de contribuição e declividade na UH do Pipiripau.

É evidente a relação inversa entre a área de contribuição e a declividade na UH do Pipiripau, quanto maior a área de contribuição menor a declividade. A relação entre a área de contribuição e a declividade apresentou os limiares 4 (log base 10) no primeiro e 0,15 no segundo para a diferenciação dos canais na paisagem. Os canais efêmeros iniciam em declividade de 0,15 (tangB) até 0,4 (tangB), essa característica ocorre principalmente nas áreas de frente de recuo erosivo, onde há uma característica de relevo escarpado com declividades mais altas. A área de contribuição nessas áreas não é elevada, variando de 2 a no máximo 4 (log base 10), o que contribui ao entendimento de que a sua formação ocorre em eventos chuvosos extremos que proporcionam um aporte ao escoamento superficial.

Os canais intermitentes ocorrem como transição entre os canais perenes e efêmeros. A área de contribuição nestes não é tão significativa, justificando sua perenidade parcial. Já os canais perenes estão claramente em áreas com relevo menos íngreme, inferior a 0,15, com significativa área de contribuição a montante, variando de 4,5 a 7, justificando sua perenidade.

Apenas 4 pontos de análise (2, 77, 81 e 42) estão fora dos valores dos limites encontrados. O ponto 2, figura 5.13, refere-se a um canal perene que por consequência de um barramento sua declividade foi alterada.

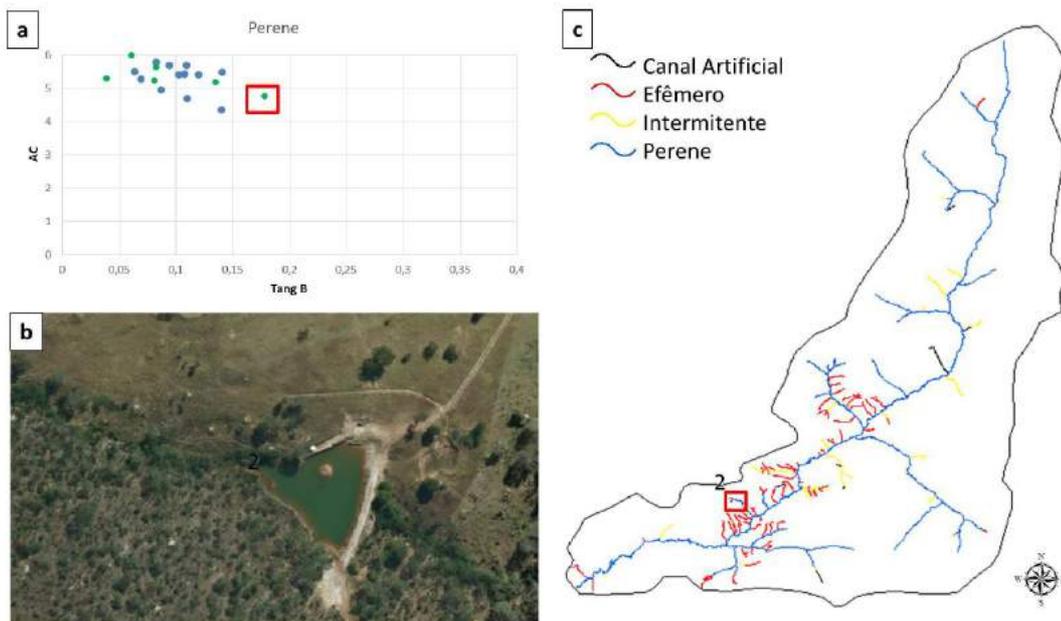


Figura 5. 13Outlier no ponto de análise 2 (Perene). (a) indicação do outlier no gráfico (b) aerofotoTerracap 2015 indicando a localização do ponto com barramento; (c) Indicação do ponto na unidade hidrográfica.

No caso do ponto 77, referente a um canal intermitente (figura 5.14), o uso do solo alterou a área de contribuição e a declividade.

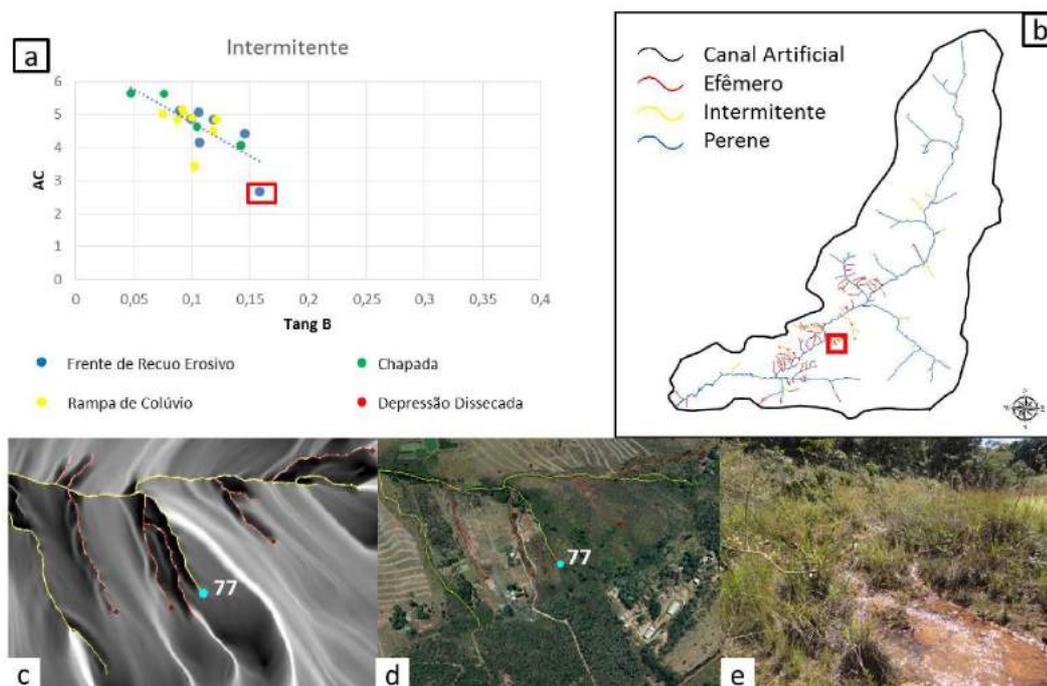


Figura 5. 14Outlier no ponto de análise 77 (intermitente). (a) indicação do outlier no gráfico; (b) Indicação do ponto na unidade hidrográfica; (c) área de contribuição indicando fluxo mais acentuado ao final do canal; (d) aerofotosTerracap 2015 indicando a localização do ponto e o uso do solo extensivo ativo; (e) foto in loco.

Neste caso a declividade a imagem in loco (Figura 5.14e) mostra que há um fluxo no local. A foto aérea de 2015 (Figura 5.14d) mostra uma área úmida adjacente e a existência de

edificações acima do ponto. A figura 5.14c indica o direcionamento preferencial da área de contribuição em região abaixo do ponto devido ao desvio advindo de edificações acima do ponto. Essa já foi uma área úmida, mas o uso de solo acima do ponto, além de redirecionar o fluxo, mudou a configuração do relevo neste trecho. Por isso esse ponto está deslocado dos limites encontrados. Isso explica também porque a área de contribuição é menor neste ponto, pois o fluxo foi redirecionado, mas mesmo assim ainda há uma área úmida próximo ao local o que mantém o fluxo no canal.

No caso dos pontos 81 e 42, referentes aos canais efêmeros (Figura 5.15), o uso do solo acrescentou um direcionamento de fluxo de forma pontual favorecendo o processo erosivo em declividades inferiores ao limiar encontrado.

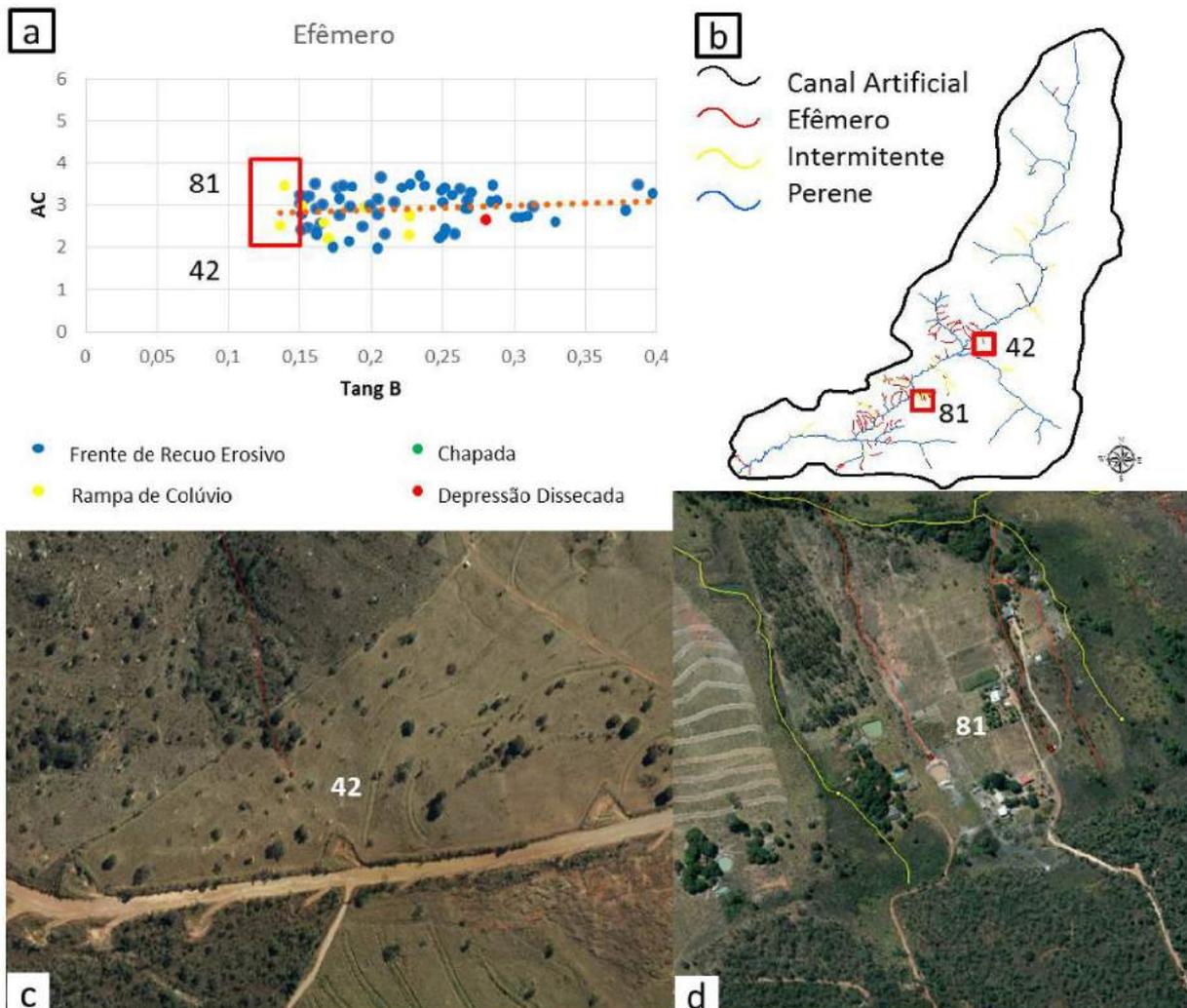


Figura 5. 15Outliers de declividade nos pontos 42 e 81 (Efêmero). (a) indicação dos outliers no gráfico; (b) indicação dos pontos na UH; (c) aporte vindo das vias no ponto 42; (d) deslocamento de fluxo devido ao uso do solo no ponto 81.

Em ambas áreas há uma via acima com um direcionamento pluvial que canaliza o aporte de chuva a este ponto específico ocasionando um ravinamento em declividade menor. Naturalmente isso não ocorreria, mas o fluxo direcionado pontualmente pode configurar uma tensão maior apesar de uma declividade menor formando o canal.

Os valores limites encontrados servem de base para o cálculo de limiar de escoamento, (Figura 5.16). Os canais perenes ou intermitentes destacam a relação inversa entre a Área de Contribuição e a declividade com faixa de correspondência similar as apresentadas por Dietrich et al (1993). Nos canais intermitentes há uma inclinação da linha de tendência restringindo a declividade, no entanto há uma amplitude maior de dados de área de contribuição. Mesma tendência é notória para canais perenes, mas com amplitude mais restrita de área de contribuição onde os maiores valores são encontrados. Os canais naturais de escoamento superficial (efêmeros) apresentam uma convergência a linearidade em faixa abaixo do limiar correspondendo as áreas convergentes apresentadas no gráfico de Dietrich et al (1993).

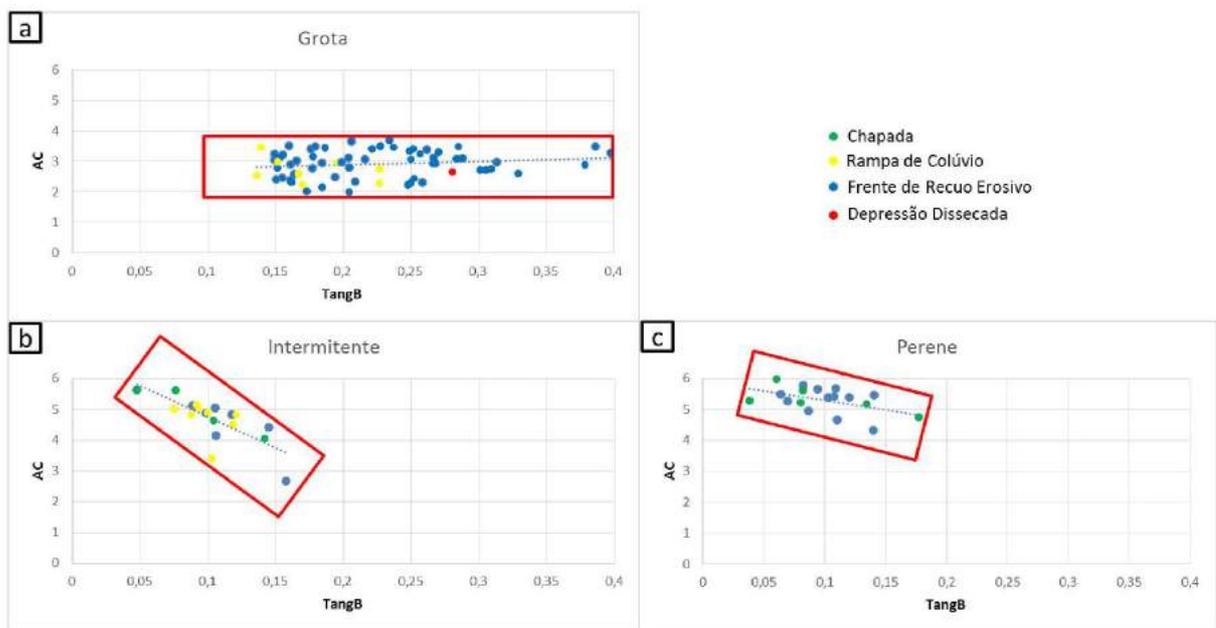


Figura 5. 16Relação da área de contribuição e declividade na unidade hidrográfica do Pipiripau. (a) canais efêmeros; (b) canais intermitentes; (c) canais perenes.

Por meio da equação 2.4 de Montgomery e Dietrich (1992) obteve-se o mapa de limiar de escoamento (figura 5.17) e aplicando-se os limiares encontrados, 10000 e 0,15, o limite a formação de canais na UH Pipiripau foi de 225m, onde valores superiores indicam a

ocorrência de canais perenes ou intermitentes e valores inferiores correspondem aos canais efêmeros.

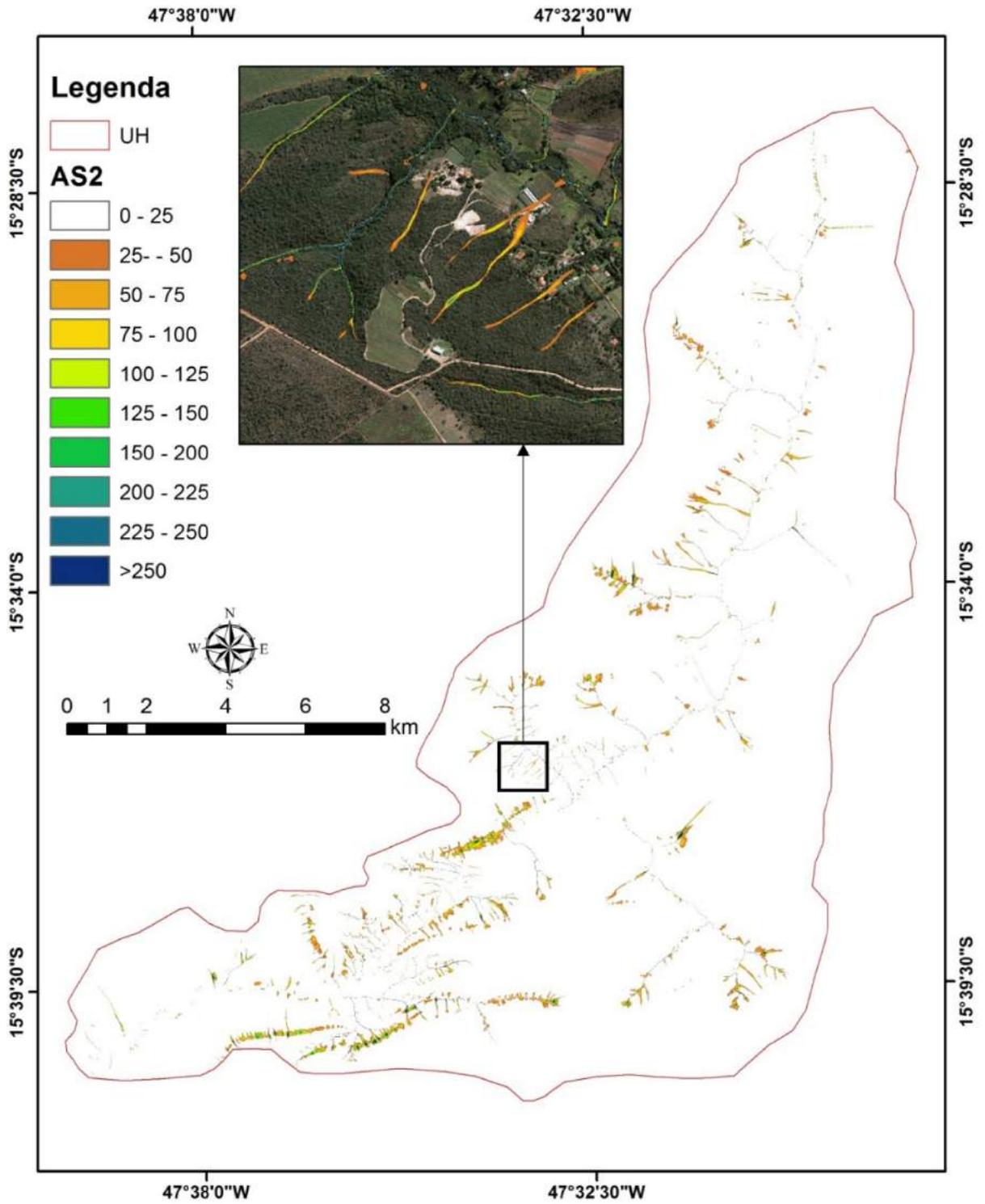


Figura 5. 17 Limiar de escoamento na UH do Pipiripau.

Com relação aos canais intermitentes e perenes nota-se pela análise da figura 5.18 que o limiar de escoamento se aplica para a diferenciação destes dos canais efêmeros na UH do Pipiripau. O histograma indica uma frequência acumulada maior em canais intermitentes e perenes acima deste limiar. Já no caso dos canais efêmerosantes desse limiar a frequência acumulativa atinge seu máximo. Nota-se, na figura 5.18, que há aumento significativo da frequência próximo ao valor 300, tanto para canais perenes quanto intermitentes. Com relação aos canais efêmeros a frequência acumulativa atinge seu máximo no valor 180. Logo o limiar de 225 é satisfatório para a distinção de canais efêmeros e canais objeto de preservação permanente.

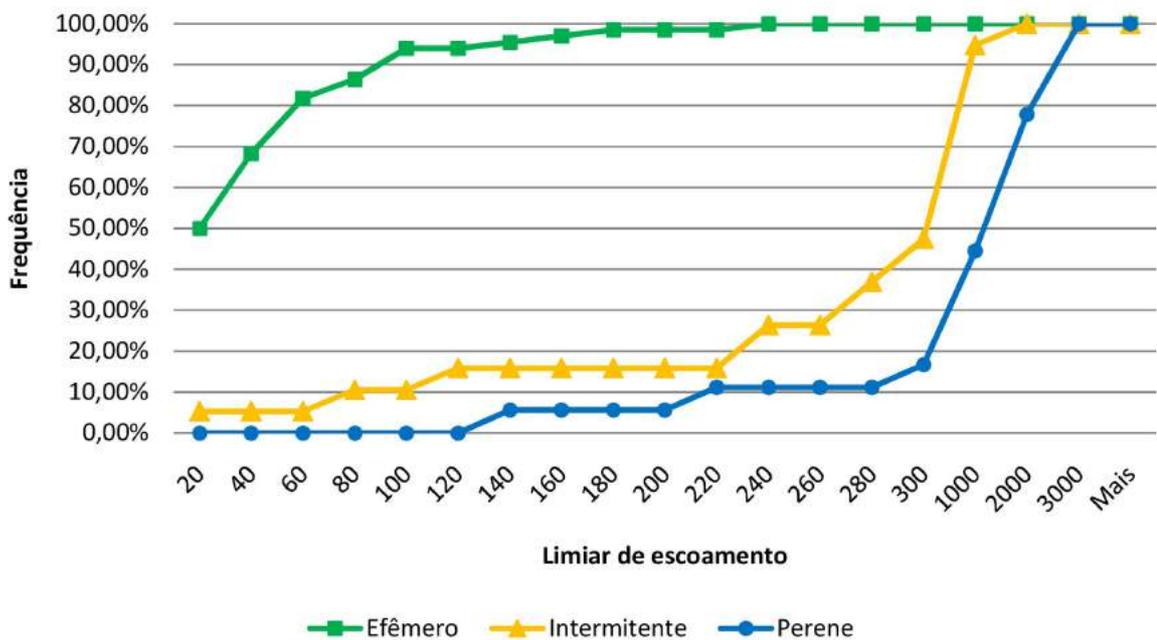


Figura 5. 18Frequência acumulativa do limiar de escoamento na UH do Pipiripau.

Montgomery e Dietrich (1992) encontraram o limiar de escoamento 200 para a formação de canais em uma bacia na Califórnia. O limiar encontrado aproxima-se desse valor teórico e é satisfatório por tratar de ambientes distintos, no entanto reafirma a relação da área de contribuição e declividade na formação de canais.

Ao aplicar o limiar de escoamento de 225 para a diferenciação de canais na bacia ocorreram outliers nos canais intermitentes (Figuras 5.14, 5.19 e 5.20), perenes (Figura 5.21) e efêmeros. Nos canais intermitentes e perenes o uso do solo comprometeu a área de contribuição, originando um valor baixo que reflete no valor final do limiar. No caso do ponto 6 (Figura 5.19) a agricultura intensiva, no ponto 122 a existência de uma cidade (figura 5.20)

e no caso do ponto 14 (Figura 5.21) o redirecionamento de fluxo ocorre devido a existência de uma via próxima ao ponto.

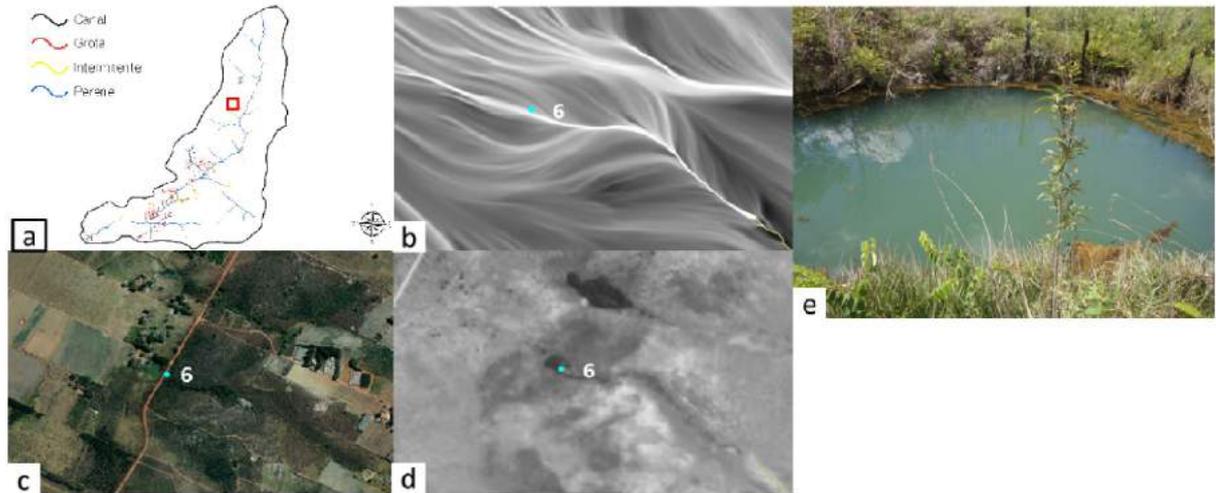


Figura 5. 19Outlier no ponto de análise 6 (intermitente). (a) localização do ponto 6 na UH do Pipiripau;(b) área de contribuição no ponto 6 com tendência de contribuições mais alocive; (c) aerofotosTERRACAP 2015 indicando uma e o uso de solo extensivo na área; (d) aerofotosSEGETH de 1967 com uma provável área úmida; (e) foto tirada in loco do outro lado da via do curso com grande acumulação e solo encharcado.

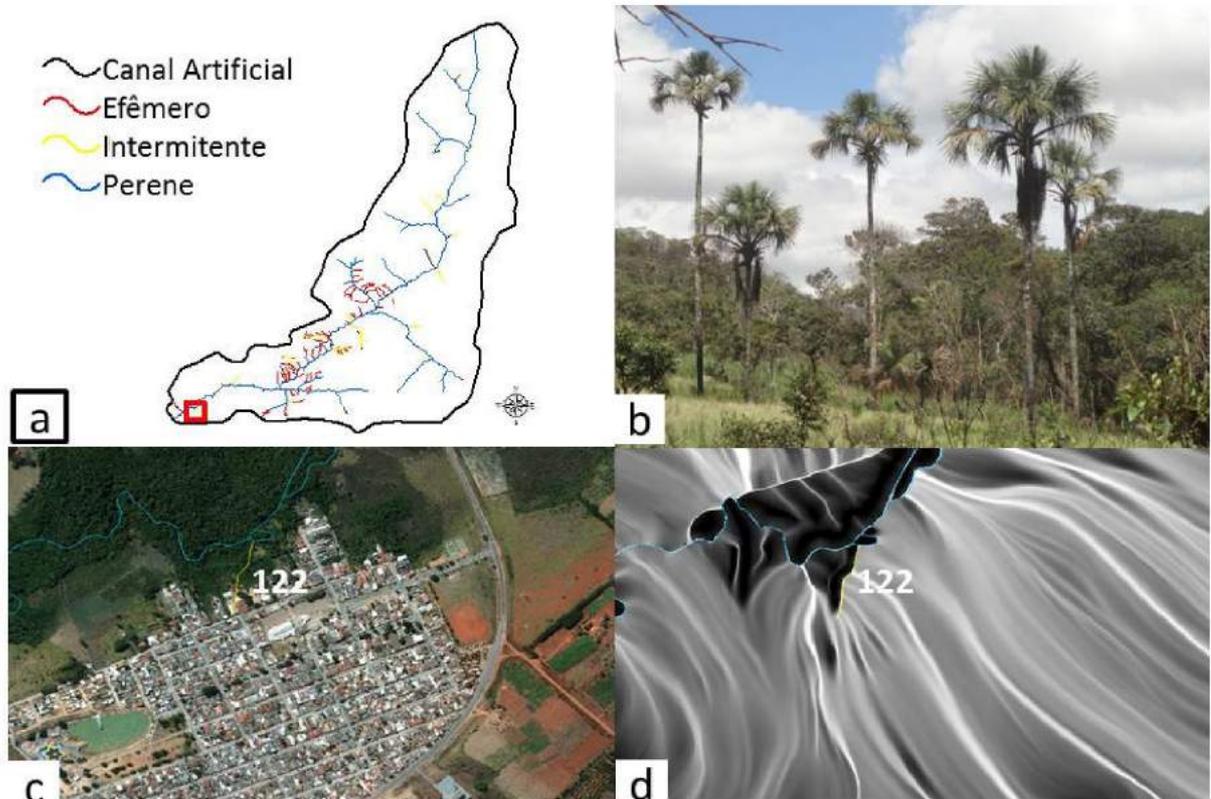


Figura 5. 20Outlier no ponto de análise 122 (intermitente). (a) localização do ponto 122 na UH do Pipiripau; (b) foto in loco da área por trás da ocupação; (c) AerofotosTERRACAP 2015 mostrando a intensa ocupação na área (d) área de contribuição no ponto.



Figura 5. 21Outlier no ponto de análise 14(perene). (a) Localização do ponto na UH do Pipiripau; (b) imagem de satélite Terracap (2015); (c) área de contribuição no ponto de análise.

Houve ainda um outlier de efêmero que estava na correspondência de área de contribuição e declividade, mas o limiar ficou acima do esperado. Este fato ocorreu por que o valor de declividade é muito elevado (0,32) e tende a aumentar o valor final na fórmula. O mesmo erro ocorreu em um dado do curso perene, onde o valor baixo de declividade (0,03) colocou o valor de limiar muito baixo, apesar de atender os limites de declividade e área de contribuição. Ou seja, a fórmula de limiar de escoamento é muito sensível à declividade podendo apresentar artefatos fora da faixa de análise quando esta tender aos extremos.

5.5.2 Índice Topográfico

Por conseguinte, foi feito o mapa derivado de IT (figura 5.22) aplicando-se os parâmetros morfométricos na equação 2.2. Os dados de IT apresentaram inflexões até 10 para áreas correspondentes aos canais efêmeros e iniciando em 11 até 16 nas áreas intermitentes e perenes (Figuras 5.23 e 5.24). Para os canais efêmeros o valor de IT varia de 5,4 a 9,4 com média de 7,55, na classe intermitente o IT varia de 7,2 a 15,3 com média de 12,5, já para os cursos perenes o IT varia de 11,2 a 15,9 com média de 13,8.

Índice Topográfico

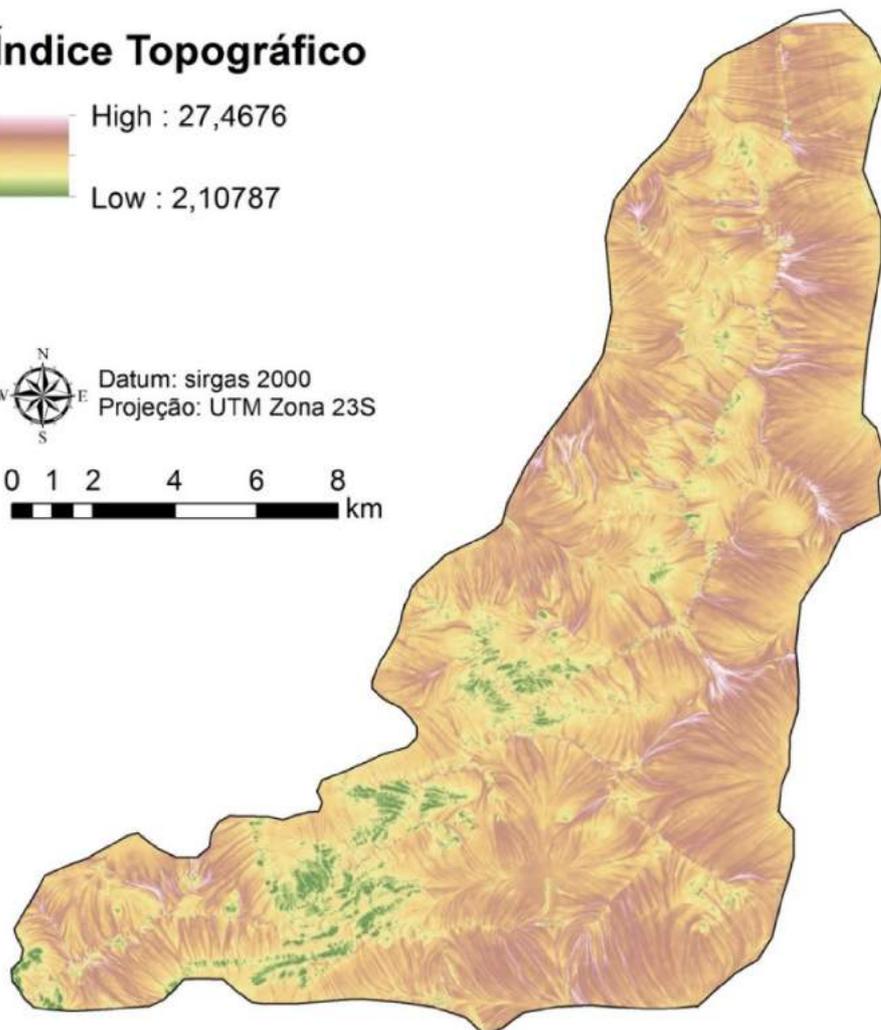
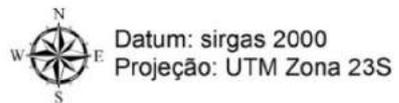


Figura 5. 22 Índice topográfico na Unidade Hidrográfica do Pipiripau, DF.

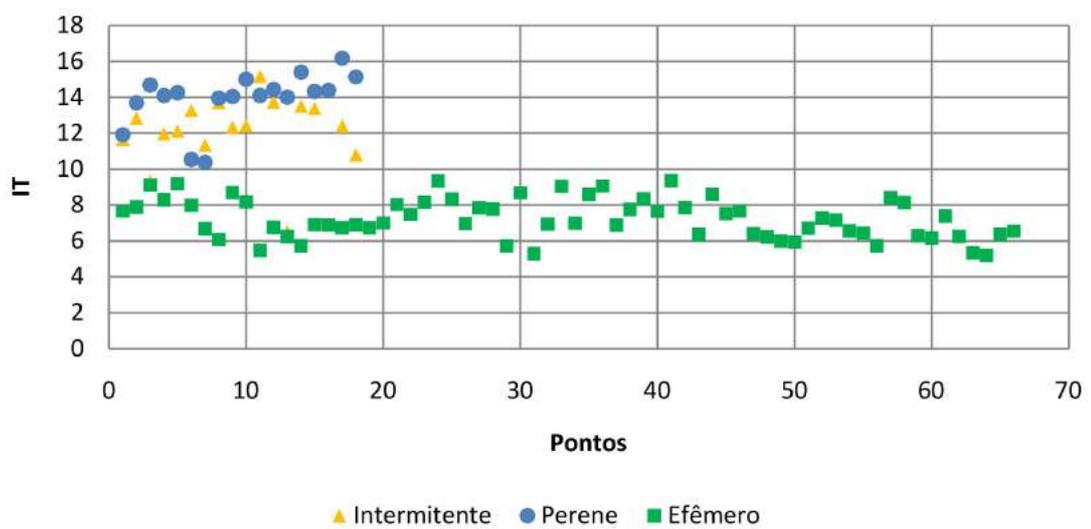


Figura 5. 23 Índice Topográfico nos canais da Unidade Hidrográfica do Pipiripau.

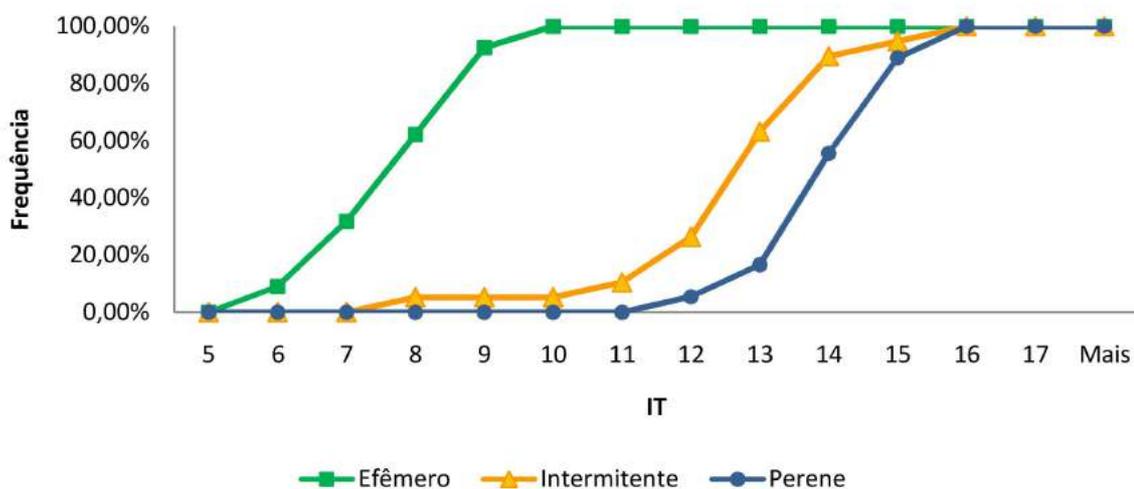


Figura 5. 24 Frequência acumulativa do IT na Unidade Hidrográfica do Pipiripau.

Com relação ao IT apenas o ponto 77 (figura 5.14) apresenta valores que divergem da tendência de canais intermitentes. Desconsiderando este ponto o valor mínimo de IT para intermitente seria 10,6 com média de 12,6. Logo, a aplicação do IT 11 para diferenciar os canais de escoamento dos cursos d'água é satisfatório comparado as avaliações in loco.

Vandekerckhove (1998) apesar de não ter encontrado uma correspondência do IT e dos limiares de erosão, devido ao denso uso de solo pela agricultura em bacia na Espanha e Portugal, obtive valores de canais efêmeros para IT em limite inferior a 5 e limiar de escoamento abaixo de 15. A formação de canal natural de escoamento superficial ocorre com IT inferiores entre 5 e 10, maior frequência entre 8 e 9, e limiar de escoamento máximo de 160, neste caso com maior frequência entre 40 e 60. Por se tratarem de geoambientes diferentes, os limiares de canais efêmeros estão susceptíveis a declividade local sendo que os limites encontrados neste trabalho e no trabalho de Vandekerckhove(1998) podem apresentar amplitudes diferentes, mas ambos apresentam resultados que se assemelham a correspondência do limiar de formação de canais estabelecidos em outros trabalhos (MONTGOMERY e DIETRICH, 1992; DIETRICH et al 1993; ARAUJO, 2011).

O limiar de IT 11 permitiu não só diferenciar os canais, mas identificar áreas úmidas e caminhos preferenciais de escoamento na paisagem que poderiam ser de hidrografia, mas que foram alteradas pelo uso do solo. A figura 5.25, além de ilustrar área propensa a saturação e solo hidromórfico, indica que o uso do solo na área provocou mudanças na paisagem a montante e provavelmente afetando a recarga do curso a jusante. Na figura 5.26 é nítida a presença de mata de galeria que acompanha o curso nas imagens de 1967, no mesmo local o

desmatamento e a utilização de drenos para as atividades de agropecuária na região alteraram o fluxo natural do curso.

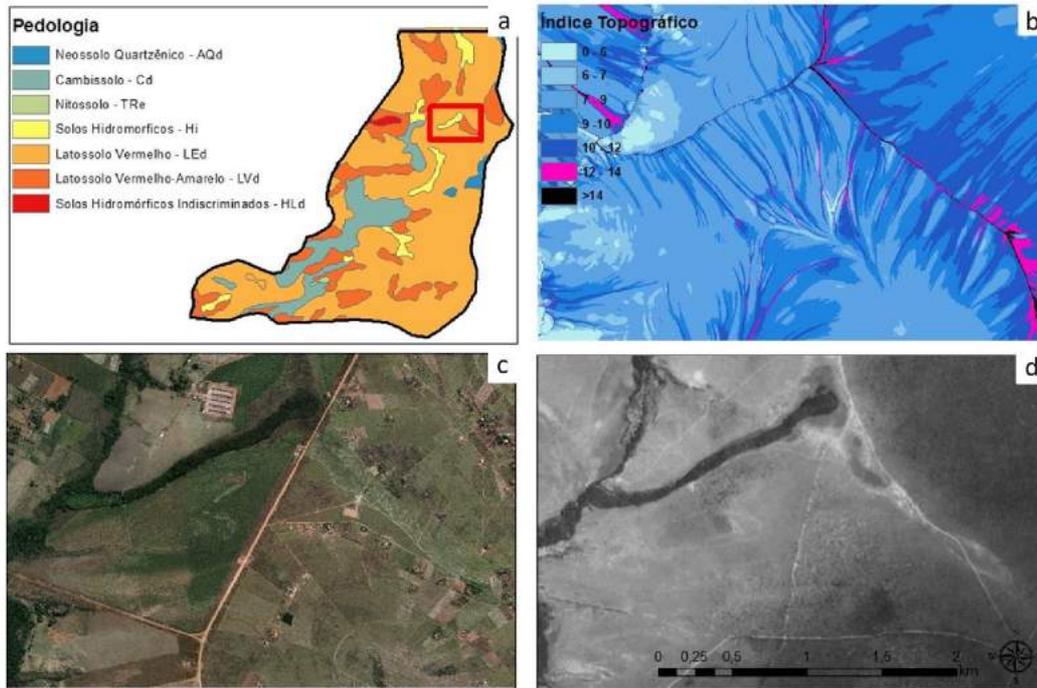


Figura 5. 25 Relação do índice topográfico e o uso do solo. (a) indicação do foco da área analisada onde predomina solo hidromórfico; (b) índice topográfico superior a 14 indicando uma probabilidade alta de saturação do solo na região; (c) uso do solo em 2014 sem indício de curso ou acumulações; (d) uso do solo anteriormente a ocupação (1967) com indícios de saturação e caminho preferencial de curso.

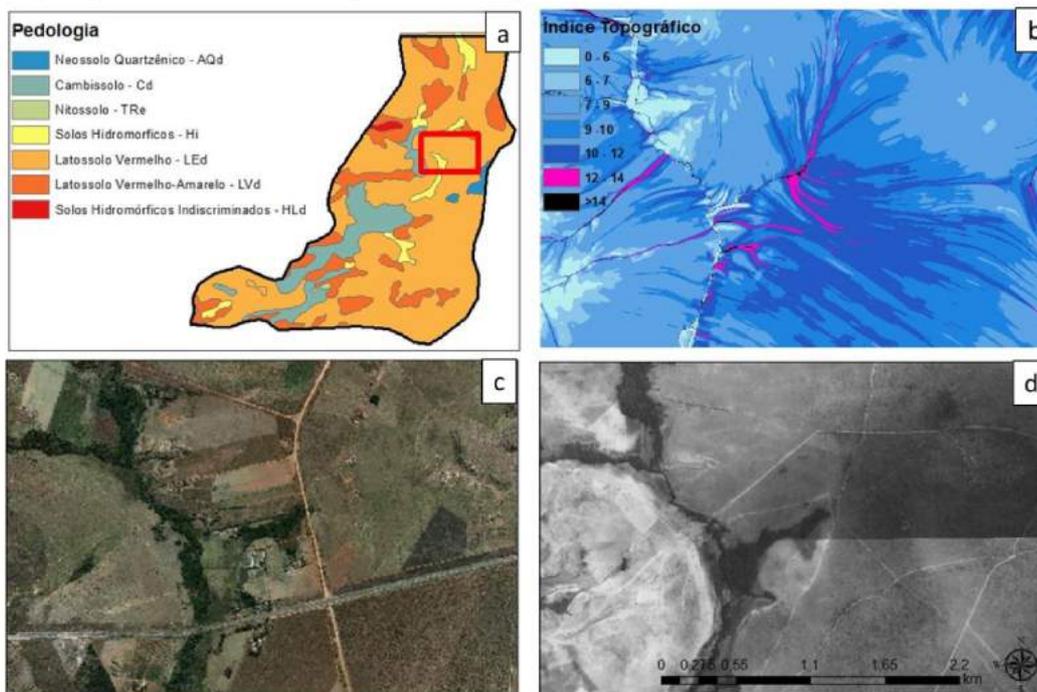


Figura 5. 26 Relação do índice topográfico e o uso do solo. (a) indicação do foco da área analisada com pedologia; (b) índice topográfico superior a 14 indicando uma probabilidade alta de saturação do solo na região; (c) uso do solo em 2014 com retirada de mata de galeria e drenos; (d) uso do solo anteriormente a ocupação (1967) com mata de galeria intacta e curso contribuindo ao curso principal.

Na figura 5.27 foram identificados *in loco* áreas com acumulações de água próximas a veredas e nascentes que não possuem curso evidente, mas que foram identificadas com o IT como áreas de contribuição ao curso perene. Logo, análises que utilizam como base a modelagem hidrológica podem contribuir para a identificação de áreas hidrologicamente sensíveis e para a conservação e preservação dos recursos hídricos.

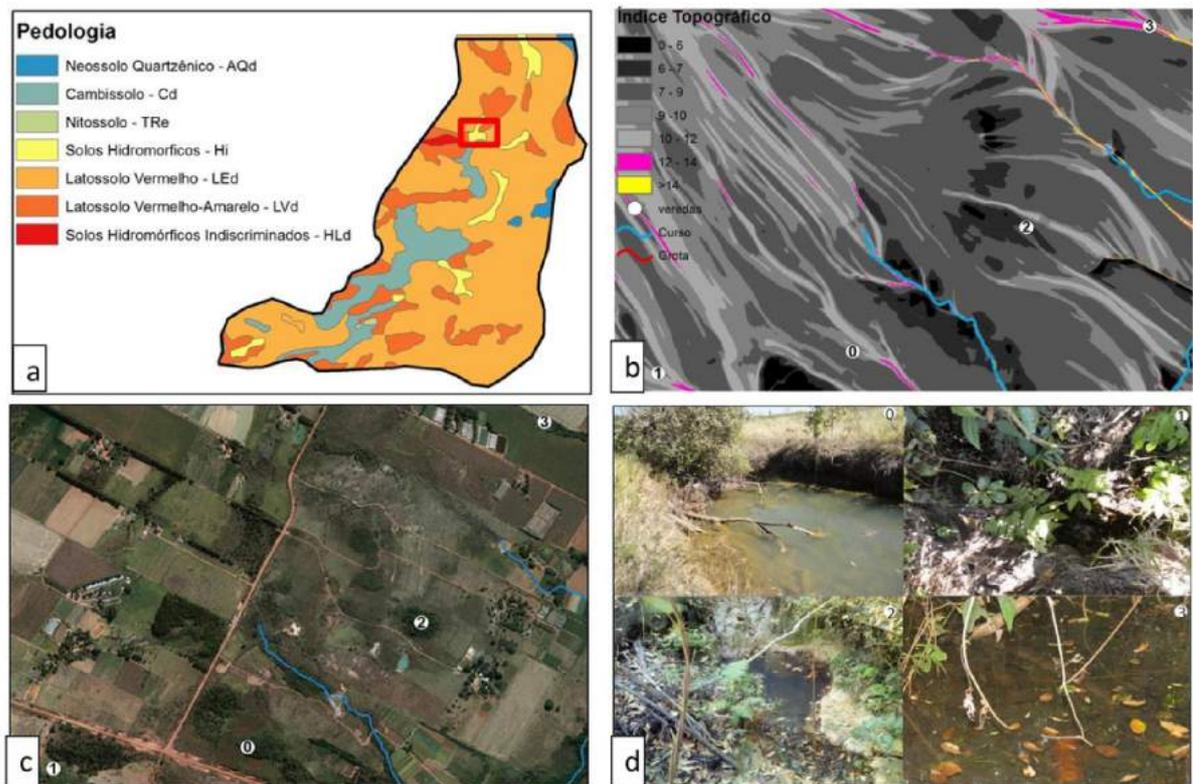


Figura 5. 27 Relação do índice topográfico e áreas alagadas. (a) indicação do foco da área analisada com pedologia; (b) índice topográfico superior a 14 indicando uma probabilidade alta de saturação do solo na região e possível curso; (c) imagem das áreas identificadas; (d) Fotos das áreas *in loco* – (0) afloramento; (1) área brejosa com afloramento; (2) nascente; (3) área permanentemente alagada de vereda.

Por fim, o limiar de escoamento e o IT mostram ser parâmetros hidrogeomorfológicosefícazes para quantificar o controle da topografia sobre os processos físicos hidrológicos. Os canais perenes e intermitentes estão associados a menores declividades e valores maiores de área de contribuição, enquanto na ocorrência de canais efêmeros a declividade é maior associada a menores contribuições. O IT e o limiar de erosão por relacionarem estes dois atributos morfométricos representam ferramentas de gestão de grande valor.

Em áreas muito escarpadas notou-se que o limiar de escoamento pode apresentar valores anômalos, pois a declividade é fator preponderante da fórmula. Fato este não ocorre

no IT, no entanto o uso do solo, tanto no IT quanto no limiar de escoamento, interfere significativamente nos valores encontrados. Isto comprova o que foi verificado em trabalhos anteriores (VANDEKERCKHOVE, 1998; TORRI et al, 2012) e indica que o uso do solo interfere no regime hídrico da Bacia.

Na área em análise a declividade elevada tende a constituir processos erosivos e favorecer a gênese dos canais efêmeros nos lineamentos das rochas, fraturas e zonas de falhas. Isso caracteriza uma frente de recuo erosivo que compõe ambientes de baixa resiliência e potencial erosivo local onde há predominância de canais efêmeros. Na UH do Pipiripau, a frente de recuo erosivo caracteriza-se como o ambiente mais propenso à ocorrência de canais efêmeros, porém neste ambiente ocorrem tanto canais efêmeros quanto cursos hídricos. O limiar de escoamento e o IT mostram que a relação área de contribuição e declividade é eficaz para a diferenciação de canais no contexto analisado.

Análises morfométricas permitem sintetizar as características tridimensionais do terreno com uma espacialização simples do movimento da água em encostas, oferecendo uma base quantitativa para interpretar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Embora esta análise se atenha a diferenciação de canais, os resultados gerados podem ser úteis na discretização de AHS e ajudar na gestão de áreas protegidas e de atividades potencialmente poluidoras.

5.6 ANÁLISE DE ACURÁCIA

Para avaliar a correspondência dos modelos topográficos utilizados com a verdade de campo foi empregada uma análise de acurácia baseada no índice Kappa. Onde valores com índice próximos a 1 indicam a concordância dos dados e valores tendendo a 0 indicam a discordância dos resultados.

5.6.1 Limiar de Escoamento

A aplicação da fórmula do limiar de escoamento na UH do Pipiripau correlacionada a verdade de campo apresentou apenas divergência em 6 pontos explicados no tópico 5.5.1. Sendo 2 pontos perenes, 3 pontos intermitentes e 1 ponto efêmero em um espaço amostral de 198 pontos (Tabela 5.2). Onde a verdade de campo corresponde a: 37 canais perenes, 42 canais intermitentes e 119 canais efêmeros. Para descrever a intensidade da concordância entre o limiar de escoamento e a verdade de campo foi aplicada a medida Kappa (Tabela 5.3).

Tabela 5. 2Contingência entre verdade de campo x limiar de escoamento

		Limiar de Escoamento			
		Perene	Intermitente	Efêmero	Total
Verdade De Campo	Perene	35	0	2	37
	Intermitente	0	39	3	42
	Efêmero	0	1	118	119
Total		35	40	123	198

Tabela 5. 3Kappa da classificação no limiar de escoamento

	Perene	Intermitente	Efêmero	Geral
Kappa da categoria	0.966	0.938	0.936	0,945
P-valor do Kappa da categoria	< 0.001	< 0.001	< 0.001	<0.001
Intervalo de 95% de confiança do Kappa da categoria	sup: 1.0 inf: 0.827	sup: 1.0 inf: 0.799	sup: 1.0 inf: 0.797	sup: 1 inf: 0,842

Note que a concordância geral é ótima com valor de 0,945. Avaliando cada tipo de canal nota-se que a concordância também é alta sendo o Perene de 0,966, o intermitente de 0.938 e o efêmero de 0,936.

5.6.2 Índice Topográfico

Por sua vez, o Índice Topográfico na UH do Pipiripau correlacionado a verdade de campo apresentou apenas uma divergência explicada no tópico 5.5.2Tal divergência ocorreu em apenas um canal intermitente em um espaço amostral de 198 pontos.Onde a verdade de campo corresponde a: 37 canais perenes, 42 canais intermitentes e 119 canais

efêmeros(Tabela 5.4). Para descrever a intensidade da concordância entre o Índice Topográfico e a verdade de campo foi aplicada a medida Kappa (Tabelas 5.5).

Tabela 5. 4Contigência entre verdade de campo versus Índice Topográfico

		Índice Topográfico			Total
		Perene	Intermitente	Efêmero	
Verdade de Campo	Perene	37	0	0	37
	Intermitente	0	41	1	42
	Efêmero	0	0	119	119
Total		37	41	120	198

Tabela 5. 5Kappa da classificação no Índice Topográfico

	Perene	Intermitente	Efêmero	Geral
Kappa da categoria	1.0	0.985	0.989	0,991
P-valor do Kappa da categoria	< 0.001	< 0.001	< 0.001	<0.001
Intervalo de 95% de confiança do Kappa da categoria	sup: 1.0 inf: 0.861	sup: 1.0 inf: 0.845	sup: 1.0 inf: 0.85	sup: 1.0 inf: 0.888

A concordância geral do Índice Topográfico é ótima com valor de 0,991. Avaliando cada tipo de canal nota-se que a concordância também é alta sendo o perene de 1, o intermitente de 0.985 e o efêmero de 0,989.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Arelação inversa entre a área de contribuição e a declividade permitiu a análise de características físicas da paisagem e possibilitou, com o auxílio da modelagem de parâmetros morfométricos, a identificação de canais naturais de escoamento superficial na UH do Pípiripau. Considerando que a formação de canais depende intrinsecamente de fatores do ambiente e de uso de solo, esses índices devem ser complementados com a análise dos geoambientes em que a área se insere. No caso da UH do Pípiripau, por meio da composição colorida, foi possível distinguir os seguintes geoambientes: Chapada, Rampa de Colúvio, Frente de Recuo Erosivo e Depressão Dissecada. Na análise em tela, os canais naturais de escoamento superficial foram identificados predominantemente na Frente de Recuo Erosivo e sob Cambissolo.

Considerando que o Grupo Paranoá no DF possui geoambientes com comportamentos similares e, tendo em vista a região de análise tem condições climáticas e de precipitação estáveis, entende-se que os limiares encontrados na UH do Pípiripau ($IT = 11$, limiar de escoamento = 225, limite de Área de contribuição = 10000 e limite de Declividade = 0,15) podem ser aplicados em todo o Grupo Paranoá, auxiliando na diferenciação de canais em 65% do território do Distrito Federal e contribuindo para a análise do comportamento hidrológico dessas áreas e na gestão do território. Os modelos topográficos aplicados neste trabalho, para a identificação de canal natural de escoamento superficial, apresentaram ótima correlação com a verdade de campo com índice Kappasuperior a 0,9 em todos os casos. No entanto, o limiar de escoamento apresentou limitações em casos extremos de declividade. Logo, os limites empregados neste trabalho para o limiar de escoamento podem não ser eficazes na identificação de canais efêmeros em relevos muito planos (declividade abaixo de 0,04 tang B) ou muito escarpados (declividade superior a 0,4 tang B).

Esta análise não só permitiu diferenciar os canais, mas indicou áreas sensíveis objetos de proteção que foram mascaradas pelo uso e ocupação do solo. No intuito de automatizar e minimizar custos para análises e diferenciação de canais, as análises topográficas mostraram-se eficazes e de simples utilização, pois necessitam poucos insumos, recursos e tempo para sua aplicação. No entanto, a qualidade do resultado requer um MDT hidrológicamente corrigido de alta resolução para gerar resultados mais próximos à realidade. O emprego dos limiares foi satisfatório e recomenda-se sua aplicação em outras regiões.

O enfoque dado ao estudo da paisagem neste trabalho, além de fornecer subsídio à análise de vertentes, pode proporcionar auxílio a trabalhos futuros na identificação de campos de murundus e veredas, bem como, na definição de áreas propícias à Reserva Legal com o intuito de proteger áreas de contribuição hidrológicamente sensíveis em bacias hidrográficas. Servem ainda para fomentar a discussão quanto ao tamanho das faixas de proteção de APP necessária à proteção dos recursos hídricos que, pelo conceito de AHS, podem extrapolar os limites impetrados no código florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Relatório de diagnóstico sócio ambiental da Bacia do Ribeirão Pípiripau. Janeiro de 2010. Disponível em: <http://produtordeagua.ana.gov.br/Portals/0/DocsDNN6/documentos/Relatorio_Diagnostico_Pipiripau_PRODUTOR_DE_AGUA2.pdf>. Acesso em: 21/04/2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Edital 01/12**: pagamento por serviços ambientais a produtores rurais da bacia do Pípiripau. Disponível em: <http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/Cotas_LP/Edital_Produtor_de_gua_no_Pipiripau_Dia_da_gua.pdf>. Acesso em: 7 out. 2014.

ARAUJO, T. P. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro-SP**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2011.

ARAUJO, T. P.; PEJON, O. J. Topographical Threshold for Predicting Gully Erosion in the Tropical Region of São Pedro, SP, Brazil. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. Vol 20, b.18, p10043 – 10058. 2015.

BECKER, A. Runoff processes in mountain headwater catchments: recent understanding and research challenges. In: HUBER, et al (Ed.). **Global change and mountain regions**. Netherlands, p. 283-295, 2005.

BETSON, R.P. What is watershed runoff? **Journal of Geophysical Research**, v. 69, nº 8, p. 1541-1552, 1964.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Bulletin of Hydrological Sciences**, Londres, v. 24, n. 1, p.43-69, 1979.

BEVEN, K. J. Runoff Production and Flood Frequency in Catchments of Order n: an Alternative Approach. **Scale Problems in Hydrology**. D. Reidel Publishing Company: Dordrecht, Holanda p.107-132. (1986).

BORGES, M. E. S.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; ARCOVERDE, G. F. B.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T. Emprego do processamento digital dos parâmetros morfométricos no mapeamento geomorfológico da bacia do Rio Preto. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 10, n. 2, p.401-429, out. 2007.

BRASIL. Presidência da República. Lei 4.771 de 15 de Setembro de 1965. Institui o novo código florestal. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.651 de 25 de Maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001 e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 387, de 27 de Dezembro de 2006. Estabelece procedimentos para o Licenciamento Ambiental de Projetos de Assentamentos de Reforma Agrária e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF.

BRASÍLIA. Decreto 30.315 de 29 de Abril de 2009. Regulamenta o artigo 9 da Lei 41 de 13 de setembro de 1989, para determinar a apresentação de relatório ambiental com fim de distinguir curso d'água intermitente e canal natural de escoamento superficial e de definir a faixa marginal de proteção (não edificável). **Diário Oficial do Distrito Federal**. Brasília, DF.

CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, Volume 34, 2004.

CASSETI, V. Fisiologia da Paisagem. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/cap4/>>. Acesso em: 16/08/2014.

CAPPUS, P. Bassin experimental d'Alrance: etudes dès lois de l'écoulement. Application au calcul et a la prevision des debits. **La Houille Blanche**, v.A, p. 493-514, 1960.

COLLINS, S. H.; MOON, G. C. Algorithms for dense digital terrain models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Maryland v. 47, n. 1, p. 71-76, 1981.

COSTA-CABRAL, M.; BORGES, S. J. Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. **WaterResourceResearch**, Seattle, v. 30, n. 6, p. 1681–1692, 1994.

COUTO JUNIOR, A. F.; SOUZA, V. V.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; SANTANA, O. A.; GOMES, R. A. T. Integração de parâmetros morfométricos e imagens ASTER para a delimitação das fitofisionomias na serra da Canastra, Parque Nacional da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 57-68, 2010.

CREED, I.F.; SASS, G. Z.; WOLNIEWICZ, M. B.; DEVITO, K. J. Incorporating hydrological dynamics into buffer strip design on the sub-humid Boreal Plain of Alberta. **Forest Ecology and Management**. v.256, p.1984–1994, 2008.

DAMASCENA, F. A.; GUIMARÃES, R. F.; CATÃO, R. C.; GOMES, R. A. T.; BARBOSA, F. L. R.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Identificação de zonas de saturação na paisagem a partir de dados de transmissividade obtidos em campo na bacia hidrográfica do rio jardim (DF). *Espaço& Geografia*, Brasília, v. 12, n. 1, p. 105-123, 2010.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; MONTGOMERY, D. R.; ROMY BAUER, J. M. Erosion thresholds and land surface morphology. *Geology*, v. 20, p. 675-679, 1992.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; MONTGOMERY, D. R.; MCKEAN, J. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. *Journal of Geology*, Berkeley, v. 101, p. 259–278, 1993.

DUNNE, T.; BLACK, R. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*. Vol 6, No 5, 1296 – 1311p, 1970.

DUNNE, T. Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 65, p. 25-48, 1983.

ESRI. **Getting to Know ArcView GIS**: the geographic information system (gis) for everyone. Environmental systems research institute. Cambridge: British Library, 1993. 523 p.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models, *Water Resource Research*, Seattle, v. 27, n. 5, p. 709–717, 1991.

FARIAS, M. F. R. **Integração de parâmetros morfométricos e interpretação de imagens orbitais para o auxílio no mapeamento de solos no Parque Nacional de Brasília**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Curso de Gestão Territorial, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

FERNANDES, M.C.; MENEZES, P.M.L. Comparação entre métodos para geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real no Maciço da Tijuca-RJ. **RBC – Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.57, n.2, p.154-161, ago. 2005.

FLORINSKY, I. V. Digital terrain analysis in soil Science and Geology. Institute of Mathematical Problems of Biology Russian Academy of Sciences Pushchino, Russia. Ed. Elsevier, Amsterdam. 379p. First edition 2012.

FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers&Geosciences*, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 413–422, 1991.

FREITAS, L. F. **Análise da influência das alterações da rede de drenagem devida a urbanização no desenvolvimento de voçorocas em quatro regiões do Distrito Federal.** 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

GALLANT, J. C., WILSON, P. **Primary topographic attributes.** In: WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. (Ed) *Terrain analysis: principles and applications.* 1.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 478p. ISBN: 0-471-32188-5. cap. 3, p.51-85.

HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, A. P. F.; MARTINS, E. S.; DRUCK, S.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; SANTOS, N. B. F.; REATTO, A. *Processamento digital de imagens morfométricas para subsidiar o mapeamento pedológico.* In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., Belo Horizonte. **Anais.** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 123-130.

HEWLETT, J. D.; HIBBERT, E. Factors Affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: SOPPER W. E.; LULL, H.W. (ed). **International Symposium on forest Hydrology.** Oxford: Pergamon Press, 1967. P. 275-290.

HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Trans. Am. Geophys. Un.,** 14, p.446-460, 1933.

HORTON, R. E. Erosional development of stream and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Society of America Bulletin,** V 56; p 275-370, 1945.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pit. **Journal of Hydrology,** [s.l.] v. 106, n. 3-4, p. 211-232, 1989.

JENSON S.K., DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 54(11): 1593–1600. 1988.

LEA, N. L. **An aspect driven kinematic routing algorithm in overland flow:** hydraulics and erosion mechanics. New York: Chapman & Hall, 1992.

LILLESAND, T. M; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation.** J.Wiley: New York, 2ª ed. 850p, 1987.

LIMA, L. A. S.; MARTINS, E. S.; REATTO, A.; CASTRO, K. B.; SOUZA, V. V.; CARVALHO JUNIOR, O. A. **Compartimentação Geomorfológica e suas relações com**

solos na Bacia do Alto Rio Preto, GO. Boletim de Pesquisa e desenvolvimento 255 / Embrapa Cerrados. 2009

LIMA, J. E. F. W. **Modelagem numérica do fluxo de água no solo e do escoamento base em uma bacia experimental em área agrícola do cerrado.** 312 p. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

LINDSAY, J. B.; CREED, I. F. 2005. Sensitivity of digital landscapes to artifact depressions in remotely sensed DEMs. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** 71 (9), 1029-36, 2005.

LIU, X.; CHE, W.; WANG, C. Research on a correction method to existing grid-based DEM. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.** Vol. XXXVII. Part B1. Beijing, 2008.

MARK, D. M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. **Geography Annaler.** Series A, Physical Geography, v. 57, n. 3-4, p.165-177, 1975.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN. G. H; RUHOFF, A. L. Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, [s.n.], p. 1455-1462, 2010.

MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W. E. Where do channels begin? **Nature**, 336(6196):232-234.1988.

MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W. E. Channel initiation and the problem of landscape. **Science.** 255,826-830, 1992.

MONTGOMERY, D. R.; GEORGIU-FOUFOULA, E. Channel network source presentation using digital elevation models. **Water Resources Research.** Vol 29, No 12, p. 3925-3934. Dez, 1993.

MONTGOMERY, D. R. Slope distributions, threshold hillslopes, and steady-state topography. **American Journal of Science**, Vol. 301, P. 432–454. Abril/Mai, 2001.

MOORE, I. D.; GESSLER, P.; NIELSEN, G. A. E.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 57, [s.n.], p. 443–452, 1993.

MOORE, I. D.; GESSLER, P.; NIELSEN, G. A. E.; PETERSON, G. A. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. **Earth Surface and Processes and Landforms**, [s.l.], v. 13, [s.n.], p. 305 – 320, 1988.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 27, n. 6, p. 1177-1191, 1991.

NARDI, F.; GRIMALDI, S.; SANTINI, M.; PETROSELLI, A.; UBERTINI, L. Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using digital elevation models: the flat area issue. **Hydrology Science Journal**, [s.l.], v. 53, p. 1176-1193, 2008.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage network from digital elevation data. **Comput. Vision Graphics Image Process**, [s.l.], v. 28, [s.n.], p. 328-344, 1984.

O'LOUGHLIN, E.M. Saturation regions in catchments and their relation to soil and topographic properties. **Journal of Hydrology**, v.53, p. 229-246, 1981.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **WaterResourcesResearch**, [s.l.], v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.

PATTON, P. C.; SCHUMM, S. A. Gully erosion, Northwestern Colorado – Threshold phenomenon. **Geology**, v.3, n.2, p. 88-90, 1975.

PELLETIER, J. Flow Routing. In:_____ **Quantitative modeling of earth surface processes**.University Press, Cambridge, 1 ed.,2008. p. 295.

PIKE, R.J. The geometric signature: quantifying landslideterrain types from digital elevation models. **MathematicalGeology**, [s.l.], v. 20, [s.n.], p. 491–511, 1988.

PINHEIRO, H. S. K.; CHAGAS, C. S.; CARVALHO JUNIOR, W.; ANJOS, L. H. C.Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos.**Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.9, p.1384-1394, set. 2012

QUINN, P.F.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models.**Hydrological Processes**, [s.l.], [s.v.], n.5, p. 59-79, 1991.

RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; CARVALHO JUNIOR, O. A. FERNANDESE, N. F.; GOMES, R. A. T. Avaliação de Metodologias de Determinação do

Cálculo de Áreas de Contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Campinas, v. 4, n. 2, p. 41-49, 2003.

REATTO, A.; MARTINS, E.S.; FARIAS, M.F.R.; SILVA, Â.V.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. **Mapa pedológico digital: SIG atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo**. Documentos. Embrapa Cerrados, v. 120, p. 1-31, 2004.

RENNÓ, D. C; SOARES, J. V. **Capítulo 2: conceitos básicos de modelagem hidrológica**. Disponível em:

http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf.

Acesso em: 09 out. 2014.

SCHUMM, S. A. Geomorphic thresholds: the concept and its applications. **Transactions of the Institute of British Geographers**, p. 485-515, 1979.

SENA-SOUZA, J. P.; MARTINS, E. S.; COUTO JUNIOR, A. F.; BRAGA, A. R. S.; VASCONCELOS, V.; GOMES, M. P.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; REIS, A. M. **Mapeamento Geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu, escala 1:100.000**. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 60p, 2013.

SIEFERT, C. A. C. **Aplicação do TOPMODEL para a simulação de áreas hidrologicamente sensíveis na bacia hidrográfica do Rio Barigui**, PR. VIII SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 2010.

SIEFERT, C. A. C. **Delimitação de áreas hidrologicamente sensíveis por meio de modelagem de processos e da relação solo-vegetação em ambientes hidromórficos**. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SILVA, M. M. **Dinâmica espaço-temporal das áreas variáveis de afluência da bacia do córrego do Cavalheiro**. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Piracicaba, 2012.

SIMÕES, M. G. **Modeladores digitais de terreno em sistemas de informação geográfica**. 158p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de sistemas e computação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

TAN, Q; XU, X. Comparative Analysis of Spatial Interpolation Methods: an Experimental Study. **Sensors & Transducers**, Vol 165, 155-163p. Fev, 2014.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUES-ITURBE, I. On the extraction of channel Networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**. 5: 81-100, 1991.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **WaterResourcesResearch**, [s.l.], 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 soilandscape modelling. **Geoderma**, v.100, p.67-89,2001.

TORRY, D. Identifying gullies in the Mediterranean environment by coupling a complex threshold model and a GIS. **Società Geologica Italiana**, Roma. Vol. 21, pp. 441-443, 2012.

TRICART, J. Principes et méthodes de la geomorphologie. Paris, 201p. 1965

TSUKAMOTO, Y. Storm discharge from an experimental watershed. **Journal of the Japanese Forestry Society**, v. 45, p. 186-190, 1963.

TURCOTTE, R.; FORTIN, J. P.; ROUSSEAU, A. N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J. P. Determination of the drainage structure of a watershed using digital elevation model and a digital river and lake network. **Journalofhidrology**, 240:225-242. 2001.

VALERIANO, M.M.**Modelo Digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas especiais (INPE – 10550 RPQ), 2004. 72 p. (Boletim).

VANDEKERCKHOVE, L. Topographical threshold for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean. **Catena**, n. 33, p 271-292, 1998.

VASCONCELOS, V.; MARTINS, E. S.; REATTO. A.; COUTO JUNIOR, A. F.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; SANTOS, W. C.; LIMA, L. A. S.; DARCIO, X. PASSO, D. P.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional Serra da canastra. **RevistaBrasileira de Geomorfologia**. Campinas, v. 13, n. 2, p. 171-186, 2012.

WEYMAN, D. R. Throughflow on hillslopes and its relation to the stream hydrograph. **Hydrological Sciences Journal**, v. 15, nº 3,p. 25-33, 1970.

WILSON, J. P; GALLANT, J. C. Terrain-based approachesto environmental resource evaluation. In: LANE, S.; RICHARDS, K. S.; CHANDLER, J. H. (Orgs.). **Landform monitoring modeling and analysis**. New York: Wiley & Sons, 2001, p. 219-240.

WISE, S. T. The effect of GIS interpolation erros on the use of Digital elevation Models in Geomorphology. In: LANE, S.; RICHARDS, K. S.; CHANDLER, J. H. (Orgs.). **Landform monitoring modeling and analysis**. New York: Wiley & Sons, 2001, p. 139-164.

ZANARDI, R. P. **Geração de modelo digital do terreno a partir de par estereoscópico do sensor CDDdo satélite CBERS-2 e controle de qualidade das informações altimétricas**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.