

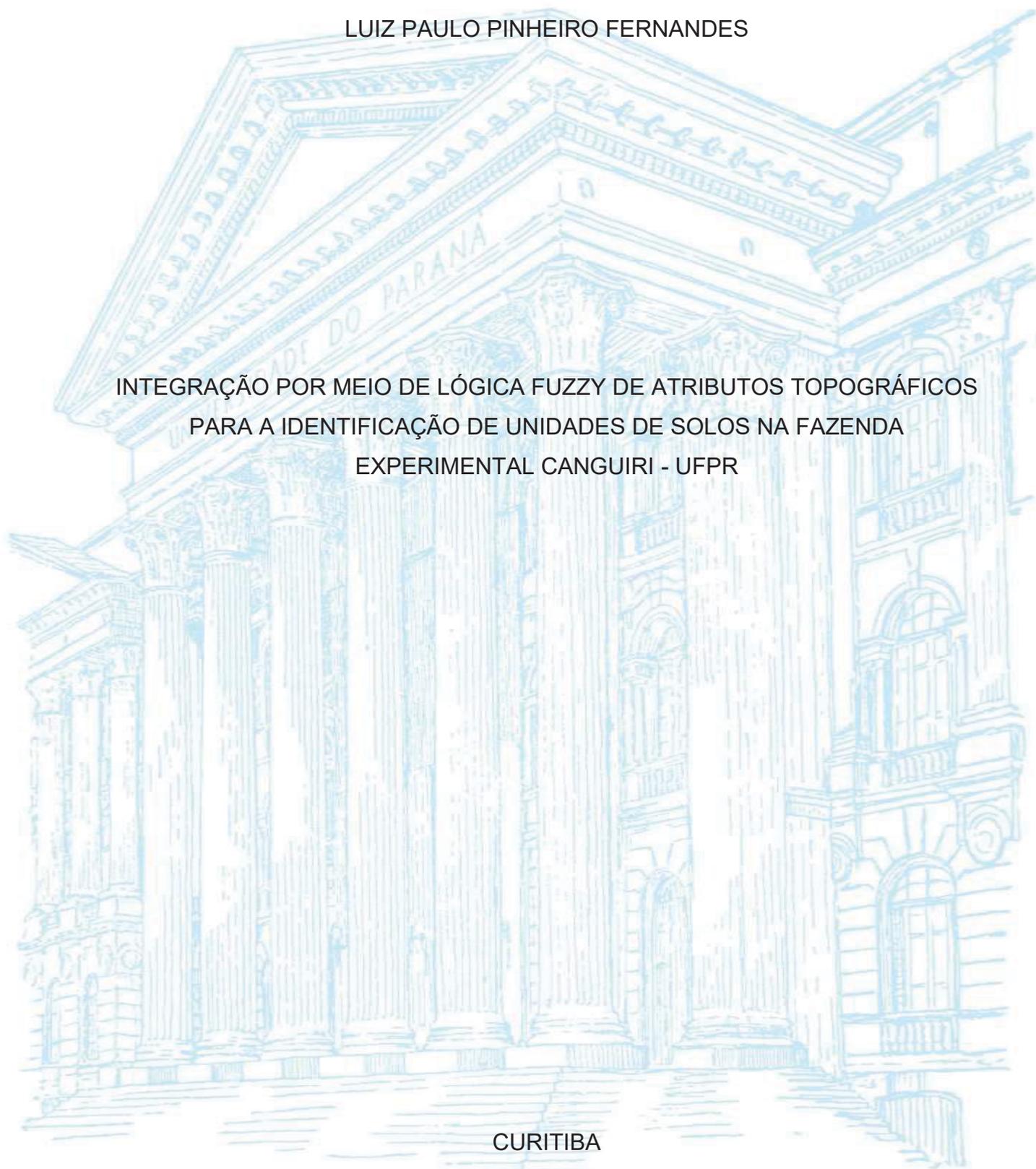
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ PAULO PINHEIRO FERNANDES

INTEGRAÇÃO POR MEIO DE LÓGICA FUZZY DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS
PARA A IDENTIFICAÇÃO DE UNIDADES DE SOLOS NA FAZENDA
EXPERIMENTAL CANGUIRI - UFPR

CURITIBA

2022



LUIZ PAULO PINHEIRO FERNANDES

INTEGRAÇÃO POR MEIO DE LÓGICA FUZZY DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS
PARA A IDENTIFICAÇÃO DE UNIDADES DE SOLOS NA FAZENDA
EXPERIMENTAL CANGUIRI - UFPR

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geografia, no Curso de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira

CURITIBA

2022

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F363i Fernandes, Luiz Paulo Pinheiro

Integração por meio de lógica Fuzzy de atributos topográficos para a identificação de unidades de solos na fazenda experimental Canguiri - UFPR [recurso eletrônico] / Luiz Paulo Pinheiro Fernandes – Curitiba, 2022.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira

1. Mapeamento digital - solos. 2. Pedometria. 3. Topografia. I. Silveira, Claudinei Taborda da. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD 526.98

Bibliotecária: Vilma Machado CRB-9/1563

TERMO DE APROVAÇÃO



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA -
40001016035P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUIZ PAULO PINHEIRO FERNANDES** intitulada: **INTEGRAÇÃO POR MEIO DE LÓGICA FUZZY DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE UNIDADES DE SOLOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI - UFPR**, sob orientação do Prof. Dr. CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Novembro de 2022.

Assinatura Eletrônica
07/12/2022 10:55:29.0
CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
07/12/2022 10:29:30.0
TONY VINICIUS MOREIRA SAMPAIO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
23/12/2022 17:12:16.0
ANGELO EVARISTO SIRTOLI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
08/12/2022 15:17:08.0
RICARDO MICHAEL PINHEIRO SILVEIRA
Avaliador Externo (INSTITUTO FEDERAL DO PARANÁ)

Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Ed. João José Bigarella - 1º andar - sala 108 - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3450 - E-mail: ufprposgeografia@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 240393

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 240393

Leitor este texto é para você.
Que encontre aqui o que procura.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná, em especial ao Setor de Ciências da Terra e ao Departamento de Geografia;

Aos professores que colaboraram com suas aulas e conteúdo;

Ao Prof. Dr. Claudinei Tabora da Silveira, pela orientação, dedicação, paciência e por acreditar no potencial da proposta desenvolvida ao longo desta jornada quando eu já havia perdido o foco;

À equipe do Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias (LAGEO/UFPR) pelo auxílio durante esta jornada acadêmica;

Aos profissionais da Saúde, neste momento complexo da história recente;

À minha família!

Aos meus amigos, pela cobrança e motivação constante

Ainda assim, a última memória triste paira e, às vezes, deixa-se levar como neblina flutuante, interceptando a luz do sol e enregelando a lembrança de tempos mais felizes; houve alegrias grandes demais para serem descritas com palavras e houve dores sobre as quais não ousarei alongar-me; e com isso em mente, digo: escale se quiser, mas lembre-se que coragem e força nada são sem prudência e que uma negligência momentânea pode destruir a felicidade de uma vida inteira. Não faça nada às pressas; olhe bem para cada passo; e, desde o começo, pense que poderá ser o fim. (Edward Whymper em Escaladas Entre os Alpes)

RESUMO

Os solos apresentam estreita relação com o relevo sendo possível a inferência das unidades de solos utilizando técnicas de análise digital do terreno. Esta análise pode ser nomeada pedometria e tem como base a análise dos atributos topográficos derivados de um modelo digital do terreno com o auxílio de técnicas de geoprocessamento. Neste contexto objetivou-se com o presente trabalho a realização do mapeamento dos limites dos solos com características hidromórficas com o auxílio dos atributos topográficos primários e secundários, derivados de um modelo digital do terreno com pixels de 10m na fazenda experimental Canguiri da Universidade Federal do Paraná. Para tanto utilizou-se um banco de dados espaciais onde foi possível aplicar o conjunto de operadores fuzzy. Os procedimentos metodológicos adotados nesta proposta foram divididos em três etapas principais: 1) obtenção do modelo digital do terreno e cálculo dos atributos topográficos primários e secundários; 2) análise da representatividade dos atributos topográficos, associação com a área de estudo e transformação fuzzy dos atributos topográficos; 3) seleção dos atributos utilizados e processamento das informações através da utilização dos operadores fuzzy: E, OU, SOMA, PRODUTO, GAMMA 0,25, GAMMA 0,5 e GAMMA 0,75. A partir destas etapas foi possível realizar a separação dos atributos topográficos em 3 grupos distintos de acordo com o grau de generalização após a fuzzyficação, bem como a avaliação dos operadores fuzzy, a fim de apontar o melhor desempenho na delimitação das áreas com características hidromórficas na área de estudo. Com base nisto, foi possível estabelecer que os operadores GAMMA apresentaram os melhores resultados para a classificação dos solos com características hidromórficas com destaque para o operador GAMMA 0,25 com aproximadamente 71% de pixels corretamente classificados no intervalo de 0,75 a 1 e aproximadamente 59% pixels corretamente classificados para o intervalo de 0,5 a 0,75. Os resultados obtidos apontam que os atributos topográficos do terreno apresentam grande utilidade como ferramenta auxiliar no mapeamento preditivo de solos. Cabe destacar que o mapeamento das áreas com características hidromórficas apresentou caráter preditivo, com potencial de suporte na tomada de decisões na delimitação destas áreas.

Palavras-chave: Mapeamento digital de Solos; Pedometria; Lógica Fuzzy; Atributos Topográficos Primários; Atributos Topográficos Secundários.

ABSTRACT

Soils are closely related to the relief, and it is possible to infer soil units using digital terrain analysis techniques. This analysis can be called pedometrics and is based on the analysis of topographic attributes derived from a digital model of the terrain with the aid of geoprocessing techniques. In this context, the objective of the present study was to carry out the mapping of the soil boundaries with hydromorphic characteristics with the help of primary and secondary topographic attributes, derived from a digital model of the terrain with 10 meters pixels in the Canguiri experimental farm of the Federal University of Paraná. For that, a spatial database was used where it was possible to apply fuzzy logic. The methodological procedures adopted in this proposal were divided into three main parts: 1) obtaining the digital elevation model and calculating the primary topographic attributes such as slope, aspect and curvatures and the secondary topographic attributes such as topographic wetness index and LS factor ; 2) analysis of the representativeness of topographic attributes, association with the study area and fuzzy transformation of the topographic attributes; 3) selection of attributes used and processing of information through the use of fuzzy operators: AND, OR, SUM, PRODUCT, GAMMA 0.25, GAMMA 0.5 and GAMMA 0.75. From these steps, it was possible to separate the topographic attributes into 3 distinct groups according to the degree of generalization after the fuzzy transformation of the topographic attributes, as well as the evaluation of the fuzzy operators, in order to point out the best performance in the delimitation of areas with characteristics hydromorphic conditions in the study area. Based on this, it was possible to establish that the GAMMA operators presented the best results for the classification of soils with hydromorphic characteristics, especially the operator GAMMA 0.25 with approximately 71% of pixels correctly classified in the range of 0.75 to 1 and approximately 59 % correctly sorted pixels for the range 0.5 to 0.75. The results obtained are satisfactory according to the objectives proposed for this work and indicate that the topographic attributes of the terrain are very useful as an auxiliary tool in the predictive mapping of soils. It should be noted that the mapping of areas with hydromorphic characteristics has a predictive character but has the potential to support decision-making in the delimitation of these areas.

Keywords: Digital soil mapping; Pedometry; Fuzzy Logic; Primary topographic attributes; Secondar Topographic attributes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo	19
Figura 2: Elementos da vertente	22
Figura 3: Representação esquemática do fluxo nas vertentes	23
Figura 4: Nove unidades de segmentação do relevo	24
Figura 5: A interdisciplinaridade da Pedometria	27
Figura 6: Exemplo dos limites fuzzy (esq) e booleano (dir).....	29
Figura 7: Gráfico da distribuição Fuzzy Gamma	31
Figura 8: Mapa de solos de referência	33
Figura 9: Localização dos solos Hidromórficos	34
Figura 10: Fluxograma simplificada das atividades desenvolvidas	35
Figura 11: Atributos topográficos mais recorrentes em trabalhos 0 a 50%	38
Figura 12: Atributos topográficos mais recorrentes em trabalhos 50% a 75%	39
Figura 13: Grade regular da superfície do solo (a), Pixel central do grid (b), janela de vizinhança (c).....	40
Figura 14: Exemplo da composição dos valores fuzzy com a distribuição J	45
Figura 15: Exemplo da composição dos valores fuzzy com a distribuição Sigmoidal	46
Figura 16: Etapas do processamento fuzzy e tabulação cruzada	47
Figura 17: Exemplos de histograma: a) Índice Topográfico de Umidade – Modificado e b) Aspecto	51
Figura 18: Exemplos do grau de generalização	53
Figura 19: Exemplos dos Operadores Fuzzy	55
Figura 20: Exemplos dos Operadores GAMMA	58
Figura 21: Comparativo entre os operadores classificados.....	59
Figura 22: Comparação entre as unidades de solos do mapa de referência e lógica fuzzy.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Exemplo de matriz de confusão	48
Quadro 2: Detalhamento dos atributos generalizados	49
Quadro 3: Detalhamento dos atributos moderados	50
Quadro 4: Detalhamento dos atributos específicos	50
Quadro 5: Valores do histograma para os operadores OU e SOMA.....	54
Quadro 6: Valores do histograma para os operadores fuzzy	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cálculo de pixels corretamente classificados operador GAMMA 0,25	57
Tabela 2: Cálculo de pixels corretamente classificados operador GAMMA 0,5	57
Tabela 3: Cálculo de pixels corretamente classificados operador GAMMA 0,75	57
Tabela 4: Matriz de comparativa das classes do mapa de referência as classes do mapa preditivo.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;
MDE	- Modelos Digitais de Elevação;
MDT	- Modelos Digitais do Terreno;
SiBCS	- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos;
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SEMA	- Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos;
UFPR	- Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 RELAÇÃO SOLO PAISAGEM.....	20
2.2 MAPEAMENTO DE SOLO	25
2.2.1 Mapeamento de Tradicional de Solo	25
2.2.2 Mapeamento Digital de Solo	26
2.3 LÓGICA FUZZY	28
2.3.1 Operadores Fuzzy.....	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	32
3.1.1 Softwares utilizados.....	32
3.1.2 Bases de dados utilizadas	32
3.1.2.1 Mapa de solos de referência	32
3.1.2.2 Dados cartográficos utilizados	34
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	35
3.2.1 Interpolador empregado	35
3.2.2 Cálculo da resolução do pixel.....	36
3.3 SELEÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS	37
3.4 ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS	39
3.4.1 Atributos topográficos primários	41
3.4.2 Atributos topográficos secundários	43
3.5 SOBREPOSIÇÃO DO MAPA DE REFERÊNCIA COM OS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS E APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY	45
3.6 INTEGRAÇÃO DOS ATRIBUTOS E AVALIAÇÃO DOS DADOS	46
3.7 COMPARAÇÃO DAS UNIDADES DE SOLOS MAPEADAS PELA LÓGICA FUZZY COM O MAPA DE SOLOS DA ÁREA DE REFERÊNCIA.....	48
4 RESULTADOS	49
4.1 ANÁLISE E SELEÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS FUZIFICADOS ...	49
4.2 ANÁLISE E SELEÇÃO DOS OPERADORES FUZZY	54

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE O MAPA PRELIMINAR DE SOLOS OBTIDO PELO MÉTODO FUZZY COM O MAPA DE REFERÊNCIA.....	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICE 1 – LISTA DOS ARTIGOS CONSULTADOS PARA SELEÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS	70
APÊNDICE 2–HISTOGRAMAS DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS.....	74
APÊNDICE 3 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS FUZZIFICADOS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Solo pode ser conceitualizado como o meio de suporte para o crescimento e desenvolvimento de plantas terrestres (LYON; BUCKMAN, 1922) formado por material mineral pouco consolidado (FIPPIN, 1912; HILLGARD, 1921) ou associado com material orgânico na superfície do planeta (CURRI, 1993; BOCKHEIM *et al.* 2005; IBGE, 2015) e de origem natural ou antrópica.

Hermuche *et al.* (2002), Santos (2004) e Lepch (2011) destacam também que o elemento solo está ligado diretamente com as atividades humanas, bem como efeitos decorrentes destas. Desse modo, para que o planejamento da utilização do solo seja efetuado de maneira correta, é necessário compreender sua distribuição na paisagem, pois esta prática permite que o manejo da região atenda as limitações e restrições dos solos ali presentes.

Pode-se categorizar o elemento solo através de diferentes métodos de mapeamento. Esta categorização é definida com base na escala de trabalho e o número de observações de campo, sendo organizados em exploratório, reconhecimento, semi-detalhado, detalhado e ultra-detalhado (IBGE, 2015).

Ainda, segundo o IBGE (2015), mapas de solos semi-detalhados, em escala maior ou igual a 1:50.000, são aconselháveis para a aplicação em estudos ambientais tendo em vista que o nível de detalhes fornece informações razoavelmente precisas para o planejamento regional, como, por exemplo, em programas de conservação de manejo dos solos. De acordo com McBratney *et al.* (2003), Lagacherie (2006) e Santos (2007), a cobertura nacional de mapeamentos pedológicos encontra-se disponível em níveis exploratórios e esquemáticos (escalas 1:1.000.000 a 1:5.000.000) e apenas 35% de todo território nacional é coberto por mapas de solos em escalas médias e pequenas (1:100.000 a 1:600.000).

No entanto, o desenvolvimento destes mapeamentos convencionais em escala de maior detalhe requer maior número de coletas e observações de campo. A execução destas atividades de campo e mapeamento é onerosa financeiramente e demanda uma quantidade significativa de tempo para sua adequada execução. Em acréscimo, o mapeamento executado pode apresentar inconsistências perante o objeto de estudo em virtude de erros no posicionamento dos pontos de coleta e da inexperiência do executor do estudo (ZHU *et al.*, 2012).

Atualmente, um conjunto de novos métodos e técnicas têm sido empregados na delimitação dos polígonos de solos, oferecendo assim uma ferramenta de apoio para mapeamentos pedológicos em escalas maiores, visando favorecer a delimitação das unidades. Para tanto, faz-se necessário a integração do conhecimento de diversas áreas correlatas às Ciências da Terra, integrando conhecimentos associados à morfogênese e o entendimento dos fluxos superficiais e subsuperficiais (VIDAL-TORRADO *et al.*, 2005).

Desta forma, os avanços no contexto das geotecnologias, bem como sua utilização em métodos organizados como Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (CHRISTOFOLETTI, 1999) associados a análise digital do relevo, caracterizam um cenário favorável para a utilização de técnicas quantitativas para a identificação e classificação de unidades taxonômicas de solos a partir de Modelos Digitais de Elevação e informações derivadas (McBRATNEY *et al.*, 2000; HENGL, 2003; SILVEIRA, 2010).

Para Birkeland (1984) e Klingebiel *et al.* (1987), o relevo apresenta relação direta com os fatores formadores de solos, refletindo os fatores formadores onde exerce influência sobre o clima, pedogênese e processos esculturais associados ao transporte e sedimentação de material nas vertentes. Para Sirtoli *et al.* (2008), o entendimento desta relação é fundamental para inferência da distribuição das classes dentro do segmento da vertente.

O uso de modelos digitais de elevação e dados cartográficos derivados destes constitui uma importante ferramenta na identificação e delimitação das unidades de solos. Estes mapeamentos digitais de solos foram definidos, em meados dos anos de 1980, por McBratney como pedometria (MINASNY; McBRATNEY, 2016). O conjunto de dados derivados do MDE são descritos por Moore *et al.* (1993) como atributos topográficos primário e secundário. Os atributos topográficos primários são calculados diretamente de um Modelo Digital do Terreno como, por exemplo, declividade e elevação. Os atributos secundários podem ser descritos como o resultado da interação entre os atributos primários e apresenta como resultado, por exemplo, o índice topográfico de umidade entre outros.

Considerando que o emprego de técnicas pedométricas oferece auxílio na execução de mapeamentos pedológicos, o objetivo geral da pesquisa foi a realização do mapeamento digital com foco na delimitação dos solos de caráter hidromórfico, com o uso de atributos topográficos primários e secundários, integrados por meio de lógica fuzzy na fazenda experimental Canguiri da Universidade Federal do Paraná

Para tanto, os objetivos específicos são:

- Avaliar a representatividade dos atributos topográficos a fim de executar uma transformação fuzzy que melhor represente a área de interesse;
- Testar a aplicação dos operadores fuzzy na identificação dos solos da área de estudo;
- Utilizar um mapa pedológico de referência para conferir se os operadores são fidedignos na informação gerada.

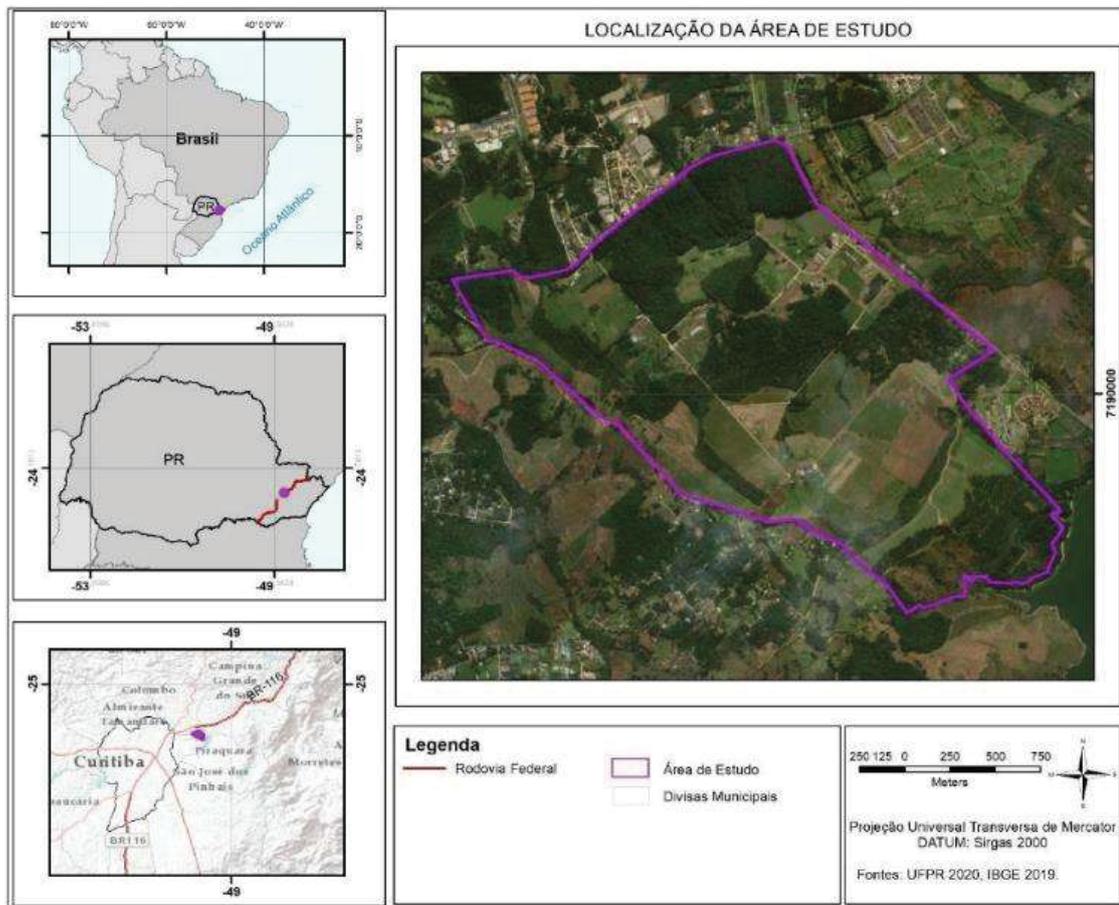
1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi selecionada pela disponibilidade de acesso para atividades de campo, por possuir base cartográfica em escala 1:1.000 e dispor de trabalhos de levantamento de solos pretéritos.

A área está localizada no município de Pinhais, no estado do Paraná, entre as coordenadas W 49° 06', S 25° 24' e W 49° 08', S 25° 23', totalizando uma área de 4,47km², constituída pela Fazenda Experimental Canguiri da Universidade Federal do Paraná – UFPR (Figura 1).

Situa-se no Primeiro Planalto Paranaense, inserida entre as planícies fluviais e o Planalto de Curitiba, o relevo apresenta dissecação moderada com topos aplainados e alongados, vertentes convexas, predominantemente ondulado e suave ondulado, contando ainda com áreas de planície fluvial com sedimentos inconsolidados do Quaternário (SANTOS, 2006).

Figura 1: Localização da área de estudo



Fonte: O Autor (2022)

A área apresenta o gradiente altimétrico de 63 m com a elevação máxima de 953 m e a mínima de 890 m acima do nível do mar (DELAZARI; ERCOLIN FILHO, 2019). Possui baixos valores médios de declividade, com as áreas mais declivosas se concentrando nas margens das drenagens regionais compostas de vales de fundo em formato de “U” (SILVEIRA, 2010).

Do ponto de vista geológico a área localiza-se na Bacia Sedimentar de Curitiba especificamente sobre a formação Guabirotuba formada após sucessivas fases erosivas na bacia do Alto Iguaçu com posterior deposição em ambiente semiárido, com chuvas torrenciais formando depósitos tipo playa-lake, constituídos por argilitos, arcósios, depósitos rudáceos e margas (MINEROPAR, 2001)

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é predominantemente Cfb. De acordo com Maack (2012) as temperaturas médias do mês mais quente são inferiores a 22°C e o restante com médias maiores que 10°C com precipitações regulares sem a definição de uma estação seca.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RELAÇÃO SOLO PAISAGEM

Os solos formam um corpo tridimensional na paisagem. Desta forma, para a compreensão da sua distribuição e seus fatores formadores, faz-se necessário um entendimento da paisagem como um todo (VIDAL-TORRADO, 2005; IBGE, 2015).

Indicadores como o clima regional, vegetação original e substrato geológico são utilizados como parâmetros para o mapeamento de solos em mapas de pequena escala ao passo que informações locais como topografia, microclima são utilizadas na descrição de solos em áreas menores (MENDONÇA SANTOS; SANTOS, 2003) considerando escalas grandes.

Assim, a ideia de componentes influenciadores na formação dos solos foi preconizada por Dokuchaev, Sibirtsec e Glinka como a interação de quatro fatores: clima, organismos, subsolo e tempo (AFANISHEV, 1927), onde posteriormente acrescentou o relevo como um dos fatores influenciadores (NIKIFOROFF, 1949; SCHAETZL *et al.*, 2005). Esta equação foi remodelada posteriormente em 1941 por Hans Jenny que surgiu a equação (1) sob a qual um determinado solo pode ser descrito. Onde S é uma propriedade do solo a ser predita em função do clima (cl), organismos (o), relevo (r), material de origem (p), e tempo (t)(LEPSCH, 2010).

$$\text{Solo} = f(\text{clima}, \text{organismos}, \text{material de origem}, \text{relevo}, \text{tempo}) \quad (1)$$

Neste caminho, o relevo como configuração da superfície do terreno relaciona-se a distribuição de formação de solos em todas as escalas naturais de paisagem indo da escala continental até a vertente propriamente dita (KÄMPF e CURI, 2012).

Em linhas gerais, a geomorfologia e a pedologia apresentam uma ideia comum no que diz respeito aos solos, ambas as linhas de estudo procuram relacionar os processos geradores e os solos composições na paisagem, seja em aspecto local como regional (QUEIROZ NETO, 2000; KÄMPF e CURI, 2012).

Milne (1935) foi um dos precursores na abordagem solo-relevo, estabeleceu o conceito de Catena, como a sucessão contínua de solo na vertente ou a sucessão de contínua de solos entre os topos e o vale mais próximo. Este conceito apoia o

mapeamento de solos, pois explica o padrão de desenvolvimento e distribuição dos solos nas paisagens interligando os vários processos ocorridos do interflúvio até o fundo do vale. Milne (1935) estabelece que os solos sofrem alterações ao longo deste perfil em decorrência de mudanças no padrão de drenagem local, do transporte diferencial e deposição de sedimentos erodidos e, à lixiviação, translocação e redeposição de materiais solúveis via superfície ou subsuperfície não excluindo a possibilidade de um substrato geológico heterogêneo (SCHAETZL *et al.*, 2005; KÄMPF e CURI, 2012).

Moore (1993) e Sirtoli (2008) destacam que o relevo apresenta forte influência nos processos pedogenéticos e de distribuição dos solos. Para estes autores, o relevo exerce um papel direto nos processos físicos ora favorecendo a morfogênese, nas regiões com declividades mais acentuadas, e ora favorece a pedogênese onde a declividade é menos expressiva. Neste caminho a distribuição espacial dos solos está associada às variações do fluxo hídrico na vertente. De acordo com Kämpf e Curi (2012) os solos ainda apresentam interações com os solos localizados a montante e a jusante do local observado.

Inicialmente a topografia era um fator dominante no desenvolvimento vertical no estudo de solos, mas após o estabelecimento do termo Catena a geomorfologia passa então a receber maior atenção, uma vez que este conceito salienta a importância do relevo sobre a movimentação vertical e horizontal do fluxo hídrico dentro do relevo. Este entendimento estabeleceu que uma Catena é uma superfície onde os solos são geneticamente e evolutivamente interdependentes e demonstra que os termos superfície geomórfica e superfície pedológica são sinônimos (SOMMER; SCHLICHTING, 1997; BOCKHEIM *et al.* 2005; SCHAETZL *et al.*, 2005).

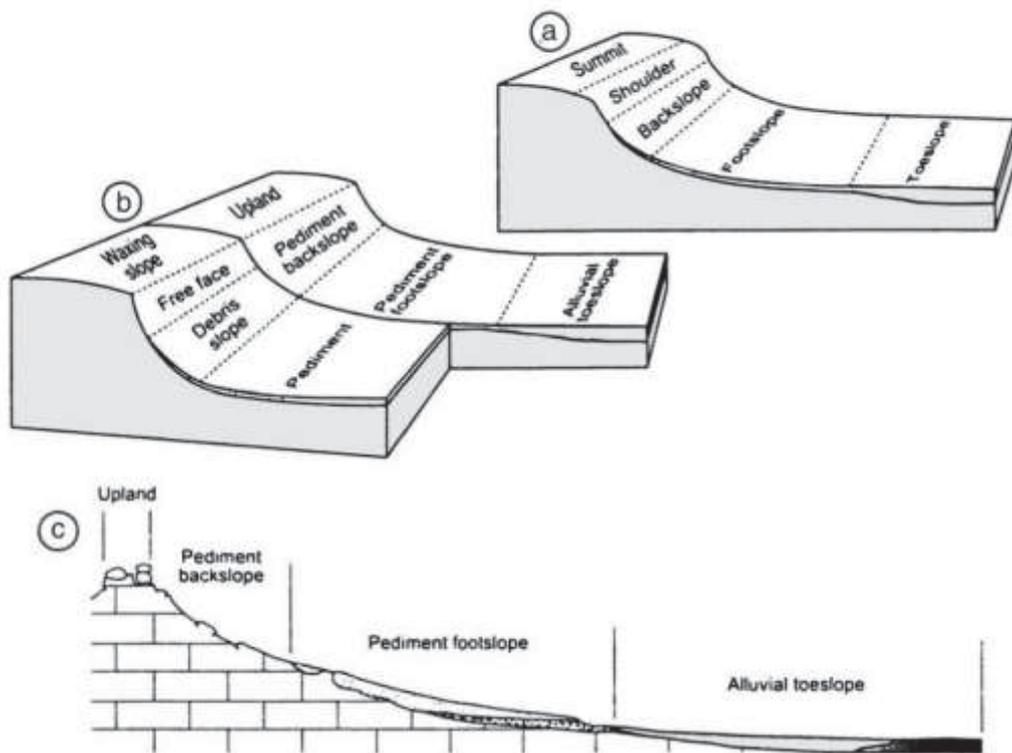
Considerando a forte relação dos solos com o material sob o qual se desenvolvem, as variações nos tipos de solos presentes em determinado perfil são associadas ao conceito de Catena, derivados de material parental semelhante e que ocorre sob condições climáticas também semelhantes, mas que tem características diferentes relacionadas às variações do relevo. Desta forma, o entendimento dos processos geomorfológicos é fundamental no entendimento da origem e desenvolvimento do sistema solo-paisagem (GERRARD, 1992).

Desta forma, a existência de vários modelos de vertente e suas características específicas estão associados com os solos que neles ocorrem. Porém a relação entre o relevo e os elementos formadores de solos é diversificada uma vez que o solo

apresenta grande variabilidade na distribuição espacial e em todas as escalas de paisagem (SILVEIRA, 2010). Para Kämpf e Curi (2012) o relevo expressa efeitos diretos e indiretos nos processos de formação dos solos, efeitos diretos são expressos por meio da influência do relevo e indiretos por clima e hidrologia.

Para Schaetzl et al. (2005), solos e relevo evoluem de maneira conjunta sendo diretamente afetados pela geomorfologia e através do seu desenvolvimento também se tornam fatores de evolução geomorfológica. Os modelos de estudo solo-paisagem tiveram maior impulso a partir dos trabalhos de Ruhe (1956,1969), Daniels *et al.*(1971) onde o entendimento da dinâmica superficial exerce influência na formação do solo independente do substrato geológico ao longo da vertente, uniforme ou não, apresentando a superfície como erosional, deposicional ou uma combinação de ambos crescendo ainda o tempo na observação (Figura 2). De maneira geral o modelo proposto por Ruhe pode apresentar cinco elementos tais como interflúvio, ombro, encosta, sopé e sopé colúvio-aluvial (KÄMPF E CURI, 2012).

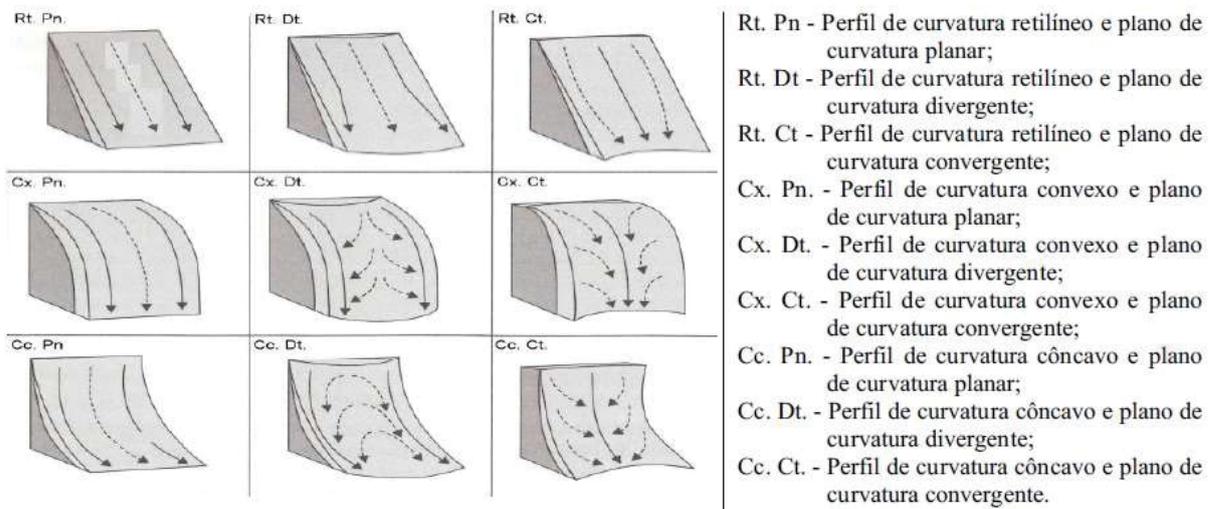
Figura 2: Elementos da vertente



Fonte: Adaptado de Schaetzl et al. (2005), elementos da vertente de acordo com (a) Ruhe (1960 e 1975b); (b) Wood (1942) e Ruhe (1960); (c) Milne (1936b).

Huggett (1975) propõe que o desenvolvimento dos solos deve ser observado do ponto de vista de três dimensões ao contrário da observação vertical proposta no modelo de Catena de Milne (1935), esta observação deve ser aplicada ao se estudar a bacia hidrográfica pois só assim é possível analisar os divisores de água e direção do fluxo hídrico sobre as vertentes. Huggett (1975) estabelece uma combinação de plano e perfil de curvatura com nove padrões interpretativos que demonstram as diferenças nos padrões de drenagem de água nas vertentes (Figura 3)

Figura 3: Representação esquemática do fluxo nas vertentes

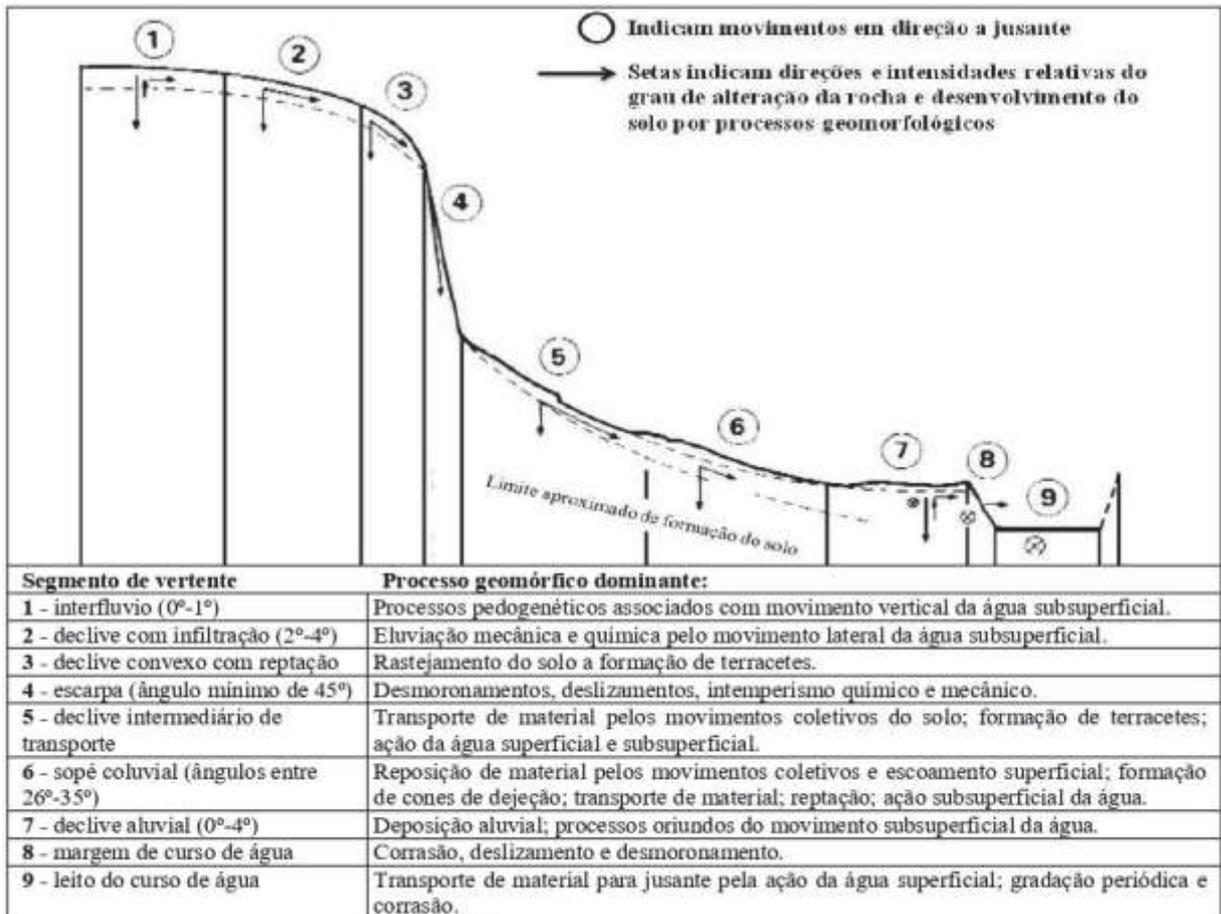


Fonte: Silveira (2010) adaptado de Huggett (1975)

Dalrymple e Conacher (1977) reconhecendo a utilidade, mas, também a simplicidade do conceito de Catena observam que muitos processos pedogenéticos acontecem verticalmente na vertente e em paralelo com a declividade. Desenvolvem então um modelo hipotético dividido em nove segmentos de vertente interdependentes, podendo ou não estarem presentes em uma vertente (SCHAETZL *et al.* 2005). Vidal-Torrado *et al.* (2005) detalha estes segmentos sendo eles: 1 onde há o predomínio de pedogênese em solos profundos e pouca erosão, o segmento 2 devido ao processo de eluviação este segmento é menos profundo que o anterior, o segmento 3 apresenta significativa erosão não acumulando materiais na superfície, o segmento 4 em virtude do alta erosão apresenta solos rasos e/ou afloramentos de rochas, representando uma escarpa, cuja formação se dá pela rocha divide o sopé de transporte, representada pelo segmento 5; criando uma área de acumulação no segmento 6 e nas planícies no segmento 7, onde predominam processos de deposição aluvial auxiliados pelo fluxo subsuperficial e onde ocorre também saturação

hídrica formando ambientes de hidromorfia. Esta representação pode ser observada na Figura 4.

Figura 4: Nove unidades de segmentação do relevo



Fonte: Silveira (2010) adaptado de DALRYMPLE *et al.* (1968)

Assim o conhecimento do sistema de drenagem de uma área, apoiado na relação solo-paisagem apresenta-se como importante ferramenta no entendimento dos processos pedogenéticos e o comportamento dos solos na paisagem (VIDAL-TORRADO *et al.*, 2005)

Campos (2012) destaca a importância da discussão de conceitos das relações solo-relevo e acrescenta que poucos trabalhos abordem a temática visando a identificação e mapeamento da distribuição dos solos, muito embora a utilização destes modelos nos permite entender o solo como corpo natural na paisagem, os aspectos topográficos e sua relação como fatores da variação espacial dos solos.

2.2 MAPEAMENTO DE SOLO

2.2.1 Mapeamento de Tradicional de Solo

Os levantamentos pedológicos são, segundo Lepsch (2002), a síntese das informações referentes à formação e distribuição geográfica dos diferentes tipos de solos existentes em uma paisagem natural. As cartas pedológicas podem apresentar diferentes graus de detalhe variando de acordo com a intensidade dos trabalhos de levantamento e a escala de publicação do material.

Os levantamentos de solos podem apresentar objetivos diversificados que incluem a geração de conhecimento sobre as características pedológicas de um país ou região, até o planejamento do uso e ocupação da terra. O principal objetivo de um levantamento de solos pode ser descrito como a subdivisão do substrato em áreas homogêneas, apresentando pouca ou nenhuma variabilidade, em função dos parâmetros de classificação e das características utilizadas para distinção dos solos (IBGE, 2015).

Segundo IBGE (2015), tradicionalmente levantamentos de solos consistem em pesquisas de gabinete e extensos trabalhos de campo com o objetivo de observar a distribuição geográfica dos solos determinada por um conjunto de propriedades observáveis com destaque para os aspectos do meio físico e de características morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e biológicas dos solos, visando à sua caracterização, classificação e posterior mapeamento (IBGE, 2015).

Mapeamentos tradicionais podem ser pensados como uma mescla entre o método científico e um elemento artístico quando se associa a habilidade e conhecimento prévio do pedólogo. O trabalho de campo e sua etapa subsequente de laboratório envolvem a criação de um modelo mental que proporciona o entendimento do conjunto de características observáveis do meio físico. Toda reavaliação deste modelo tem como resultado a alteração deste modelo mental reformulando assim o entendimento da distribuição dos solos no local (WILDING, 1985 *apud* McBRATNEY *et al.* (2000).

Para McBratney *et al.* (2000) os métodos convencionais de levantamentos de solos apresentavam maior caráter qualitativo, como resposta a isto, tem se observado nos últimos anos o desenvolvimento de modelos quantitativos, os quais foram categorizados em um novo ramo da ciência do solo conhecido como Pedometria.

2.2.2 Mapeamento Digital de Solo

Devido a sua complexidade, mapeamentos tradicionais de solos tendem a ter uma confecção onerosa. Além disso, o método de mapeamento tradicional pode apresentar erros e falhas casados pelo pedólogo ao embasar o levantamento apenas em sua experiência (ZHU *et al.*, 2015). Para contornar isto, ao longo dos últimos anos tecnologias que possibilitam o avanço destes estudos foram desenvolvidas, aperfeiçoadas e inseridas por meio do Geoprocessamento e do Sistema de Informação Geográfica (SIG) nos estudos ambientais (McBRATNEY *et al.*, 2003).

O mapeamento pedológico digital pode ser descrito como a criação de SIGs do solo por modelos numéricos que apontam as variações espaciais dos tipos e propriedades do solo, a partir de observações e variáveis relacionadas ao meio ambiente (LAGACHERIE, 2008). Com isso os mapeamentos de solos apoiados em modelos digitais quantitativos são cada vez mais populares entre aqueles que estudam solos. A utilização desta ferramenta facilitou o entendimento dos padrões de distribuição natural do solo e visa o auxílio e a complementação dos trabalhos de campo e escritório (Hengl, 2003; McBRATNEY *et al.*, 2003; SIRTOLI, 2008; NOWATZKI, 2013) afirma que os mapeamentos de solos apoiados em métodos digitais apresentam melhorias significativas quando são comparados aos mapeamentos efetuados por métodos tradicionais.

A utilização de modelos digitais do terreno pode dar suporte à classificação da paisagem, fornecendo uma segmentação da mesma em ambientes topográficos distintos permitindo uma melhor compreensão dos fluxos de água no terreno possibilitando o estabelecimento de relações entre a forma do terreno e os atributos do solo. Estes modelos favorecem o entendimento dos processos de erosão e deposição bem como a distribuição dos solos ao longo da paisagem. Deste modo, estes modelos permitem ao pedólogo observar as predições entre as interações da vertente, fluxo hídrico, fluxo de sedimentos nos processos de formação dos solos (MOORE, 1993; CAMPOS, 2006; SIRTOLI, 2008; McBRATNEY *et al.*, 2003).

Assim metodologias de mapeamento de solos que utilizam padrões de segmentação do relevo calculados a partir de um MDT são mais eficientes ao tornar os levantamentos de solos mais precisos, rápidos e mais baratos (HERMUCHE *et al.*, 2002; SILVEIRA, 2010)

A aplicação de modelos matemáticos e estatísticos em conjuntos de informação visando o estudo quantitativo da distribuição dos solos na paisagem é denominado por McBratney (1986) como Pedometria cujo radical de origem grega Pedos e Metron significam respectivamente solo e medida. Webster (1994) acrescenta que o termo é usado de maneira análoga a, por exemplo, biometria e em resumo pode ser descrita como a estatística orientada ao mapeamento de solo com foco orientado ao problema.

A pedometria reúne muitos campos científicos, de estatística até pedologia. Pode ser definida como um campo interdisciplinar que estabelece relações matemáticas entre classes e propriedades de solos e as variáveis preditoras (McBRATNEY, 1996; HENGL, 2003). A Figura 5 mostra um diagrama de venn ilustrando a interdisciplinaridade da Pedometria.

Figura 5: A interdisciplinaridade da Pedometria



Fonte: Coelho (2010) adaptado de Hengl (2003)

Para Hengl (2003) os mapas pedológicos obtidos através de pedometria apresentam significativa melhora nos trabalhos de mapeamento pedológico efetuados de maneira tradicional pois apresentam como resultado mapas mais detalhados e objetivos.

Para McBratney (2000) os modelos quantitativos utilizados em pedologia para descrever a ocorrência dos solos podem ser caracterizados por informações conflitantes e informações equivocadas atribuídas ao pedólogo responsável pelo mapeamento. Esta incerteza, imprecisão e ambiguidade são questões inevitáveis quanto se trata de sistemas naturais como, por exemplo, solos. Esta complexidade exagerada é associada com maiores graus de precisão onde nem sempre é possível associar com um maior nível de acerto.

Assim a utilização da lógica fuzzy para a delimitação dos limites das classes de solos utiliza o limite abstrato associado a divisão entre as classes de solos mapeadas (McBRATNEY, 2000).

2.3 LÓGICA FUZZY

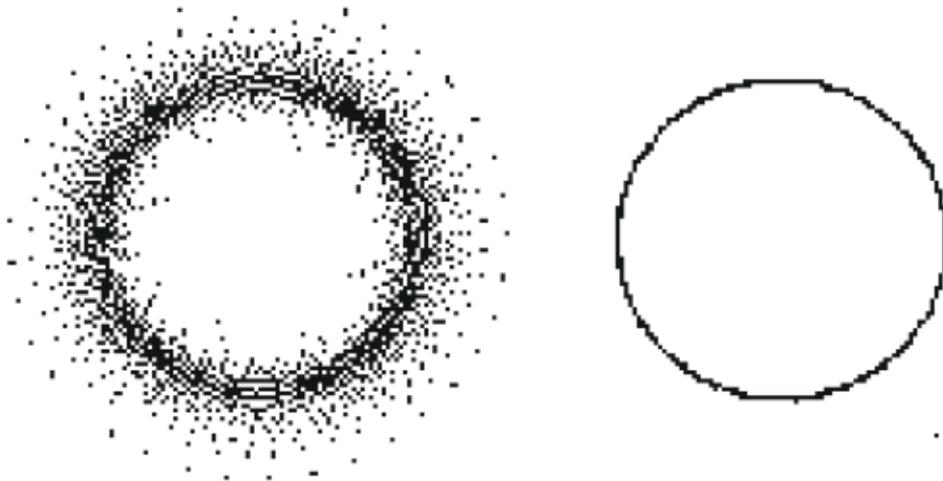
Zadeh (1965) em seu trabalho intitulado Fuzzy Sets, sugere que objetos encontrados no mundo real não correspondem a um critério específico de classificação como, solos ou classificação do relevo sendo complexa sua categorização de acordo com limites rígidos. Assim a lógica Fuzzy pode ser vista como uma generalização da lógica tradicional booleana, que trabalha com valores definidos como 0 e 1, trazendo valores incertos para a análise uma vez que no intervalo entre 0 e 1 existem infinitos valores também chamados de grau de pertinência (BONHAM-CARTER, 1994; ZIMMERMANN, 2001; SILVA, 2005).

Assim a lógica Fuzzy apresenta uma maneira de transcrever valores ponderados que representam a transição entre classes viabiliza assim a transcrição de um modelo empírico possibilitando a transcrição da experiência do operador para a matriz de dados utilizada (CÂMARA *et al.*, 2001; SILVA, 2005; BELINTANI, 2007; SANTANA, 2014). A representação desta diferença entre a lógica booleana e a lógica Fuzzy pode ser observada na Figura 6.

Como solos naturais não apresentam na maioria dos casos limites definidos seu mapeamento através de técnicas tradicionais booleanas não é a melhor ferramenta para representar a transição entre as classes. Para melhorar a transição

entre as classes tornando a mais sutil pode-se aplicar a lógica fuzzy (JANG 1993 apud McBratney, 2003)

Figura 6: Exemplo dos limites fuzzy (esquerda) e booleano (direita)



Fonte: Câmara (2001) adaptado de Burrough (1998)

2.3.1 Operadores Fuzzy

Segundo Santana (2014) é possível manipular dados oriundos da lógica Fuzzy utilizando-se métodos lógicos, no entanto, para que isto seja possível se faz necessária uma generalização das operações básicas da lógica binária visto que as operações básicas em subconjuntos Fuzzy são similares. Estas operações são executadas visando a obtenção de um mapa como produto através da sobreposição dos vários conjuntos Fuzzy utilizados. A descrição dos operadores utilizados neste processo é listada abaixo.

Operador Fuzzy E (AND) – Intersecção

Equivalente ao operador booleano e onde o operador MIN é o controlador da operação.

$$\mu = \text{MIN}(\mu_a \mu_b \dots) \quad (2)$$

Onde:

μ = Grau de pertinência do conjunto Fuzzy;

μ_a, μ_b = valores de pertinência dos mapas hipotéticos;

MIN= menor valor entre os elementos do conjunto;

Operador Fuzzy OU (OR) - União

É equivalente ao operador OR booleano, onde o valor de pertinência de saída é controlado pelos valores máximos do mapa de cada localização

$$\mu = MAX(\mu_a \mu_b \dots) \quad (3)$$

Onde:

μ = Grau de pertinência do conjunto Fuzzy;

μ_a, μ_b = valores de pertinência dos mapas;

MAX= maior valor entre os elementos do conjunto

Operador Produto

É o produto algébrico entre os valores dos elementos Fuzzy. Seu resultado tende a ser pequeno em virtude da multiplicação de diversos números menores que 1.

$$\mu = N\mu_i \quad (4)$$

Onde:

μ = Grau de pertinência do conjunto fuzzy;

μ_i = Valores de pertinência para o i-ésimo mapa;

N= número de mapas na combinação.

Operador Soma

É um operador complementar ao Produto, resulta sempre um valor maior ou igual ao maior valor presente no dado de entrada, como resultado esta operação aumenta o valor de pertinência nos dados de entrada.

$$\mu = 1 - N(1 - \mu_i) \quad (5)$$

Onde:

μ = Grau de pertinência do conjunto fuzzy;

μ_i = Valores de pertinência para o i-ésimo mapa;

N= número de mapas na combinação.

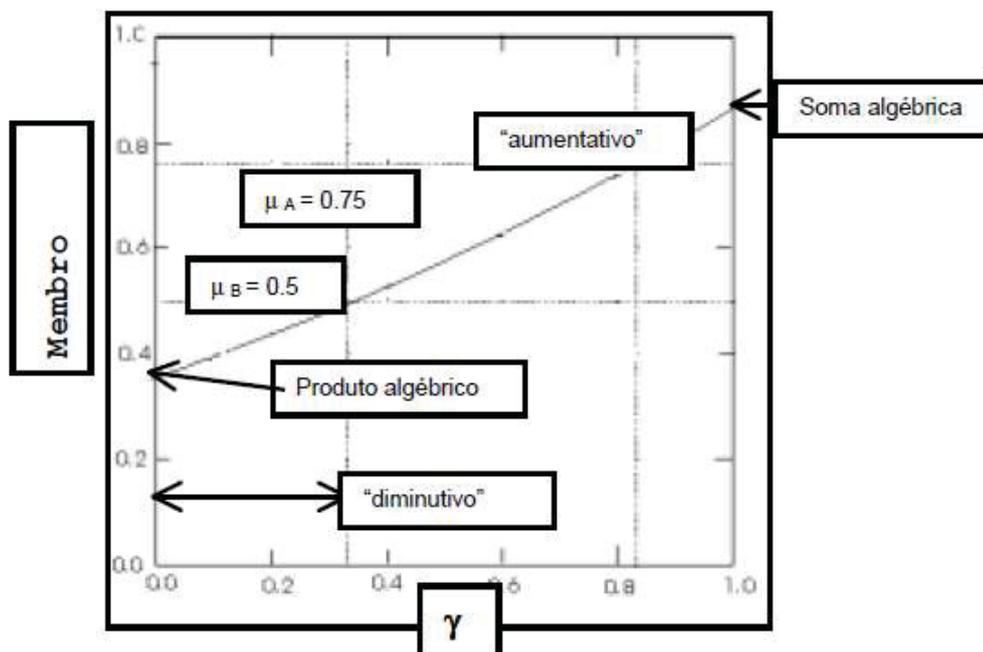
Operador Gamma

Este operador é definido em dois termos sendo um produto algébrico Fuzzy e uma soma algébrica Fuzzy fórmulas (4) e(5) respectivamente.

$$\mu = (soma)^\gamma (produto)^{1-\gamma} \quad (6)$$

Este operador permite ao usuário variar a pertinência de cada termo usado para seu cálculo ao se atribuir valores entre (0,1) ao expoente γ . Desta forma, se o valor de γ for 1 seu resultado será igual ao operador SOMA ao passo que se atribuído o valor 0 este resultado será igual ao operador PRODUTO. Se atribuídos valores de γ entre 0 e 0,35 os valores de saída serão inferiores aos de entrada e valores ente 0,35 e 0,8 resultarão em valores de saída entre o menor e o maior valor do dado de entrada. Uma representação gráfica desta distribuição pode ser observada na Figura 7

Figura 7: Gráfico da distribuição Fuzzy Gamma



Fonte: Câmara (2001)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na elaboração desta proposta foram divididos em *softwares* e bases de dados. O primeiro grupo foi o primeiro a ser utilizado em toda a elaboração da proposta, tanto no processamento quanto na elaboração das bases cartográficas utilizadas. As bases de dados correspondem às informações de referência para a área de estudo.

3.1.1 Softwares utilizados

Para cumprir os objetivos listados nesta proposta e seus procedimentos metodológicos foram utilizados os seguintes *softwares*:

- a) ESRI ArcGIS 10.4 para a edição de arquivos vetoriais, geração do modelo digital, álgebra de mapas e composição final dos mapas temáticos;
- b) SAGA GIS 2.3.2 para o cálculo dos atributos topográficos.

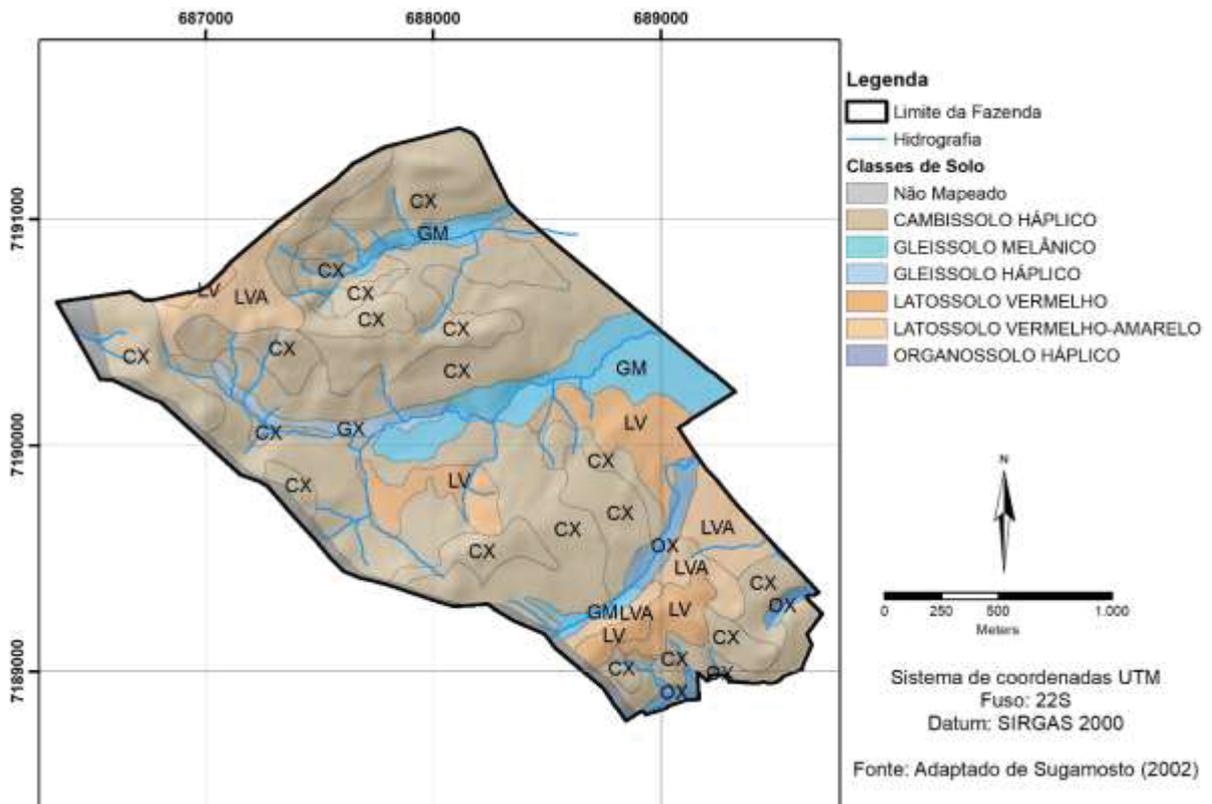
3.1.2 Bases de dados utilizadas

3.1.2.1 Mapa de solos de referência

O mapeamento pedológico de referência utilizado nesta proposta foi elaborado por Sugamosto (2002) em escala 1:10.000 elaborado na primeira edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018) e apresentados na Figura 8.

De maneira geral este mapeamento apresentado é dividido, no primeiro táxon, por 5 classes de solos das quais podemos destacar Cambissolos como a principal com cerca de 65,9% (279,89 ha) da área de estudo. As demais classes se dividem em: Latossolos e Gleissolos com 17,5% e 11% (74,28 e 46,68 ha) respectivamente e Organossolos com cerca de 2,3% (9,65ha). Cabe destacar que 3,3% (13,92 ha) da área de estudo não é compreendida por este material.

Figura 8: Mapa de solos de referência

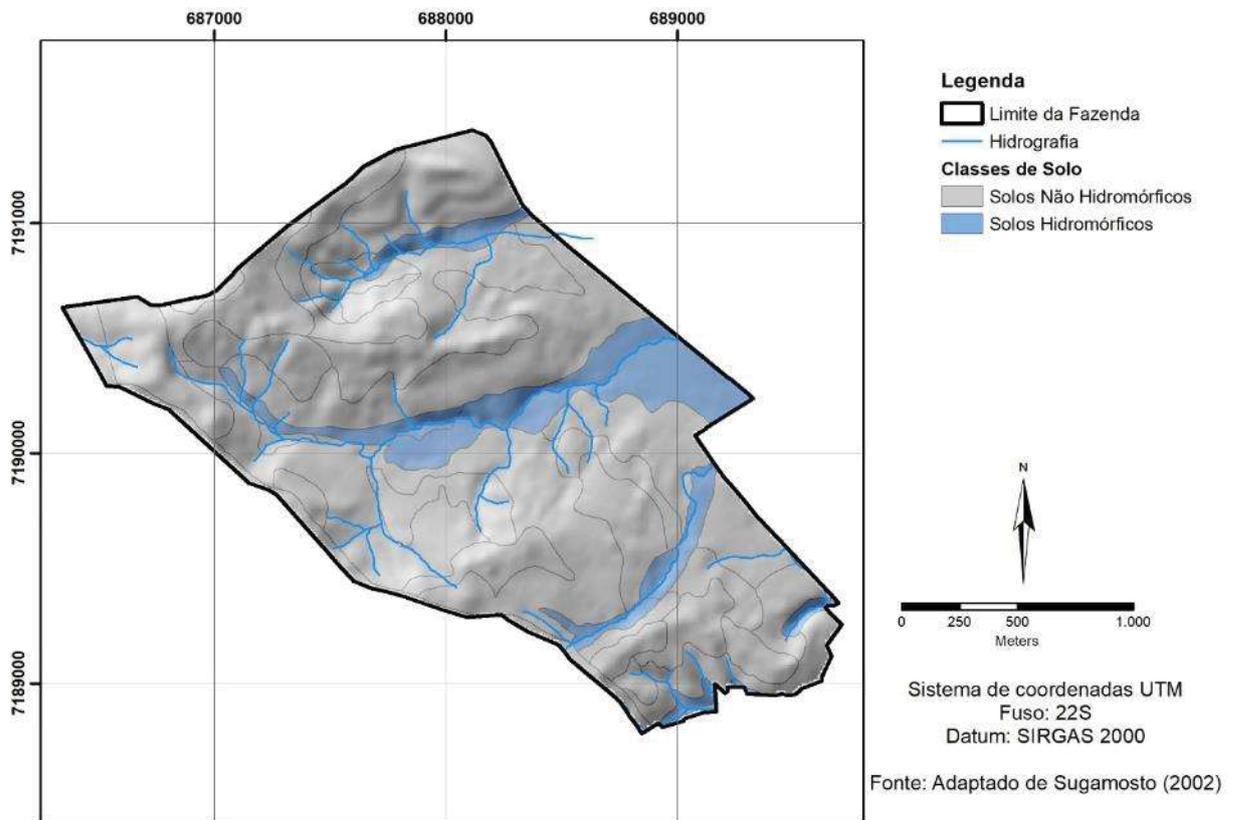


Fonte: Adaptado de Sugamosto (2002)

Cabe destacar que Organossolos são solos constituídos principalmente por material orgânico, saturados por água na maior parte do ano a menos que artificialmente drenados. A classe dos Gleissolos é caracterizada por solos com redução do ferro, total ou parcialmente, devido à água estagnada ou variações do nível freático permanecendo saturado por água por longos períodos (EMBRAPA, 2018). Ambos os solos estão associados aos ambientes húmidos predominantemente planos, depressões e planícies de inundação. Em virtude deste conjunto de características similares a associação de Organossolos + Gleissolos foi interpretada como solos hidromórficos nesta pesquisa, sua distribuição é apresentada na Figura 9

Os solos hidromórficos são solos com gênese relacionada à saturação hídrica plena durante períodos significativos no ano, com subsequente morfologia expressa por processos de redução (gleização e/ou mosqueados) dentro de 50 cm de profundidade. Os semi-hidromórficos são solos cuja formação está relacionada à presença do caráter gleico, eventualmente podendo ser identificado o regime hídrico de saturação plena do solo, porém em curtos períodos do ano (CURCIO, 2006).

Figura 9: Localização dos solos Hidromórficos



Fonte: Adaptado de Sugamoto (2002)

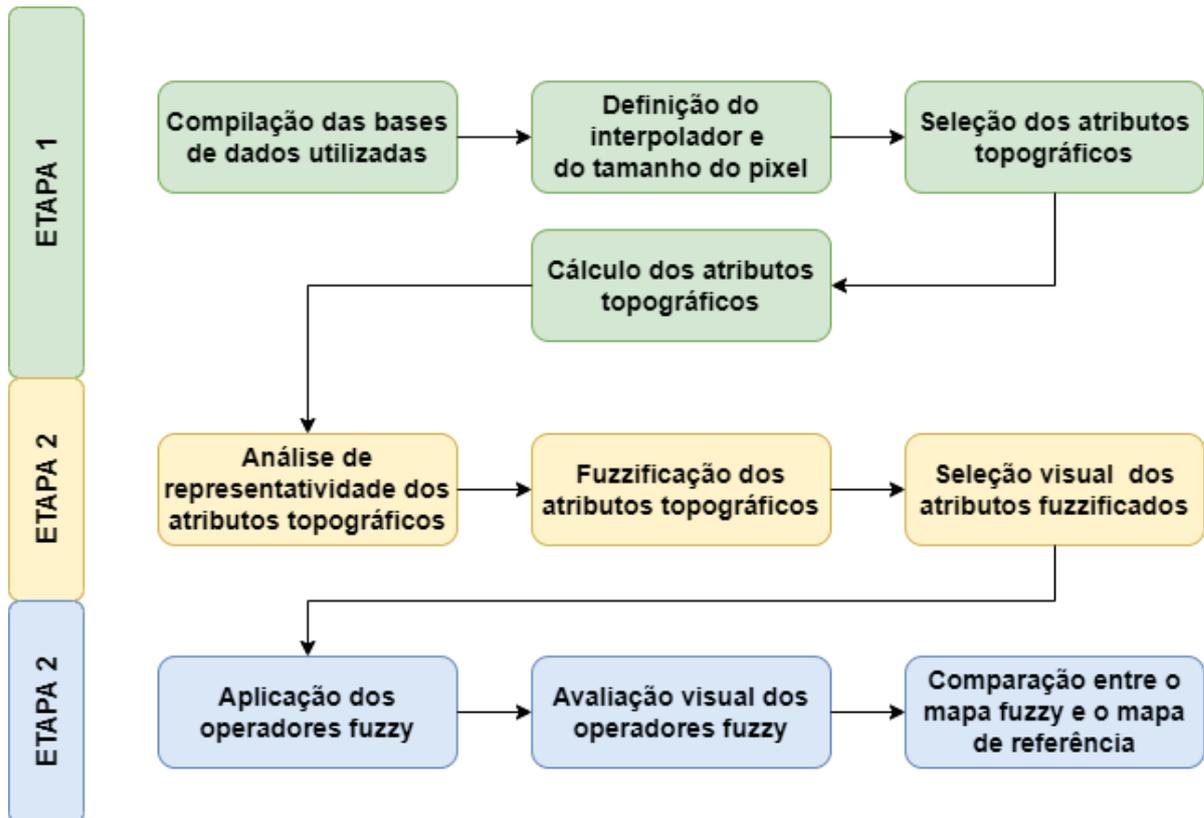
3.1.2.2 Dados cartográficos utilizados

A base cartográfica utilizada disponível para a área de estudo corresponde às curvas de nível com equidistância de 1 m, pontos cotados, hidrografia e limite da propriedade na escala 1:1.000. Esta base cartográfica foi construída através de uma restituição estereofotogramétrica na escala 1:1.000. Os dados foram gerados no programa Autodesk no formato DFX 2000 e posteriormente editados e consistidos topologicamente para que pudessem ser utilizados em Sistemas de Informação Geográficas sendo apresentados em formato ESRI Shapefile (DELAZARI; ERCOLIN FILHO, 2019).

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa foram divididos em 4 etapas principais como o apresentado na Figura 10.

Figura 10: Fluxograma simplificado das atividades desenvolvidas



Fonte: O Autor (2022)

Na sequência são apresentados em maior detalhe os procedimentos metodológicos adotados em cada uma das etapas para elaboração desta proposta.

3.2.1 Interpolador empregado

O método de interpolação empregado para a geração do Modelo Digital do Terreno (MDT) neste estudo foi o Topogrid. Este modelo é baseado no modelo de Hutchinson (1988,1989) para o programa ANUDEM (Australian University Digital Elevation Model). Este método tem como ponto principal a interpolação de dados vetoriais (dados de elevação irregularmente espaçados, curvas de nível e linhas de drenagem) o que permite a criação de um modelo do terreno hidrologicamente

consistido, uma vez que as informações do sentido de drenagem são consideradas ao calcular a elevação na região aumentando assim a precisão dos modelos gerados (FERNANDES; MENEZES, 2005).

É importante destacar que os modelos digitais do terreno são uma representação matemática do relevo e apesar da sua similaridade à realidade do local de estudo apresentam, inevitavelmente, erros. Cabe destacar que tais problemas podem inserir maior interferência aos atributos do terreno derivados do modelo digital tendendo a se propagar quanto maior a complexidade do atributo calculado e apresentando erros mais severos, usualmente, em atributos secundários (BOLSTAD; STOWE, 1994; CHAGAS *et al.*, 2005; SILVEIRA; SILVEIRA, 2015).

Segundo ESRI ArcGIS® (2016) o método foi desenvolvido visando aproveitar os dados de entrada mais comuns nas bases de dados (dados topográficos e drenagens) tirando proveito das características conhecidas das superfícies. O Topogrid mescla e otimiza métodos locais como a eficiência do Inverso da potência das distâncias (IDW) sem perder o entendimento das superfícies como em métodos globais como Kriging ou Spline.

Desta forma, este método analisa as áreas mais elevadas e mais profundas do terreno e produz uma rede de drenagem conectada capaz de representar as nuances do terreno com maior detalhe. Esta condição de detalhamento da rede de drenagem é capaz de reproduzir as formas do terreno com maior precisão sem a necessidade de pós processamento para a remoção dos pixels espúrios necessitando menor quantidade de dados de entrada (ESRI ArcGIS, 2016).

Ao calcular o MDT o software apresenta ao usuário uma sugestão de resolução do MDT e ainda possibilita ao usuário escolha a resolução do pixel utilizado no grid. Para esta determinação os critérios apresentados por Hengl (2003) foram seguidos como o demonstrado a seguir.

3.2.2 Cálculo da resolução do pixel

Hengl (2006) demonstra que a seleção da área ideal para o pixel utilizado na elaboração de trabalhos ambientais deve levar em conta fatores cartográficos ao considerar a escala das bases de dados e as características morfológicas do terreno da área de estudo bem como ainda leva em conta a capacidade de processamento destas informações.

Desta forma, resolução máxima do tamanho do pixel (grid) para a geração do modelo digital do terreno segue o descrito por Hengl (2006) conforme o descrito na equação (7). Onde obteve-se o valor máximo de pixel de 5,97 m.

$$p \leq \frac{A}{2\sum l} \quad (7)$$

Onde:

p= corresponde ao tamanho do pixel;

A = representa a área total;

$\sum l$ = o comprimento total das curvas de nível na área de estudo

O autor ainda sugere que para a determinação resolução mínima para a construção do modelo digital de terreno este cálculo seja realizado dentro de uma área que represente aproximadamente 5% da área total conforme apresentado na equação (8, sendo esta área selecionada levando em conta a maior concentração de curvas de nível possível. Obteve-se o valor mínimo de pixel de 4,36m.

$$p \leq \frac{A(5\%)}{2\sum l(5\%)} \quad (8)$$

Onde:

p= corresponde ao tamanho do pixel;

A (5%) = representa um recorte da área total;

$\sum l$ (5%) = o comprimento total das curvas de nível na área de estudo

Diante dos resultados apresentados optou-se por utilizar como resolução padrão do pixel o valor de 10 m. Tão decisão tem como ponto principal o favorecer o processamento dos dados na área de estudo.

3.3 SELEÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

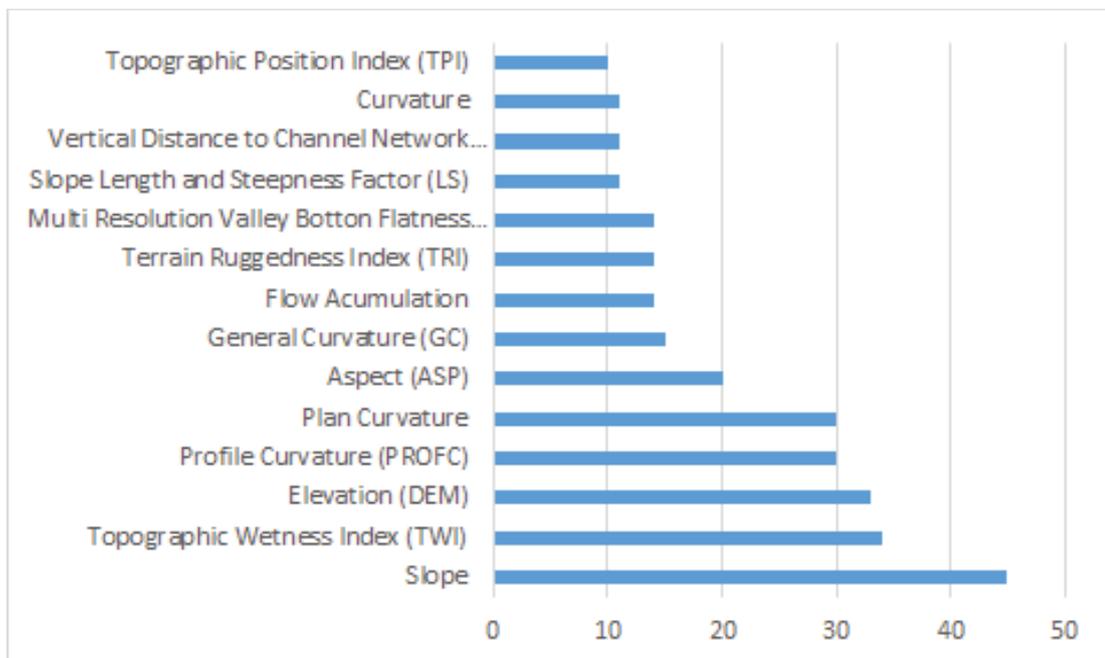
Para a seleção dos atributos topográficos utilizados nesta proposta realizou-se uma revisão nos trabalhos relacionados à pedometria e à geomorfometria contemplando período entre 2014 e 2020 publicados, predominantemente, em periódicos de fator de impacto igual ou superior a 4. Nesta pesquisa foram incluídos

também alguns trabalhos realizados no Departamento de Geografia da UFPR e outros considerados de grande expressão para o tema como o desenvolvido por Hengl (2003) a listagem dos artigos consultados pode ser encontrada no APÊNDICE 1 – Lista dos Artigos cosultados para seleção dos atributos topográficos.

Diante desta seleção de trabalhos foi possível compilar um total de 96 variáveis utilizadas como apoio para a execução de mapeamentos digitais de solos derivadas de um modelo digital do terreno. Deste montante foram selecionadas as 28 variáveis mais prevalentes que correspondiam a 80% dos atributos topográficos presentes nos trabalhos consultados. A distribuição das variáveis pode ser observada na Figura 11 que representa os atributos recorrentes em 50% dos trabalhos e a Figura 12 apresenta os 25% restantes. Cabe destacar que os atributos Elevação, Aspecto, Geologia e Sombreamento não foram considerados para a elaboração da proposta.

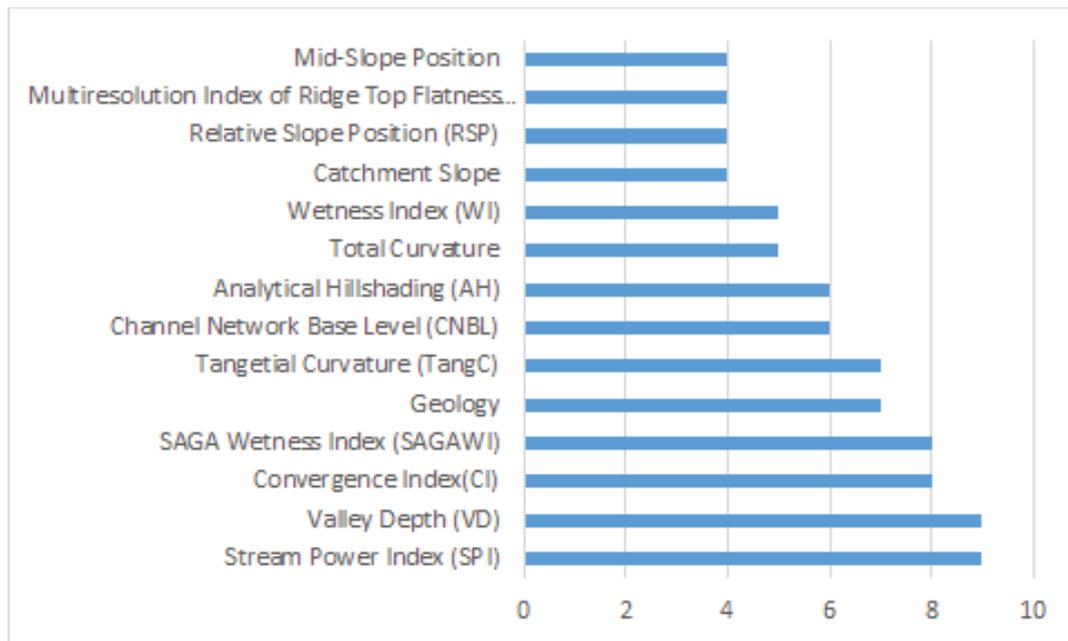
De posse da listagem e em conjunto com o modelo digital de elevação selecionado previamente, os atributos foram calculados com auxílio do software SAGA GIS (Conrad *et al.*, 2015) e seguindo os critérios estabelecidos por apresentados por Moore *et al.* (1991), Moore *et al.* (1993) e Gallant e Wilson (2000).

Figura 11: Atributos topográficos mais recorrentes em trabalhos 0 a 50



Fonte: O Autor (2022)

Figura 12: Atributos topográficos mais recorrentes em trabalhos 50 a 75



Fonte: O Autor (2022)

Cabe destacar que os atributos listados foram calculados parcialmente, e para esta proposta foram desconsiderados Elevação (Elevation), Geologia (Geology) e Sombreamento (Analytical hillshading). Cabe salientar que não foi possível estabelecer uma relação entre os atributos listados índice de umidade (Wetness Index), posição relativa da declividade (Relative Slope Position) e os passíveis de cálculo. O atributo Curvatura (Curvature) foi definido como sendo o atributo Curvatura Geral (General Curvature) sendo este passível de cálculo no SAGA Gis.

3.4 ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Os atributos topográficos podem ser entendidos como uma forma matemática de representar de maneira quantitativa as formas do relevo de modo. Estes atributos são divididos em dois grupos utilizados neste trabalho: atributos topográficos primários e atributos topográficos secundários.

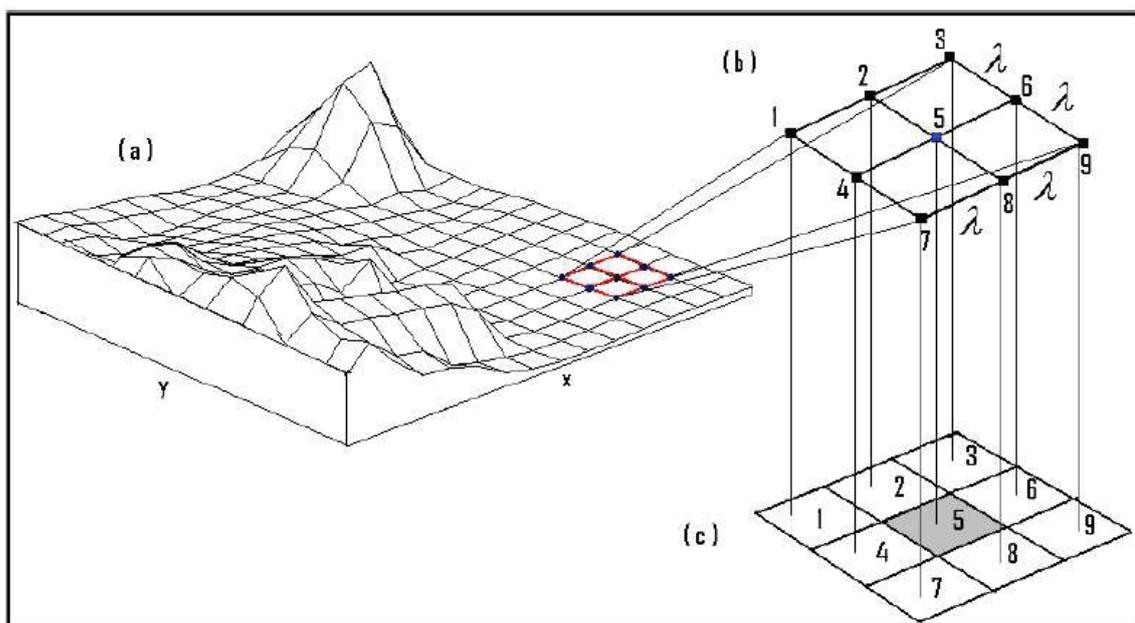
Os atributos primários podem ser obtidos diretamente de um Modelo Digital do Terreno – MDT, como primeira derivada, (WILSON; GALLANT, 2000; SIRTOLI, 2008; CÁTEN *et al.*, 2009; SILVEIRA, 2010; SILVA, 2016). Estes atributos podem ser parametrizados a partir de variáveis como (em inglês): Aspect, Elevation, Catchment Slope, Channel Network Base Level, Convergence, Plan Curvature, Profile Curvature,

General Curvature, Tangential Curvature, Total Curvature, Flow Accumulation, Mid-Slope Position, Multi-resolution Ridge Top Flatness, Multi-resolution Valley Bottom Flatness, Valley Depth e Vertical Distance to Channel Network, Slope.

Os atributos secundários são o resultado das combinações dos atributos primários, e podem ser utilizados para caracterizar processos específicos que ocorram em determinada paisagem, se relacionando a processos de transporte de sedimentos e a movimentos de água no solo (MOORE *et al.*, 1991; MOORE *et al.*, 1993; WILSON e GALLANT, 2000; McBRATNEY *et al.*, 2003; SILVEIRA, 2010). Estes atributos podem ser parametrizados a partir das variáveis como: Flow Path Length, Ls Factor, Mass Balance Index, Stream Power Index, Topographic Wetness index e SAGA – Topographic Wetness Index, Topographic Position Index, The topographic ruggedness index.

Os atributos topográficos utilizados nesse trabalho, foram obtidos a partir do modelo digital do terreno e seguem os parâmetros apresentados por Moore *et al.* (1993), Gallant e Wilson (2000), McBratney *et al.* (2003). O método padrão de cálculo dos indicadores, que visa uma maior velocidade, associa o cálculo do pixel central e seus 8 vizinhos em uma janela móvel de 3x3 pixels (Figura 13) de acordo com o proposto por Zevenbergen e Thorne (1987).

Figura 13: Grade regular da superfície do solo (a), Pixel central do grid (b), janela de vizinhança (c).



Fonte: Adaptado de Silveira (2010)

3.4.1 Atributos topográficos primários

A hipsometria (Elevation) pode ser descrita como o MDT propriamente dito (SILVEIRA, 2010). Segundo Sirtoli (2008), a elevação apresenta a distribuição das classes de altitudes, ou dos patamares hipsométricos, em intervalos verticais equidistantes e permite que se analise a variação altimétrica do relevo a partir do agrupamento das informações planimétricas presentes. A hipsometria ainda apresenta grande importância para o mapeamento de solos, pois, ao descrever as formas do relevo descreve também e caracteriza unidades de paisagem e por consequência os solos que nelas ocorrem.

A declividade (Slope), também denominada de clinografia, corresponde à inclinação do terreno em relação ao plano horizontal, desta forma a declividade define os locais suscetíveis a processos erosivos intensificados, ou locais onde há uma maior probabilidade de processos pedogenéticos ocorrerem. Para Gallant e Wilson (2000), Sirtoli (2008) e Silveira (2010) a declividade é considerada um atributo topográfico dos mais importantes. A declividade é um dos atributos topográficos controladores dos processos pedogenéticos afetando diretamente a velocidade de escoamento superficial e subsuperficial de água e conseqüentemente, o teor de água no solo, o potencial de erosão/deposição dentre outros processos importantes na formação dos solos.

Com relação às formas de vertentes o Perfil de Curvatura representa a taxa de variação da declividade na direção da orientação da vertente, e pode ser classificada como convexo, côncavo ou retilíneo. Esse atributo é importante para caracterizar mudanças na velocidade do fluxo de água e processos relacionados ao transporte de sedimentos (GALLANT e WILSON, 2000; SIRTOLI, 2008, SILVEIRA, 2010).

O plano de curvatura se refere ao caráter divergente ou convergente dos fluxos de matéria e energia nas vertentes, em projeção horizontal (SIRTOLI, 2008). Este atributo permite observar a mudança do fluxo da água a à medida que circula pelo terreno (SILVEIRA, 2010). O plano de curvatura se refere ao caráter divergente ou convergente dos fluxos de matéria e energia nas vertentes, em projeção horizontal (SIRTOLI, 2008). Este a tributo permite observar a mudança do fluxo da água a à medida que circula pelo terreno (SILVEIRA,2010).

O Índice de convergência (Convergence) apresenta uma relação entre as zonas de convergência e divergência do escoamento superficial considerando o Aspecto (Aspect) das células vizinhas apresentando um resultado muito similar com o a Curvatura horizontal, mas é mais suave ao representar as formas do relevo.

O atributo da Declividade Média da Área à Montante (Catchment Slope) apresenta a declividade média da área de contribuição em graus indicando a declividade média de todas as células a montante da célula em questão. Este atributo é relacionado diretamente com o tempo concentração hídrica, ou seja, apresenta o tempo médio para que o escoamento a montante atinja a célula em questão (OLAYA, 2004; 2009)

O índice de Acumulação de Fluxo (Flow accumulation) apresenta a área a montante de uma célula específica e seu escoamento. Este atributo topográfico é diretamente associado ao volume do escoamento superficial até determinada célula onde uma célula pode receber fluxo de uma ou mais células a montante conforme o apresentado por Freeman (1991) e Quinn et al. (1991).

O Índice do Meio da Encosta (Mid-slope position) apresenta as células em relação ao meio da vertente. Costumeiramente é utilizado com o indicador climático descrevendo as condições climáticas locais sob efeito da topografia onde é possível observar o gradiente de temperatura entre as áreas mais altas e mais baixas indicando a disponibilidade energética local.

O Índice Multiresolucional da Planicidade do Fundo do Vale (Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness– MRVBF) definido por Gallant e Dowling (2003) auxilia na identificação das formas do relevo possibilitando a discriminação entre as porções mais elevadas, cumes e cristas, das porções mais baixas, fundos de vales e áreas convergentes. Este índice considera as áreas mais baixas ao considerar as áreas planas e profundas em comparação com as cercanias, pode ser utilizado diferenciar as áreas de topos e de fundos de vales ao considerar que os processos hidrológicos em ambas as áreas são bastante distintos. Como complemento a este indicador temos o Índice Multiresolucional da Planicidade dos Cumes (Multiresolution Ridge Top Flatness Index – MRRTF) cujo cálculo apresenta as áreas planas nos cumes e áreas alongadas como cristas (GALLANT; DOWLING, 2003).

A Distância Vertical até a Rede de Drenagem (Vertical Distance to Channel Network), apresentado por Bock e Köthe (2008) tem como objetivo calcular aproximadamente a profundidade da rede drenagem na bacia hidrográfica em um

ponto específico. Este índice é bem eficiente ao indicar a profundidade até o nível freático, sendo esta distância absoluta, e indicando textura de solos em algumas regiões auxiliando assim o mapeamento de solos. Juntamente deste índice é possível calcular a profundidade dos vales (Valley Depth) sendo este a representação da diferença entre a hipsometria e a linha de cumeada. Por apresentar a profundidade dos vales este indicador apresenta as diferentes velocidades de drenagem dentro da vertente.

3.4.2 Atributos topográficos secundários

De acordo com Moore *et al.* (1993), os índices topográficos secundários são parâmetros relacionados a água superficial e subsuperficial no solo bem como processos erosivos, são eles: Comprimento do Percurso, Índice da Capacidade de Transporte de Sedimentos, Índice de Balanço de Massa, Índice Topográfico de Umidade, Índice Topográfico de Umidade – Modificado e o fator topográfico da Equação Universal de Perda de Solo (Fator LS).

Segundo Moore *et al.* (1993), Sirtoli (2008) o índice topográfico de umidade pode ser utilizado para avaliar a distribuição espacial de áreas com saturação superficial bem como o conteúdo de água nas paisagens. Sua aplicação pode ser descrita como a separação de solos com caráter hidromórfico das outras taxonomias de solos também presentes em áreas com baixa declividade. O índice topográfico de umidade representa a associação do relevo com a espacialização e extensão das áreas saturadas por água e apresenta sensível correspondência com a declividade.

O Índice Topográfico de Umidade (Topographic Wetness Index) é, segundo Moore (1988), Wilson e Gallant (2000) e Sirtoli (2008), utilizado para caracterizar a distribuição espacial e a extensão das zonas de saturação considerando a área de contribuição e a declividade no processo. Sendo aplicado para indicar áreas possíveis para solos hidromórficos em áreas planas.

O Índice Topográfico de Umidade Modificado (SAGA – Wetness Index, Topographic Wetness Index) descrito por Böhner e Selige (2006), assume um limite máximo para a área de contribuição ao atribuir uma área máxima de contribuição para cada pixel do grid. Desta forma, ao considerar valores máximos de contribuição quaisquer valores fora do limite estabelecido são homogeneizados proporcionando áreas mais regulares sem valores fora do padrão estabelecido (HUNG *et al.*, 2017).

O Índice de Corrente de Máximo Fluxo (Stream Power Index) é descrito por Gallant e Wilson (2000) como a medida do poder erosivo da água corrente. Este índice demonstra a erosão nas áreas convexas, onde ocorre a aceleração do fluxo hídrico, e a deposição em áreas de perfil côncavo, onde ocorre a redução da velocidade de fluxo.

O Comprimento do Percurso Hídrico (Flow Path Length) calcula o comprimento médio do fluxo começando pelos divisores de águas nas áreas à montante. O índice leva em consideração todas as áreas com valores válidos dentro da área de análise ou então calcula a direção de fluxo pelos métodos Determinístico (O'CALLAGHAN e MARK 1984) e Múltiplo Fluxo (FREEMAN 1991, QUINN *et al.* 1991).

O Índice de Equilíbrio de Massa (Mass-Balance Index) apresenta a distribuição das áreas de deposição e de erosão ao longo do relevo levando em consideração que diferentes formas do relevo apresentam diferentes índices de balanço ou equilíbrio de massa. Este índice pode ser utilizado para caracterizar diferentes tipos de solos ou regiões comuns sendo as áreas de depressões, vales côncavos ou com baixas declividades mais suscetíveis a receber material carregado enquanto áreas localizadas em cristas, grande declividade ou relevo convexo representam áreas de disponibilização de material. em ambos os casos os valores apresentados pelo índice serão negativos e positivos respectivamente enquanto valores próximos de zero representarão as áreas de meia encosta onde os processos de deposição e remoção de material acontecem de maneira simultânea.

O atributo topográfico Índice de Posição Topográfica (Topographic Position Index) proposto por Weiss (2001) apresenta a diferença entre o ponto central de uma elevação e seu arredor através de um raio determinado. Neste índice os valores positivos apresentam locais mais elevados que a média do seu entorno e os valores negativos, por sua vez, caracterizam as depressões ou locais rebaixados em relação ao seu entorno. Os valores próximos de 0 apresentam áreas com declive constante destacando áreas planas.

Índice de rugosidade do terreno (The topographic ruggedness index) apresentado por Hobson (1972, *apud* SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014) utiliza a variação da declividade na representação das formas do relevo. Este atributo é a razão entre a área superficial (irregularidades da superfície) e a área plana (superfície reduzida ao

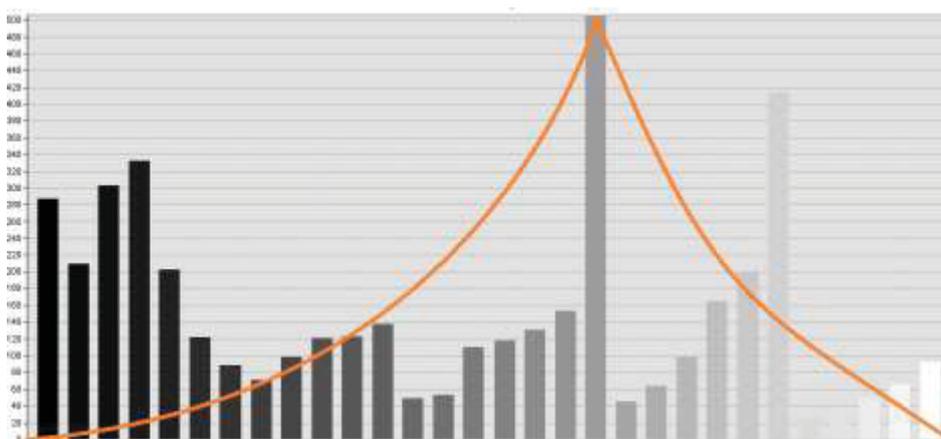
plano). Este atributo permite analisar de maneira pontual a rugosidade do relevo em uma determinada área possuindo relação direta com a declividade

3.5 SOBREPOSIÇÃO DO MAPA DE REFERÊNCIA COM OS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS E APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY

A sobreposição do mapa de referência teve como objetivo a definição dos atributos topográficos com melhor resposta para a ocorrência da classe de solos mapeadas. Para tanto a área de interesse foi sobreposta aos atributos topográficos sendo possível computar os valores máximos, mínimos e médios dos intervalos de interesse nos dados matriciais.

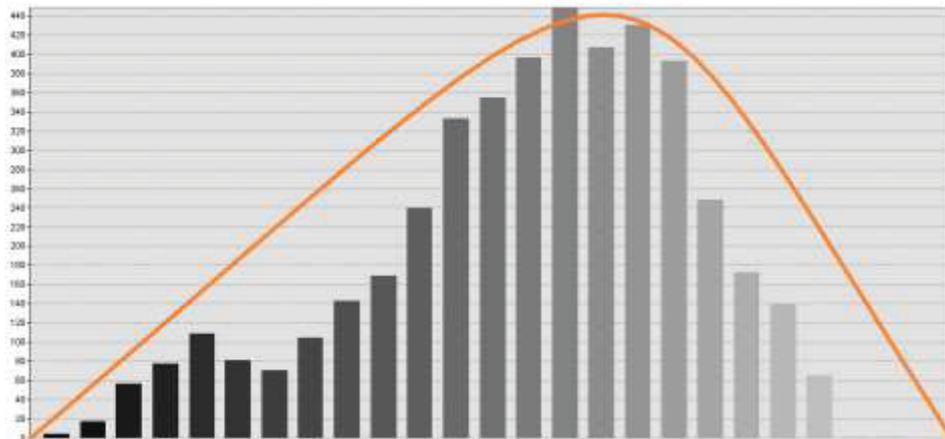
Em seguida, com intuito de identificar quais atributos apresentam melhor resposta e serão utilizados no mapeamento da área de interesse, houve a transformação dos atributos topográficos utilizando a lógica Fuzzy onde os valores mais representativos foram observados e classificados dentro do intervalo de 0 a 1 onde 1 apresenta maior grau de pertinência e 0 menor grau de pertinência. A atribuição dos valores Fuzzy e o método de distribuição dos valores na matriz levou em conta a distribuição no histograma original conforme observado no exemplo das Figura 14 e Figura 15.

Figura 14: Exemplo da composição dos valores fuzzy com a distribuição J



Fonte: O Autor (2022)

Figura 15: Exemplo da composição dos valores fuzzy com a distribuição Sigmoidal



Fonte: O Autor (2022)

Esta identificação também contou com uma análise visual complementar dos atributos topográficos fuzzyficados, comum em mapeamentos digitais de solos, conforme o apresentado por Silveira (2010), Nowatzki (2013) e Silva (2016) onde a ordem pedológica e os atributos topográficos são sobrepostos e a sua relação é observada. Após esta sobreposição os atributos foram separados em três grupos distintos denominados Generalizado, Moderado e Específico que representam maior ou menor afinidade com os solos hidromórficos com base no critério visual.

Cabe destacar que a seleção destas áreas buscou a relação direta entre os atributos topográficos e os solos hidromórficos presentes na área de estudo e que a separação das subordens pedológicas ou o reconhecimento de outros táxons não foi possível visto que a observação de elementos diagnósticos utilizados na classificação dos solos segundo o SiBCS como cor, textura entre outros não são observados nos atributos topográficos. A relação dos histogramas pode ser observada no APÊNDICE 2–Histogramas Dos Atributos Topográficos e a relação dos atributos topográficos fuzzyficados estão apresentados no APÊNDICE 3 – Atributos topográficos fuzzyficados deste trabalho.

3.6 INTEGRAÇÃO DOS ATRIBUTOS E AVALIAÇÃO DOS DADOS

A etapa de integração dos atributos consistiu na transformação dos atributos topográficos primários e secundários de acordo com a lógica fuzzy, sendo este processo responsável por atribuir novos valores de 0 a 1 para as células existentes.

Esta alteração também possibilitou seu processamento de acordo do conjunto de operadores fuzzy gerando um conjunto de 7 matrizes das quais 4 dizem respeito aos operadores, SOMA, PRODUTO, E, OU e 3 dizem respeito ao operador GAMMA 0,25, 0,5 e 0,75.

Após este processamento as matrizes resultantes apresentaram valores dentro do intervalo 0 e 1 sendo necessária sua reclassificação para que a análise por tabulação cruzada fosse efetuada, os intervalos escolhidos para isto foram os quartis sendo o primeiro intervalo 0 a 0,25 o segundo e terceiros intervalos de 0,25 a 0,5 e 0,5 a 0,75 respectivamente e último intervalo de 0,75 a 1. Para Miranda (2010) este tipo de processamento agrupa intervalos no dado matricial original alterando seu valor, mas, não a geometria. Este procedimento pode ser considerado fundamental ao se trabalhar com dados geoespaciais pois facilita a observação de padrões e outras análises.

Após a reclassificação os mapas fuzzy foram combinados com o mapa de referência e analisados por meio da tabulação cruzada. Para Tomlin (1983), esta técnica é empregada na integração de variáveis por superposição de mapas. Para Silveira (2010) a tabulação cruzada representa o conjunto de procedimentos na análise de dados espaciais que apresenta como resultado a produção de novos dados a parti do processamento de um ou mais conjuntos de informação. Ainda segundo Silveira (2010) o método consiste na sobreposição, e posterior cálculos, dos atributos topográficos representados por matrizes em ambiente de SIG. Neto (2004), apresenta a tabulação cruzada como uma tabela onde duas ou mais variáveis são analisadas de forma conjunta. A sequência lógica destas etapas pode ser vista na

Figura 16: Etapas do processamento fuzzy e tabulação cruzada



Fonte: O Autor (2022)

3.7 COMPARAÇÃO DAS UNIDADES DE SOLOS MAPEADAS PELA LÓGICA FUZZY COM O MAPA DE SOLOS DA ÁREA DE REFERÊNCIA

A comparação utilizada nesta proposta utilizou o método descrito por Centeno (2003), Silveira (2010), Silveira *et al.* (2012) sendo ele a Exatidão Global. A exatidão global é descrita como o produto entre as células corretamente classificadas (nc) e o número total de células da matriz (nt) conforme o apresentado na equação

$$Eg = \frac{nc}{nt} \quad (9)$$

Onde:

Eg = corresponde ao erro geral

nc = corresponde ao número de células corretamente classificadas

nt = corresponde ao número total de células da matriz

Segundo Centeno (2003) as matrizes de confusão são meios pelos quais é possível representar discrepâncias entre os conjuntos de informações tidas como reais, sendo a verdade de campo ou bases cartográficas existentes, e as informações oriundas de um processo de classificação ou base a ser comparada. Nestas matrizes é possível verificar a informação correta distribuída em linhas e a informação estimada nas colunas os valores classificados corretamente serão apresentados somente nas diagonais (NEUMAN *et al.*, 2018).

A matriz de confusão ou matriz de erros, exemplificada no Quadro 1, permitiu calcular o grau de concordância ou discordância para os elementos apresentados no mapeamento de referência e a base produzida nesta proposta.

Quadro 1: Exemplo de matriz de confusão

Grupos		Mapeamento Digital			
		2	3	4	Soma
Mapa de Referência	1	Erro	Erro	Erro	Total
	2	Acerto	Erro	Erro	Total
	3	Erro	Acerto	Erro	Total
	Soma	Total	Total	Total	Total Área

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2009)

4 Resultados

A apresentação dos resultados e discussões correspondente aos produtos obtidos durante a elaboração desta proposta está dividida nos tópicos descritos a seguir: Análise e seleção dos atributos topográficos fuzificados, Análise e seleção dos operadores fuzzy e a comparação entre o mapa preliminar de solos obtido pelo método fuzzy com o mapa elaborado por Sugamoto (2002)

4.1 ANÁLISE E SELEÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS FUZIFICADOS

Os 28 atributos topográficos primários e secundários calculados a partir do modelo digital do terreno possibilitaram o entendimento direto da conformação do relevo local e sua relação com os solos da área de estudo. Cabe destacar que 6 atributos não foram considerados nesta observação, restando 22 utilizados para esta análise. A avaliação qualitativa das matrizes obtidas através da aplicação da lógica fuzzy se pautou principalmente na comparação visual com a base cartográfica de referência.

Com base nesta seleção foi possível agrupar os atributos topográficos em 3 grupos distintos, denominados: Generalizado, Moderado e Específico conforme o apresentado no tem 3.5. Estes grupos são detalhados nos Quadro 2, Quadro 3 e Quadro 4, respectivamente.

Quadro 2: Detalhamento dos atributos generalizados

Índice de Convergência	Curvatura Geral
Índice de Corrente de Máximo Fluxo	Curvatura Planar
Acumulação de Fluxo	Curvatura Total
Índice Topográfico de Umidade	Curvatura Perfil
Índice de Equilíbrio de Massa	Curvatura Tangencial

Fonte: O Autor (2022)

Quadro 3: Detalhamento dos atributos moderados

Declividade média da área à montante	Fator LS
Índice do Meio da Encosta	Índice Multiresolucional da Planicidade dos Cumes
Índice Topográfico de Posição	Índice topográfico de Rugosidade
Declividade	

Fonte: O Autor (2022)

Quadro 4: Detalhamento dos atributos específicos

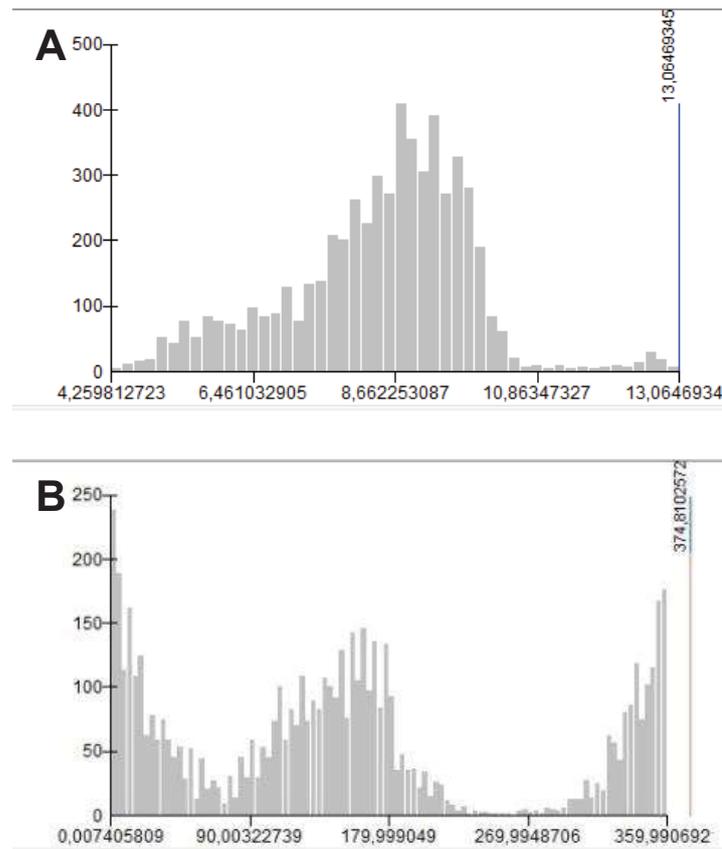
Nível Basal da Rede de Drenagem	Índice Multiresolucional da Planicidade do Fundo do Vale
Índice topográfico de umidade composto	Profundidade do Vale
Distância Vertical até a Rede de Drenagem	

Fonte: O Autor (2022)

A seleção dos intervalos para a transformação fuzzy levou em consideração a distribuição dos valores dentro do histograma para a área de interesse conforme o ilustrado na Figura 17 onde é possível observar nos histogramas os valores dos atributos Índice Topográfico de Umidade – Modificado e Aspecto (A e B respectivamente). Considerando a distribuição dos valores no histograma do atributo Aspecto, não fica evidente nenhum agrupamento de valores que representem a associação direta deste atributo com a identificação dos solos hidromórficos distribuídos em vertentes com variadas orientações.

De acordo com Sirtoli (2008) e Silveira (2010) os solos de caráter hidromórfico estão localizados nas porções mais baixas da área de estudo predominantemente abaixo dos 913 m e com o relevo variado de plano a suave ondulado, e com 97% de sua ocorrência em declive inferior a 8%. Este conjunto de condições apresentado em outros estudos possibilitou associar a geomorfologia local a distribuição dos solos hidromórficos possibilitando a melhor relação entre os atributos topográficos e a formação local de solos.

Figura 17: Exemplos de histograma: a) Índice Topográfico de Umidade – Modificado e b) Aspecto



Fonte: O Autor (2022)

Os atributos topográficos selecionados como pertencentes ao grupo denominado Moderado, apresentados no Quadro 3, são aqueles que durante o processo visual de qualificação do histograma apresentaram grau moderado generalização da informação não sendo possível através da observação determinar a relação direta entre os atributos topográficos e os polígonos de mapeamento.

O conjunto de atributos topográficos presentes no grupo generalizado (Quadro 2) apresentam forte grau de generalização da informação tornando a identificação de setores de interesse impossível, visto que alguns atributos quando transformados pela lógica fuzzy apresentam a totalidade da sua área enquadrada no mesmo grau de pertinência. Cabe destacar que os atributos topográficos relacionados à curvatura do terreno também estão inseridos neste grupo apesar da sua forte relação com o fluxo hídrico. Este conjunto de atributos relacionado ao formato das vertentes apresenta forte relação com a posição no terreno e tornando-se de difícil transformação fuzzy de acordo com os critérios adotados nesta proposta. A Figura 18 apresenta o exemplo dos atributos topográficos integrantes deste grupo.

Desta forma, os atributos topográficos selecionados nesta proposta como pertencentes ao grupamento denominado: Específico, indicados no Quadro 4, apresentam forte relação com a distribuição dos solos com característica hidromórfica possibilitando a identificação das zonas de saturação de água, a profundidade do nível freático e o formato do vale. Este conjunto de características facilmente observáveis possibilita a separação destes solos dos demais compartimentos da paisagem com maior facilidade (MOORE et al., 1993; WILSON e GALLANT, 2000; BÖHNER; SELIGE, 2006).

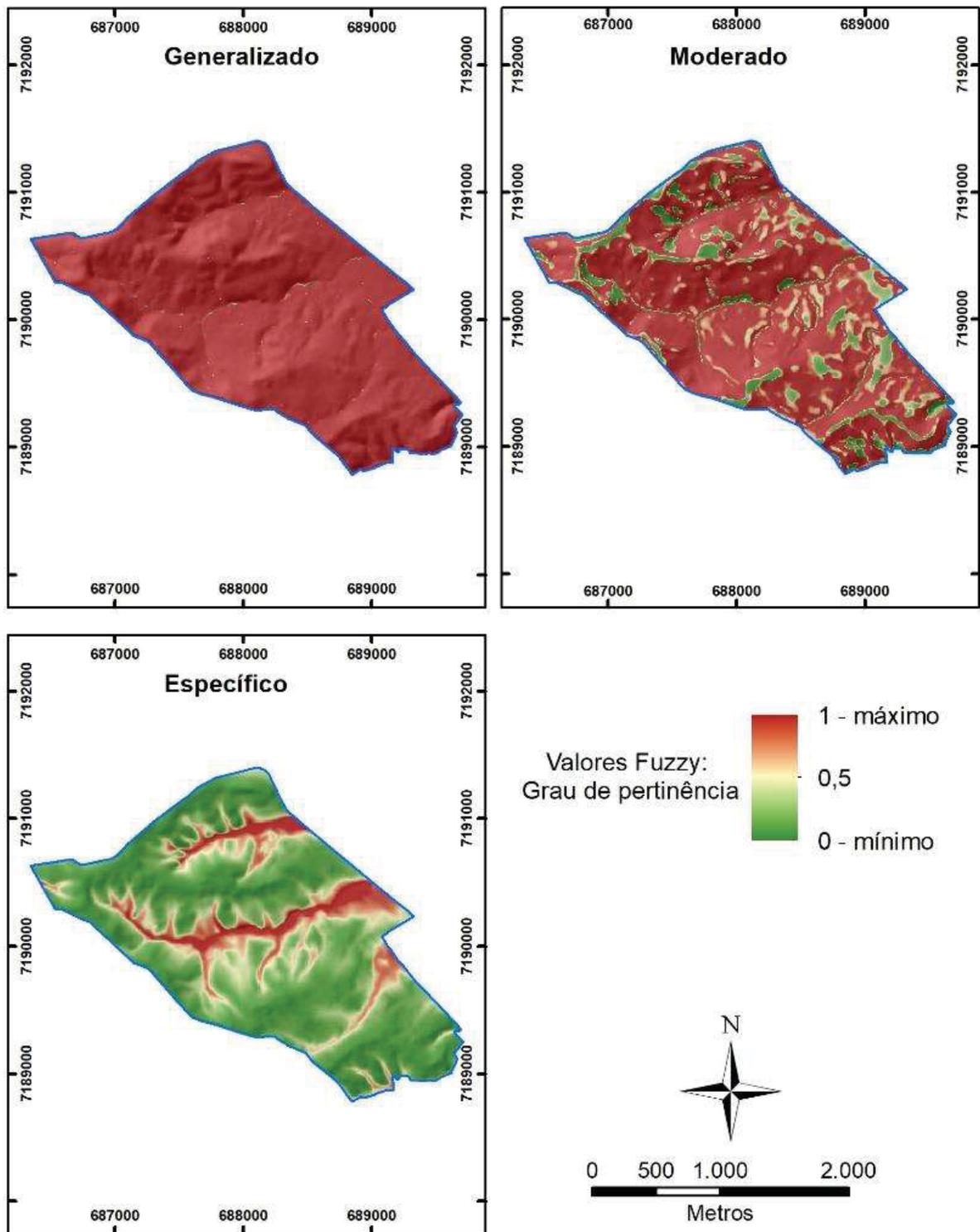
A partir desta observação fica evidente a forte relação entre os solos hidromórficos presentes na área de estudo e o relevo, visto que estes solos ocupam áreas mais aplainadas nas planícies aluviais onde observam-se vales profundos com baixas declividades que possibilitam a acumulação de umidade conforme observam Lima (2005), Sirtoli (2008) e Silveira (2010).

Os resultados obtidos, neste estudo, para o Índice Topográfico de Umidade se assemelham aos resultados apresentados por Moore *et al.* (1993), Sirtoli (2008) e Silveira (2010), ou seja, apresentam maiores valores para as áreas próximas ao fundo dos vales com associação do revelo de baixa declividade e vertentes côncavas onde é possível observar a presença de solos hidromórficos.

O Índice Multiresolucional da Planicidade do Fundo do Vale empregado por Gallant e Dowling (2003) obteve resultados semelhantes aos apresentados por este índice na execução desta proposta. Para estes autores as zonas de deposição associadas aos fundos de vales puderam ser facilmente identificadas visualmente facilitando sua delimitação.

Em associação a isto os índices de distância vertical até a rede de drenagem e o nível basal da rede de drenagem, em conjunto, possibilitaram destacar áreas onde o nível freático está mais próximo da superfície que em associação com outros indicadores topográficos possibilitou a delimitação das áreas de estagnação de água. Nesta proposta observou-se estas zonas de saturação em porções menos declivosas da área de estudo localizadas principalmente nos fundos de vales.

Figura 18: Exemplos do grau de generalização



Fonte: O Autor (2022)

4.2 ANÁLISE E SELEÇÃO DOS OPERADORES FUZZY

Para as múltiplas combinações de atributos topográficos testados em conjunto com os operadores fuzzy, a combinação do grupo apresentado no Quadro 4 apresentou melhor resposta na representação e identificação das áreas potenciais para a ocorrência de solos de carácter hidromórficos considerando os melhores resultados diante da inspeção visual e posterior tabulação cruzada. Cabe salientar que os conjuntos de atributos apresentados nos Quadro 2 e Quadro 3 também foram testados, mas, não foram apresentados devido ao resultado pouco expressivo na identificação de áreas de interesse ou por apresentarem grande índice de generalização nos valores apresentados.

Os piores resultados para os operadores fuzzy testados foram os operadores SOMA e OU com a maior intensidade na generalização da informação apresentando valores de célula médios de 0,99; 0,93 respectivamente. Em virtude dos altos valores médios e da grande área generalizada apresentada como resultado por estes operadores não fica evidente sua aplicação para a separação das áreas de planície da área de estudo. A distribuição dos valores máximo, médio e mínimo pode ser observado no Quadro 5 e a sua representação pode ser observada na Figura 19.

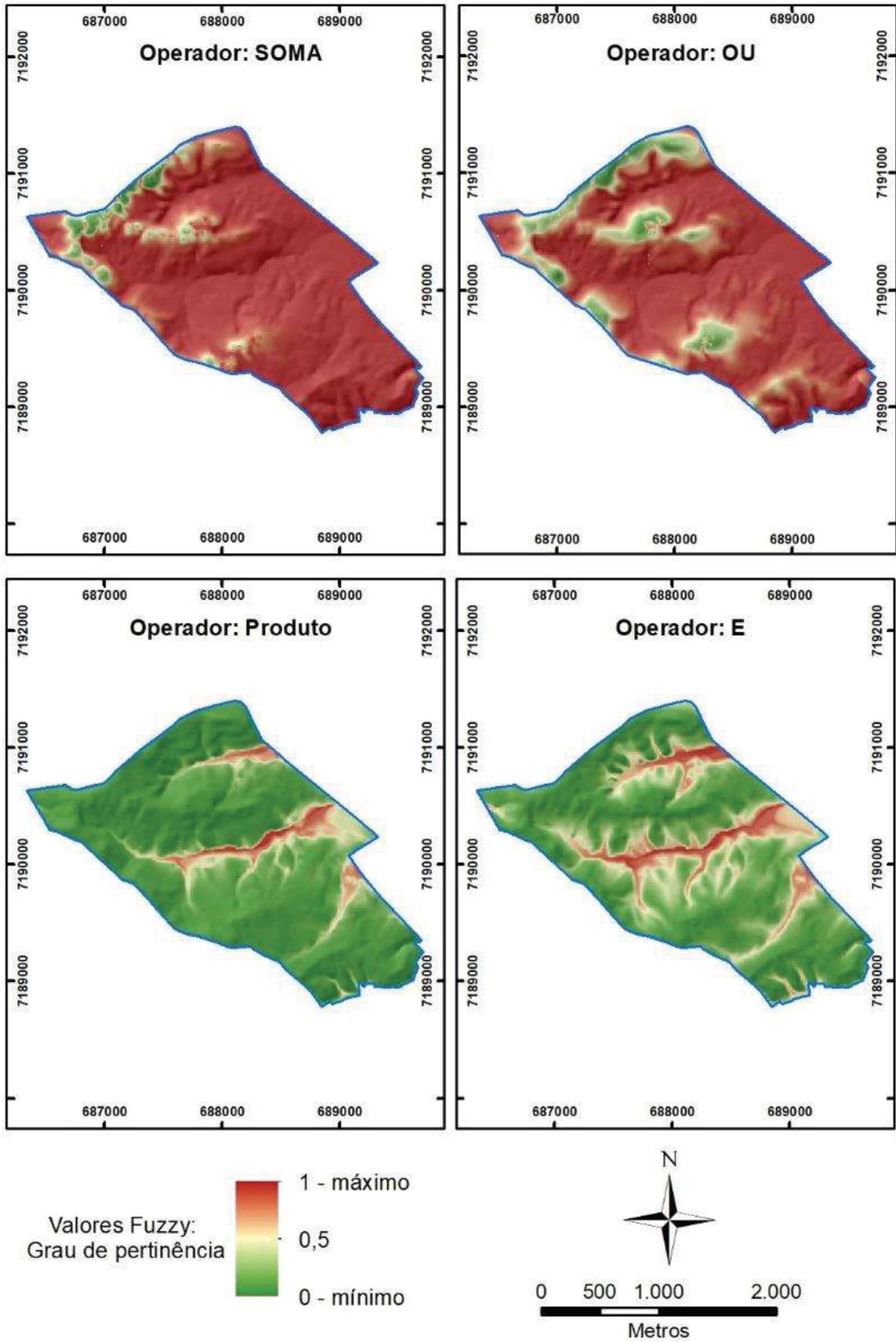
Os operadores E e PRODUTO apresentaram valores médios relativamente baixos se comparados aos dois anteriores apresentando maior índice de prioridade nas áreas de maior potencial deposição de material. Cabe destacar que apesar da distribuição dos valores, ao classificar a área em quartis a distribuição dos valores apresenta um recorte significativo para a classificação dos solos hidromórficos como o apresentado na Figura 21. Os valores máximo, médio e mínimo destes operadores podem ser observados no Quadro 6 e a sua representação pode ser observada na Figura 20.

Quadro 5: Valores do histograma para os operadores OU e SOMA

Operador	Max	Min	Med
OU	1	0,54	0,93
SOMA	1	0,86	0,99

Fonte: O Autor (2022)

Figura 19: Exemplos dos Operadores Fuzzy



Fonte: O Autor (2022)

Dos testes efetuados os melhores resultados para a identificação das áreas com mapeadas como solos hidromórficos por Sugamoto (2002) foram os apresentados pelos operadores PRODUTO, E, GAMMA 0,25, GAMMA 0,5 e GAMMA 0,75 onde é possível observar a concentração das áreas de alta pertinência nas porções mais planas na área de estudo. Os valores apresentados por estes operadores seguem o demonstrado no Quadro 6.

Quadro 6: Valores do histograma para os operadores fuzzy

Operador	Max	Min	Med
GAMMA 0,25	0,99	0	0,15
GAMMA 0,5	0,99	0	0,24
GAMMA 0,75	0,99	0	0,42
PRODUTO	0,99	0	0,1
E	0,99	0	0,23

Fonte: O Autor (2022)

Em análise da taxa de pixels corretamente classificados constatou-se que os melhores resultados foram obtidos com os operadores GAMMA 0,75, 0,5 e 0,25 dos quais o operador GAMMA 0,25 apresentou os melhores resultados. A taxa de acerto na classificação dos pixels variou de 60,4% a 71,12% respectivamente ao considerar o quartil 4 e para o quartil 3 estes valores são de 18,54% a 58,85% respectivamente. Os valores detalhados para esta análise são apresentados pela Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3. A sua representação pode ser observada na Figura 20.

Ainda que os operadores PRODUTO e E apresentem valores muito próximos dos operadores GAMA e demonstrem grande semelhança com o operador GAMMA 0,25 com alto grau de prioridade nas áreas de planície, tanto em análise visual como em análise dos valores classificados estes operadores apresentam, para os fins desta proposta, desempenho inferior ao apresentado pelo operador GAMMA 0,25. Esta diferença é mais perceptível quando observado em detalhe os intervalos com maior grau de pertinência especialmente os quartis 3 e 4 (intervalos 0,5-0,75 e 0,75-1,0 respectivamente) conforme o apresentado na Figura 21.

Tabela 1: Cálculo de pixels corretamente classificados com o operador GAMMA 0,25

Gamma 0,25	Geral	Acerto	Total	%	% acerto
Q1	31833	1245	33078	78,40	3,76
Q2	3154	1651	4805	11,39	34,36
Q3	1227	1755	2982	7,07	58,85
Q4	383	943	1326	3,14	71,12
Total	36597	5594	42191	100	
%	86,74	13,26	100		

Fonte: O Autor (2022)

Tabela 2: Cálculo de pixels corretamente classificados com o operador GAMMA 0,5

Gamma 0.5	Geral	Acerto	Total	%	% acerto
Q1	26724	508	27232	64,54	1,87
Q2	6935	1345	8280	19,63	16,24
Q3	2069	2247	4316	10,23	52,06
Q4	869	1494	2363	5,60	63,22
Total	36597	5594	42191	100	
%	86,74	13,26	100		

Fonte: O Autor (2022)

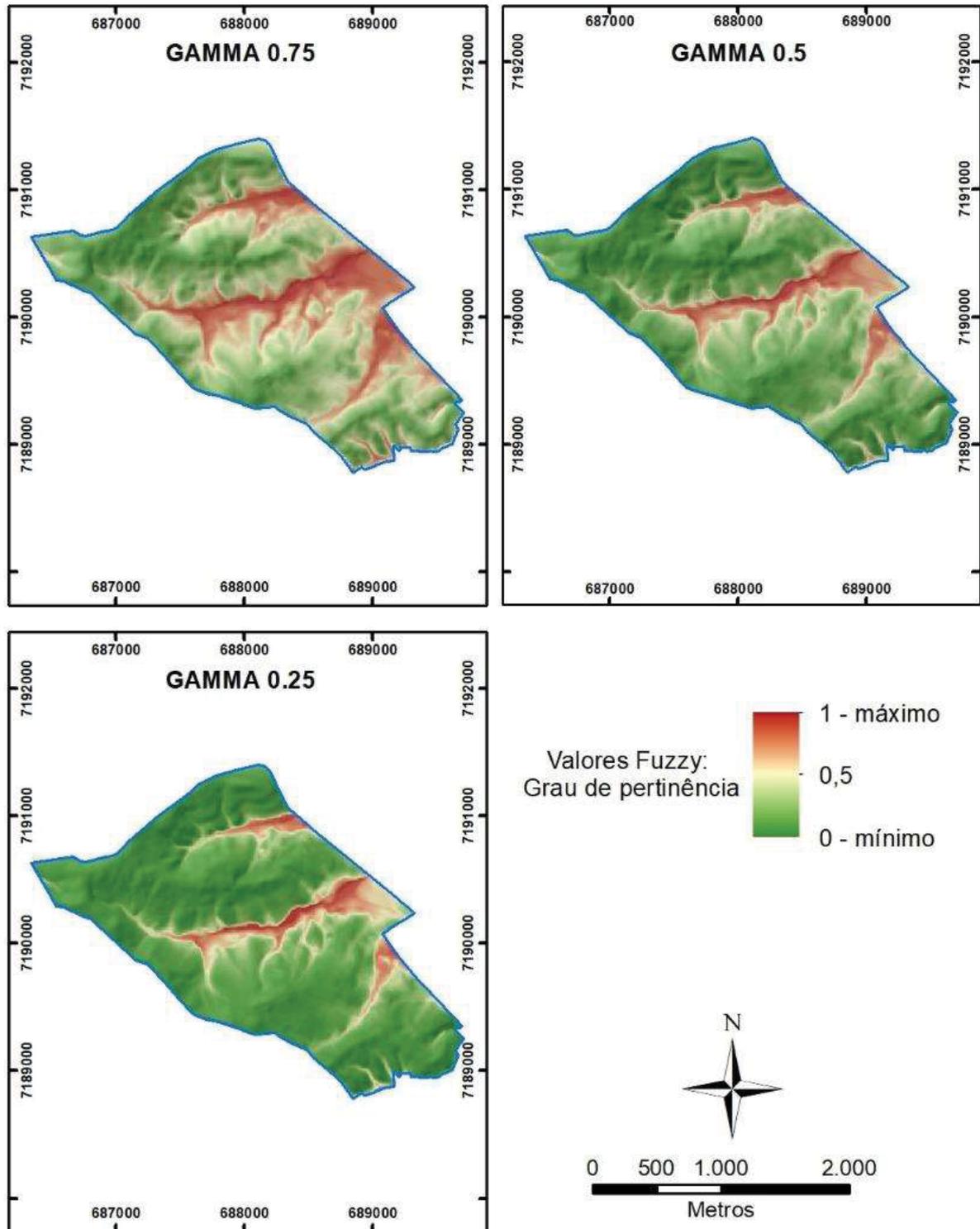
Tabela 3: Cálculo de pixels corretamente classificados operador GAMMA 0,75

Gamma 0.75	Geral	Acerto	Total	%	% acerto
Q1	11976	55	12031	28,52	0,46
Q2	14750	453	15203	36,03	2,98
Q3	7683	1749	9432	22,36	18,54
Q4	2188	3337	5525	13,10	60,40
Total	36597	5594	42191	100	
%	86,74	13,26	100		

Fonte: O Autor (2022)

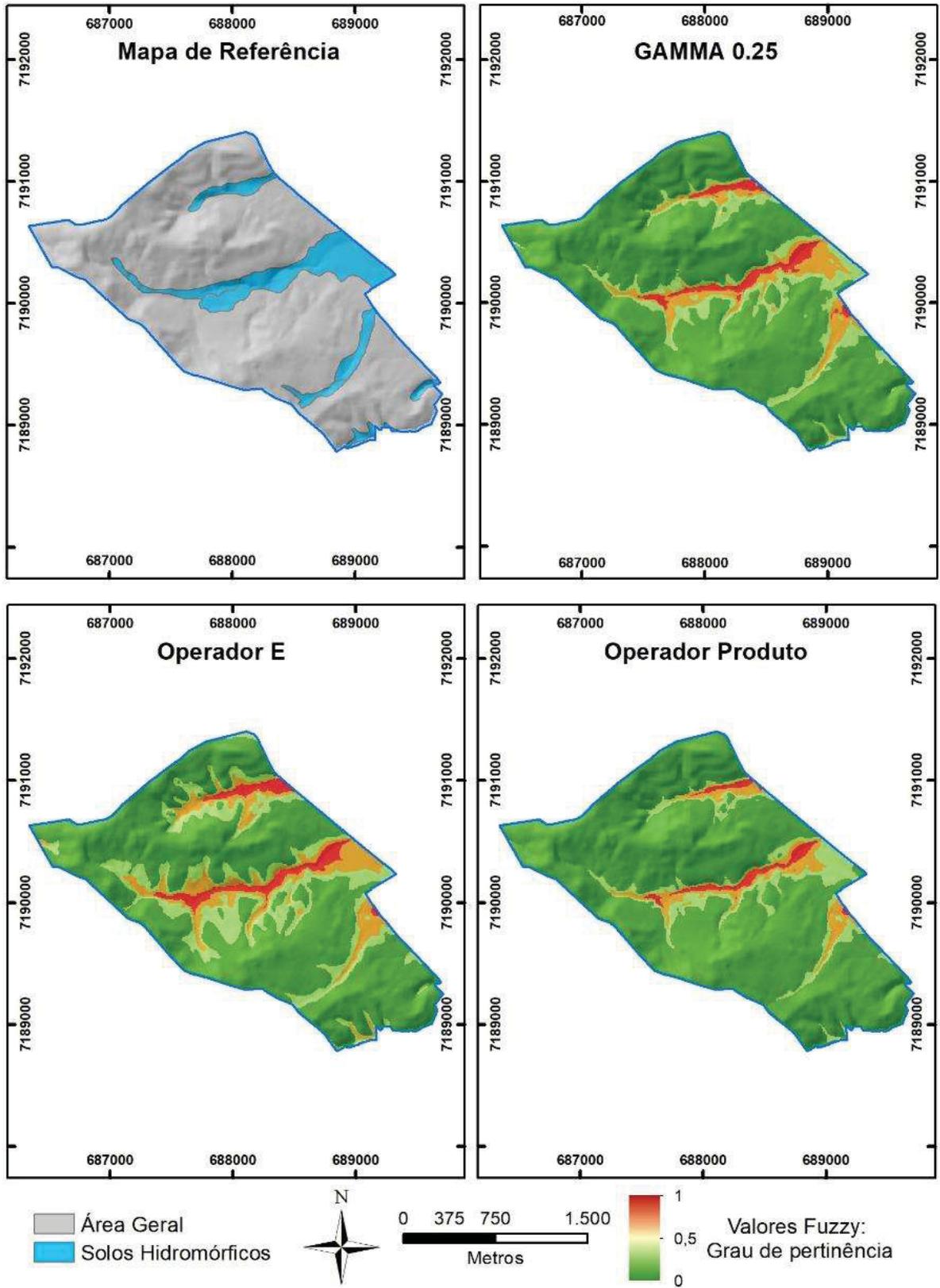
Ao analisar os melhores resultados, tanto por análise visual, como considerando o percentual de pixels corretamente classificados verificou-se que os operadores fuzzy em conjunto com os atributos topográficos, destacados no Quadro 3, produzem resultados com maior qualidade que um mapa de solos elaborado da maneira tradicional ao apresentar melhor delineamento do terreno e com grande prioridade para as áreas mais úmidas em associação com os fundos de vale e formato das vertentes.

Figura 20: Exemplos dos Operadores GAMMA



Fonte: O Autor (2022)

Figura 21: Comparativo entre os operadores classificados



Fonte: O Autor (2022)

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE O MAPA PRELIMINAR DE SOLOS OBTIDO PELO MÉTODO FUZZY COM O MAPA DE REFERÊNCIA

A partir da avaliação dos operadores fuzzy apresentados no item anterior, foi efetuada a tabulação do operador GAMMA 0,25 e o mapa de referência da área de estudo, a fim de avaliar a qualidade da informação produzida.

Os resultados obtidos demonstram que para a área de estudo o operador em questão apresentou grande sucesso ao classificar corretamente pixels para as áreas com caráter hidromórfico apresentando exatidão global de 0,13 ou 0,06 se observarmos só as células com valores de prioridade superiores a 0,5 (Q3 e Q4 respectivamente).

Ao observar na Tabela 4 é possível observar que o número de pixels classificados como solos com caráter hidromórfico está bem distribuído nas 4 classes de prioridade com destaque para os quartis 3 e 4 com 48% do total de pixels corretamente classificados neste intervalo

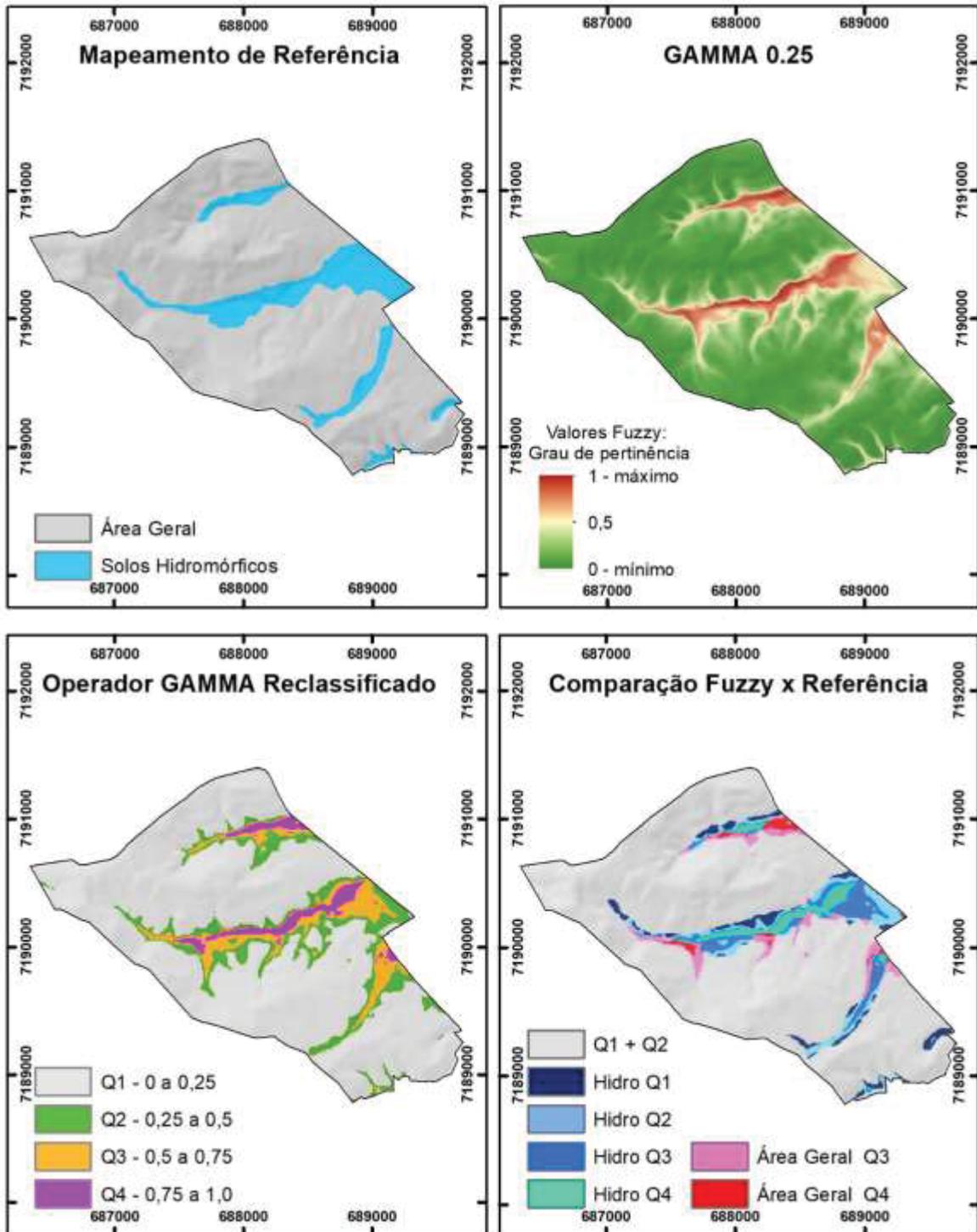
Tabela 4: Matriz de comparativa das classes do mapa de referência as classes do mapa preditivo

Gamma 0,25	Q1	Q2	Q3	Q4	Total	%
Solos Hidromórficos	1245	1651	1755	943	5594	13,26
Cambissolos	24732	2031	742	350	27855	66,02
Latossolos	5819	1044	485	33	7381	17,49
Áreanãomapeada	1282	79	0	0	1361	3,23
Total	33078	4805	2982	1326	42191	
%	78,40	11,39	7,07	3,14	100	

Fonte: O Autor (2022)

Em análise visual do mapa produzido pela lógica fuzzy é possível verificar que as áreas com grau de prioridade próximos de 0,5 apresentam grande potencial para na representação das zonas de semi-hidromorfia. Esta distribuição pode ser observada na Figura 22.

Figura 22: Comparação entre as unidades de solos do mapa de referência e lógica fuzzy



Fonte: O Autor (2022)

5 Considerações Finais

O relevo está diretamente relacionado com a distribuição dos solos ao condicionar, dentro da vertente, os processos hidrológicos e por consequência os processos de erosão e deposição de material responsáveis por formar os horizontes distintos de solos. Deste modo, a identificação de unidades homogêneas na paisagem indica ao pedólogo um conjunto único de associações e, por consequência, de tipos de solos.

O uso dos diversos atributos topográfico em conjunto com as técnicas fuzzy permitiu a separação dos polígonos de solos hidromórficos com menor grau de subjetividade. A delimitação preliminar das áreas de solos hidromórficos apoiada nos atributos topográficos primários e secundários apresentou maior detalhamento espacial do que o mapa de referência. No entanto, a discretização dos atributos para a delimitação dos polígonos de solos requer conhecimento sobre a distribuição dos solos na área de estudo e conhecimento em grande detalhe sobre o comportamento dos solos na paisagem e sua representação através dos atributos topográficos.

Nos diferentes conjuntos testados os atributos topográficos Índice Topográfico de Umidade – Composto, Profundidade do Vale, Índice Multiresolucional da Planicidade do Fundo do Vale, Distância Vertical até a Rede de Drenagem e o Nível de Base da Rede de Drenagem apresentaram melhor relação com as unidades de solos hidromórficos apresentando grande potencial para a delimitação deste grupo.

A aplicação dos operadores fuzzy apresentou resultados satisfatórios, em especial os operadores gamma, com taxas de pixels corretamente classificados na casa dos 71% para o intervalo de 0,75 e 1,0 e aproximadamente 58% no intervalo de 0,5 e 0,75 entre o mapeamento de referência e o obtido pelos operadores fuzzy.

Cabe ressaltar que, ainda que o mapeamento aqui elaborado tenha considerado somente os valores significativos nos histogramas dos atributos topográficos e desconsiderando a experiência do usuário na aplicação da lógica fuzzy, a intervenção do usuário no ajuste dos valores pode proporcionar maior nível de precisão para os produtos gerados.

O mapeamento gerado, ainda que preditivo, apresenta potencial como ferramenta de suporte para delimitação dos ambientes hidromórficas e semi-hidromórficos com grande nível de detalhe, podendo ser utilizado como ferramenta de suporte para estudos de fragilidade ambiental ou planejamento e gestão do território.

Por outro lado, a identificação e delimitação de zonas com caráter hidromórfico em áreas com mudança abrupta no relevo necessita de maior estudo pois a resposta apresentada pelos atributos topográficos na área de estudo pode não ser facilmente replicada em áreas com distintas características de relevo.

Considerando o primeiro nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, a metodologia apresentada neste trabalho permite produzir um mapa de solos com foco na identificação das áreas com presença de solos de caráter hidromórfico com significativo grau de detalhe se comparado a métodos tradicionais de mapeamento. Este maior detalhe permite uma maior velocidade no levantamento de solos em campo com significativa redução de custos. Por outro lado, a identificação e separação de outras áreas não hidromórficas pode necessitar grandes esforços de campo ao necessitar maior número de amostragens para a identificação dos solos na área de estudo.

REFERÊNCIAS

- BELINTANI, H. **Integração Temática de Dados Espaciais para Avaliação de Processos Erosivos em Bacias Hidrográficas Utilizando Lógica Fuzzy e Pesos de Evidência**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro (2007). 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação com área de concentração em Geomática.)
- BOCK, M.; KÖTHE, R. Predicting the depth of hydromorphic soil characteristics influenced by ground water. **Contributions to Physical Geography and Landscape Ecology** - Hamburg, p. 13–22, 2008.
- BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N.; HAMMER, R. D.; TANDARICH, J. P. Historical development of key concepts in pedology. **Geoderma**, v.124, p.23–36, 2005.
- BÖHNER, J.; SELIGE, T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. **Göttinger Geographische Abhandlungen**, v. 115, p. 13–28, 2006.
- CÁTEN A.; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C.; SEBEM, E.; PEREIRA, R. S. Pedometria aplicada à predição de classes de solos utilizando de regressões logísticas múltiplas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, 2009, Natal. **Anais...** Natal : INPE, p. 25-30, 2009.
- CAMARA, G.; MOREIRA, F. R.; BARBOSA, C; ALMEIDA FILHO, R.; Inferência geográfica e suporte à decisão (Cap. 9). In: CAMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à Ciência da Geoinformação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos. 2001.
- CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; JÚNIOR, J. M. Modelos de Paisagem e sua Utilização em Levantamentos Pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 1, p. 104–114, 2006.
- CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná : Curitiba, 2003. 210p.
- CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; et al. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 7, p. 1991–2007, 2015. Copernicus GmbH.
- CURCIO, G. R. **Relações entre geologia, geomorfologia, pedologia e fitossociologia nas planícies fluviais do rio Iguaçu, Paraná, Brasil**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. 488f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Setor de Ciências Agrárias Universidade Federal do Paraná.
- CURI, N. (Coord.). **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - SBCS, 1993. 89 p.

DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relations between geomorphology and soil morphology and genesis. **Advances in Agronomy**. Madison, n. 23, p. 51-87, 1971.

DALRYMPLE, J.B., BLONG, R.J., CONACHER, A.J. A hypothetical nine until and surface model. **Geomorphology**, Berlin, v. 12, p. 60-76, 1968.

DELAZARI, L. S.; ERCOLIN FILHO, L. Projeto UFPR CampusMap. Curitiba: UFPR, Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação, 2019. (UFPR. Projeto de Pesquisa – UFPR CampusMap). Disponível em: <<http://www.campusmap.ufpr.br>>. Acesso em: 26 de maio de 2021.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018.

ESRI. **ArcGis 10.4.1, Spatial Analyst, 3D Analyst**. Environmental Systems Research Institute, 2016

FIPPIN, E. O. The practical classification of soils. **Science**, v. 35, n. 905, p. 677–686, 1912. American Association for the Advancement of Science.

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

FELIX DA SILVA, M, **Mapeamento pedológico preditivo por pedometria nas bacias hidrográficas dos Rios Tagaçaba, Serra Negra e Guaraqueçaba – Guaraqueçaba – PR**, Curitiba, 2016, 150 f., Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia.

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

GERRARD, J. **Soil geomorphology**. An integrated of pedology and geomorphology. London, Ed. Chapman e Hall, 1992.

GALLANT, J. C.; DOWLING, T. I. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. **Water Resources Research**, v. 39, n. 12, 2003. American Geophysical Union.

GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). **Terrain Analysis: Principles and applications**. New York: John Wiley, p.51-85, 2000.

GERRARD, J. **Soil geomorphology**. An integrated of pedology and geomorphology. London, Ed. Chapman e Hall, 1992.

HENGL, T. **Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches**. Wageningen University, Enschede, 2003. 233p. PhD thesis –Wageningen University.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 9, p. 1283–1298, 2006. Pergamon.

HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, A. P. F.; MARTINS, E. S.; DRUCK, S.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; SANTOS, N. B. F.; REATTO, A. **Morfometria como suporte para elaboração de mapas pedológicos: I. Bacias hidrográficas assimétricas**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA, Planaltina, Documentos 68, 25p. 2002.

HOBSON, R. D. Surface roughness in topography: quantitative approach In: Chorley, R.J., 1972. *Spatial analysis in geomorphology*. 1972. p. 225-245.

HILGARD, E. W. **Soils, their formation, properties, composition, and relations to climate and plant growth in the humid and arid regions**. Macmillan, 1921.

HUGGET, R. J. Soil Landscape Systems: A model of soil genesis. **Geoderma**, v.13, p.01-22, 1975.

HUNG, MA. N. W.; SIEFERT, C. A. C.; SANTOS, I. DOS. **Simulação Hidrogeomorfológica Da Dinâmica Das Áreas Saturadas Da Bacia Do Rio Corredeiras, Rio Negrinho – Sc. RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 41, 2017.

HUTCHINSON, M. F. **Calculation of hydrologically sound digital elevation models**. Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney, Australia, 1989.

KÄMPF, N.; CURI, N. **Formação e evolução do solo (pedogênese)**. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds.). *Pedologia: fundamentos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 207-302.

LAGACHERIE, P. **Digital Soil Mapping: A State of art**. In.: HARTEMINK, A.E.; McBATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L. (Ed.), *Digital Soil Mapping with Limited Data*. New York: Springer, p.3-14, 2008

LEPSCH, I. **Formação e conservação dos solos**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LYON, T. L.; BUCKMAN, H. O. The nature and properties of soils. **The nature and properties of soils; a college text of edaphology**, 1922. The Macmillan company.

MAACK, R. R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Ed. UEPG, 2012.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas** / José Iguelmar Miranda. – 2. ed. rev. atual. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 425 p.

McBratney AB (1986) Introduction to pedometrics: a course of lectures, CSIRO Division of Soils Technical Memorandum 53/1986. (mimeo). CSIRO Division of Soils, Glen Osmond. 150 pp

MCBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. **An overview of pedometric techniques for use in soil survey**. 2000.

MCBRATNEY, A.; MENDONÇASANTOS, M. MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1, p. 3–52, 2003.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. **Mapeamento digital de classes e atributos de solos: métodos, paradigmas e novas técnicas**. - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.

MILNE, G. Some suggested units of classification and mapping, particularly for East African soils. **Supplements to the Proceedings of the International Society of Soils Science**, v.4, n.3, p.183-198, 1935.

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

MOORE, I. D.; GESSLER, G.A.; PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.443-452, 1993.

NEUMAN, G.; SILVEIRA, C. T.; SAMPAIO, T. V. M. Análise Da Influência Da Escala Na Obtenção Dos Atributos Topográficos Derivados De Mde. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 43, p. 179–199, 2018.

NETO, P.V. **Estatística descritiva: Conceitos básicos**. São Paulo. 2004.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 28, n. 3, p. 323–344, 1984. Academic Press.

OLAYA, V. Basic land-surface parameters. **Developments in Soil Science**, v. 33, n. C, p. 141–169, 2009. Elsevier Ltd.

Olaya, V. (2004) A Gentle Introduction to SAGA GIS. 1.1 Edition, Olaya Victor and Pineda Javier Editors., Madrid, Spain. - References - Scientific Research Publishing.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 59–79, 1991.

RUHE, R. V. **Geomorphic surfaces and the nature of soils**. Soil Science, Baltimore, v. 82, n. 6, p. 441-445, 1956.

RUHE, R. V. Elements of the soil landscape. **Transactions 7th int. Congr. Soil Sci.**, v. 4, p. 165–170, 1960.

RUHE, R. V. **Quaternary landscapes in Iowa**, Iowa State University Press, Ames 1969.

RUHE, R. V. **Geomorphology**, Houghton Mifflin Company, 236p.1975.

SALAMUNI, E.; Nascimento, E. R; HAUCK, P. A.; FIORI, C. O. Geomorfologia do Município de Curitiba-PR. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, p. 327-341, 2013.

SAMPAIO, T.V.M.; AUSGUSTIN, C.H.R.R. **Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.15(1). p. 47-60, 2014.

SEMA SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Atlas da Vegetação do Estado do Paraná**. Curitiba: SEMA, 2002.

SANTANA, J. C **O Uso Da Lógica Fuzzy No Estudo Das Áreas Potenciais Ao Processo Erosivo Na Bacia Do Ribeirão Cambé, Londrina - PR**. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2014. 88p. Dissertação (Mestre em Engenharia Urbana) Setor de Ciências Agrárias Universidade Estadual de Maringá.

SILVA, S. F. **Zoneamento Geoambiental com auxílio de lógica fuzzy e proposta de um geoindicador para caracterização do meio físico da Bacia do Rio do Peixe**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. 441p. Tese (Doutorado em Geotecnia)

SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: Integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e redes neurais artificiais**. Curitiba, 2010, 153 f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SILVEIRA, C. T. OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. V.; SILVA, C. R. **Pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas**. Revista Brasileira de Geomorfologia. Vol. 13, nº 2. 2012.

SIRTOLI, A. V. **Mapeamento de Solos Com Auxílio da Geologia, Atributos do Terreno e Índices Espectrais Integrados Por Redes Neurais Artificiais**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008. 114f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SOMMER, M.; SCHLICHTING, E. Archetypes of catenas in respect to matter — a concept for structuring and grouping catenas. **Geoderma**, v. 76, n. 1–2, p. 1–33, 1997. Elsevier.

SUGAMOSTO, M. L. **Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do Centro de Estações Experimentais do Canguiri**, município de Pinhais - Paraná. Curitiba, 2002. 133p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias

TOMLIN, C. D. A **Map Algebra**. In Proceedings of Harvard Computer Graphics Conference, at Cambridge, Mass, 1983

VIDAL-TORRADO, P. LEPSCH, I. F. CASTRO, S.S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. **Tópicos em Ciências dos Solos**. 4: 145 – 192, 2005.

WEBSTER, R. The development of pedometrics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, n. 1-3, p. 1-15, 1994.

Wilding, L., 1985. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys, Soil spatial variability. Workshop 166–194.

WOOD, A. The development of hillside slopes. **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 53, n. 3–4, p. 128-IN3, 1942. Elsevier.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets. Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965. Academic Press.

ZHU, A. X.; LIU, J.; DU, F.; et al. Predictive soil mapping with limited sample data. **European Journal of Soil Science**, v. 66, n. 3, p. 535–547, 2015. Blackwell Publishing Ltd.

ZIMMERMANN, H.-J. **Fuzzy Set Theory—and Its Applications**, 2001. Springer Netherlands.

ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 12, n. 1, p. 47–56, 1987.

APÊNDICE 1 – LISTA DOS ARTIGOS COSULTADOS PARA SELEÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

AN, Y.; YANG, L.; ZHU, A. X.; QIN, C.; SHI, J. J. Identification of representative samples from existing samples for digital soil mapping. **Geoderma**, v. 311, p. 109–119, 2018. Elsevier B.V.

ANGELINI, M. E.; KEMPEN, B.; HEUVELINK, G. B. M.; TEMME, A. J. A. M.; RANSOM, M. D. Extrapolation of a structural equation model for digital soil mapping. **Geoderma**, v. 367, n. February, p. 114226, 2020. Elsevier.

BODAGHABADI, M. B.; MART, A. **Digital Soil Mapping Using Artificial Neural Networks and Terrain-Related Attributes**, v. 25, n. 4, p. 580–591, 2015.

BRUNGARD, C. W.; BOETTINGER, J. L.; DUNIWAY, M. C.; WILLS, S. A.; EDWARDS, T. C. Machine learning for predicting soil classes in three semi-arid landscapes. **Geoderma**, v. 239, p. 68–83, 2015. Elsevier B.V.

CAMBELL, G. THE APPLICATION OF DIGITAL SOIL MAPPING TO IMPROVE THE RESOLUTION OF NATIONAL SOIL PROPERTIES ACROSS GREAT BRITAIN, 2018.

DORNIK, A.; DRĂGUȚ, L.; URDEA, P. Classification of Soil Types Using Geographic Object-Based Image Analysis and Random Forests. **Pedosphere**, v. 28, n. 6, p. 913–925, 2018.

ELLILI, Y.; WALTER, C.; MICHOT, D.; PICHELIN, P.; LEMERCIER, B. Mapping soil organic carbon stock change by soil monitoring and digital soil mapping at the landscape scale. **Geoderma**, v. 351, n. May, p. 1–8, 2019. Elsevier.

FLYNN, T.; ROZANOV, A.; CLARKE, C. Input map and feature selection for soil legacy data. **Geoderma**, v. 375, n. May, p. 114452, 2020. Elsevier.

GAO, H.; ZHANG, X.; WANG, L.; et al. Selection of training samples for updating conventional soil map based on spatial neighborhood analysis of environmental covariates. **Geoderma**, v. 366, n. February, p. 114244, 2020. Elsevier.

GUO, P. T.; LI, M. F.; LUO, W.; et al. Digital mapping of soil organic matter for rubber plantation at regional scale: An application of random forest plus residuals kriging approach. **Geoderma**, v. 237–238, p. 49–59, 2015. Elsevier B.V.

LAGACHERIE, P.; ARROUAYS, D.; BOURENNANE, H.; GOMEZ, C.; NKUBA-KASANDA, L. Analysing the impact of soil spatial sampling on the performances of Digital Soil Mapping models and their evaluation: a numerical experiment using clay contents obtained from Vis-NIR-SWIR hyperspectral imagery. **Geoderma**, v. 375, n. September 2019, p. 114503, 2020. Elsevier.

LANDRÉ, A.; CORNU, S.; MEUNIER, J. D.; et al. Do climate and land use affect the pool of total silicon concentration? A digital soil mapping approach of French topsoils. **Geoderma**, v. 364, n. May 2019, p. 114175, 2020. Elsevier.

LIU, F.; ZHANG, G. L.; SONG, X.; et al. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China. **Geoderma**, v. 361, n. October 2019, p. 114061, 2020. Elsevier.

LIU, X.; ZHU, A. X.; YANG, L.; et al. A graded proportion method of training sample selection for updating conventional soil maps. **Geoderma**, v. 357, n. April 2017, p. 113939, 2020. Elsevier.

MA, Y.; MINASNY, B.; MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B. Pedology and digital soil mapping (DSM). **European Journal of Soil Science**, v. 70, n. 2, p. 216–235, 2019.

MASSAWE, B. H. J.; SUBBURAYALU, S. K.; KAAYA, A. K.; WINOWIECKI, L.; SLATER, B. K. Mapping numerically classified soil taxa in Kilombero Valley, Tanzania using machine learning. **Geoderma**, v. 311, n. 2018, p. 143–148, 2018. Elsevier B.V.

MEIER, M.; SOUZA, E. DE; FRANCELINO, M. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R. Digital Soil Mapping Using Machine Learning Algorithms in a Tropical Mountainous Area. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1–22, 2018.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 2, p. 443–452, 1993.

MOSLEH, Z.; SALEHI, M. H.; JAFARI, A.; BORUJENI, I. E.; MEHNATKESH, A. The effectiveness of digital soil mapping to predict soil properties over low-relief areas. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, n. 3, p. 1–13, 2016.

MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; HORST-HEINEN, T. Z.; et al. Prediction of soil classes in a complex landscape in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019.

NOWATZKI, A. **Mapeamento pedológico preditivo por diferentes métodos de integrações de atributos topográficos: aplicações no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Ivaí - noroeste do estado do Paraná**, 2019. Universidade Federal do Paraná.

NUSSBAUM, M.; SPIESS, K.; BALTENSWEILER, A.; et al. Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. **SOIL**, v. 4, n. 1, p. 1–22, 2018.

ORTON, T. G.; PRINGLE, M. J.; BISHOP, T. F. A.; MENZIES, N. W.; DANG, Y. P. Increment-averaged kriging for 3-D modelling and mapping soil properties_ Combining machine learning and geostatistical methods. **Geoderma**, v. 361, n. October 2019, p. 114094, 2020. Elsevier.

PADARIAN, J.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. **Using deep learning for digital soil mapping**. **Soil**, v. 5, n. 1, p. 79–89, 2019.

PAHLAVAN RAD, M. R.; TOOMANIAN, N.; KHORMALI, F.; et al. Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loess derived soils of northern Iran. **Geoderma**, v. 232–234, p. 97–106, 2014. Elsevier B.V.

PÁSZTOR, L.; LABORCZI, A.; BAKACSI, Z.; SZABÓ, J.; ILLÉS, G. Compilation of a national soil-type map for Hungary by sequential classification methods. **Geoderma**, v. 311, n. May 2017, p. 93–108, 2018.

PENG, Y.; ROELL, Y. E.; BJØRN MØLLER, A.; et al. Identifying and mapping terrons in Denmark. **Geoderma**, v. 363, n. October 2019, p. 114174, 2020. Elsevier.

PEREIRA, B.; SILVA, C.; LEANDRO, M.; et al. **Digital soil mapping including additional point sampling in Posses ecosystem services pilot watershed, southeastern Brazil**, n. September, p. 1–12, 2019.

PRINCE, A.; FRANSSEN, J.; LAPIERRE, J. F.; MARANGER, R. High-resolution broad-scale mapping of soil parent material using object-based image analysis (OBIA) of LiDAR elevation data. **Catena**, v. 188, n. February, p. 104422, 2020. Elsevier.

RIZZO, R.; DEMATTÊ, J. A. M.; LEPSCH, I. F.; GALLO, B. C.; FONGARO, C. T. Digital soil mapping at local scale using a multi-depth Vis-NIR spectral library and terrain attributes. **Geoderma**, v. 274, p. 18–27, 2016. Elsevier B.V.

ROMÁN-SÁNCHEZ, A.; VANWALLEGHEM, T.; PEÑA, A.; LAGUNA, A.; GIRÁLDEZ, J. V. Controls on soil carbon storage from topography and vegetation in a rocky, semi-arid landscapes. **Geoderma**, v. 311, p. 159–166, 2018. Elsevier B.V.

SILVA, B. M.; SILVA, S. H. G.; OLIVEIRA, G. C. DE; et al. Soil moisture assessed by digital mapping techniques and its field validation. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 140–148, 2014. Editora UFLA.

SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; et al. Soil prediction using artificial neural networks and topographic attributes. **Geoderma**, v. 195–196, p. 165–172, 2013. Elsevier B.V.

SILVEIRA, R. M. P.; DA SILVEIRA, C. T. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COM DISTINTAS CARACTERÍSTICAS DE PROCESSAMENTO E AQUISIÇÃO. **Boletim de Geografia**, v. 33, n. Número Especial, p. 106–121, 2015.

SIRTOLI, A. E.; DA SILVEIRA, C. T.; DA SILVA, C. R.; et al. Atributos topográficos secundários no mapeamento de pedoformas. *Geociencias*, v. 27, n. 1, p. 63–77, 2008.

STUMPF, A.; KERLE, N. **Object-oriented mapping of landslides using Random Forests. Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 10, p. 2564–2577, 2011. Elsevier Inc.

TAVARES WAHREN, F.; JULICH, S.; NUNES, J. P.; et al. Combining digital soil mapping and hydrological modeling in a data scarce watershed in north-central Portugal. **Geoderma**, v. 264, p. 350–362, 2016. Elsevier B.V.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. DE A.; SANTOS, M. DE L. M. Componentes principais como preditores no mapeamento digital de classes de solos. **Ciência Rural**, v. 41, n. 7, p. 1170–1176, 2011. Universidade Federal de Santa Maria.

TENG, H. T.; VISCARRA ROSSEL, R. A.; SHI, Z.; BEHRENS, T. Updating a national soil classification with spectroscopic predictions and digital soil mapping. **Catena**, v. 164, n. October 2017, p. 125–134, 2018. Elsevier.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. COMPARAÇÃO DO USO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO EM MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS EM DOIS IRMÃOS, RS, BRASIL. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 38, p. 1367–1376, 2014.

VAN ZIJL, G. Digital soil mapping approaches to address real world problems in southern Africa. **Geoderma**, v. 337, n. July 2018, p. 1301–1308, 2019. Elsevier.

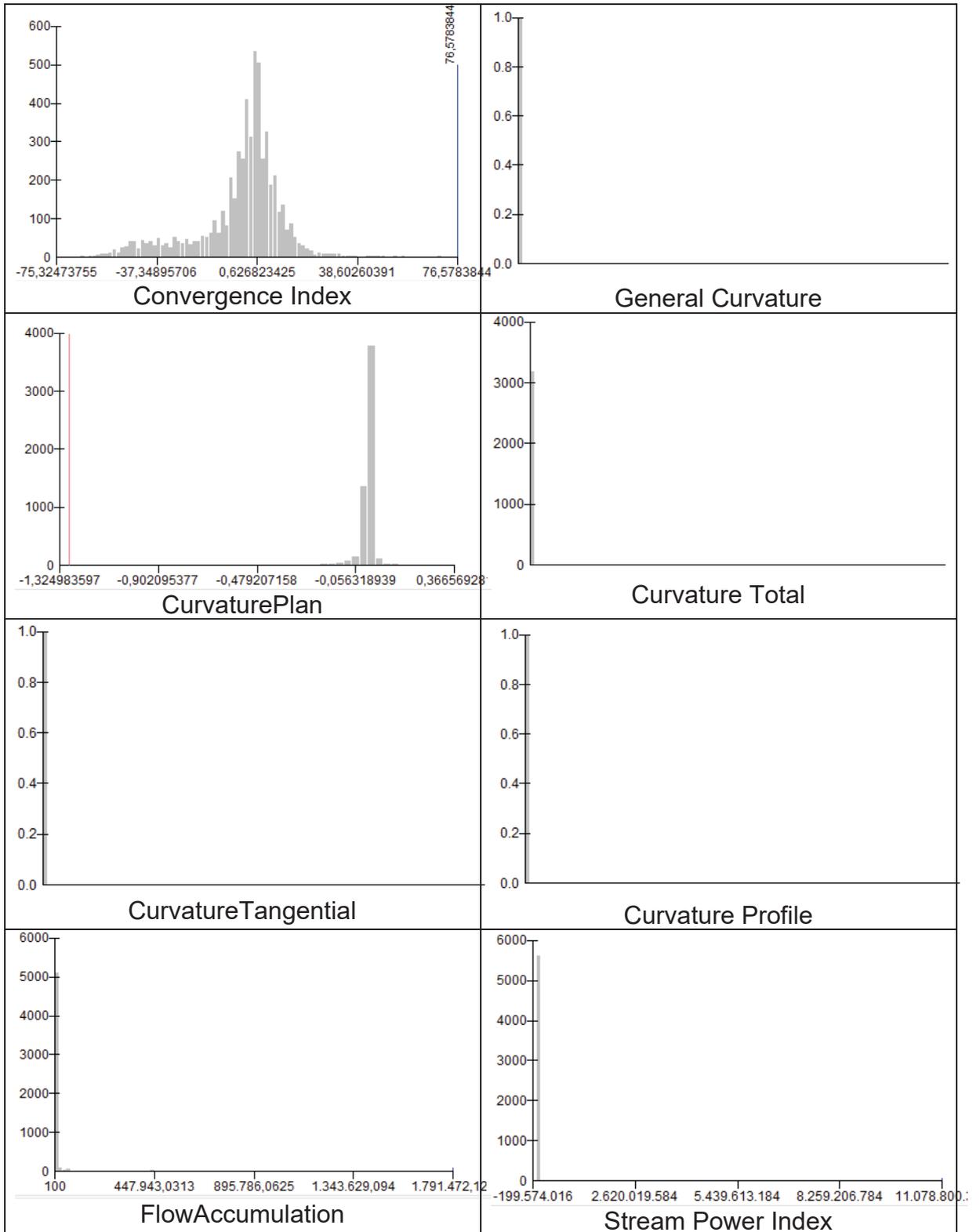
VINCENT, S.; LEMERCIER, B.; BERTHIER, L.; WALTER, C. Spatial disaggregation of complex Soil Map Units at the regional scale based on soil-landscape relationships. **Geoderma**, v. 311, p. 130–142, 2018. Elsevier B.V.

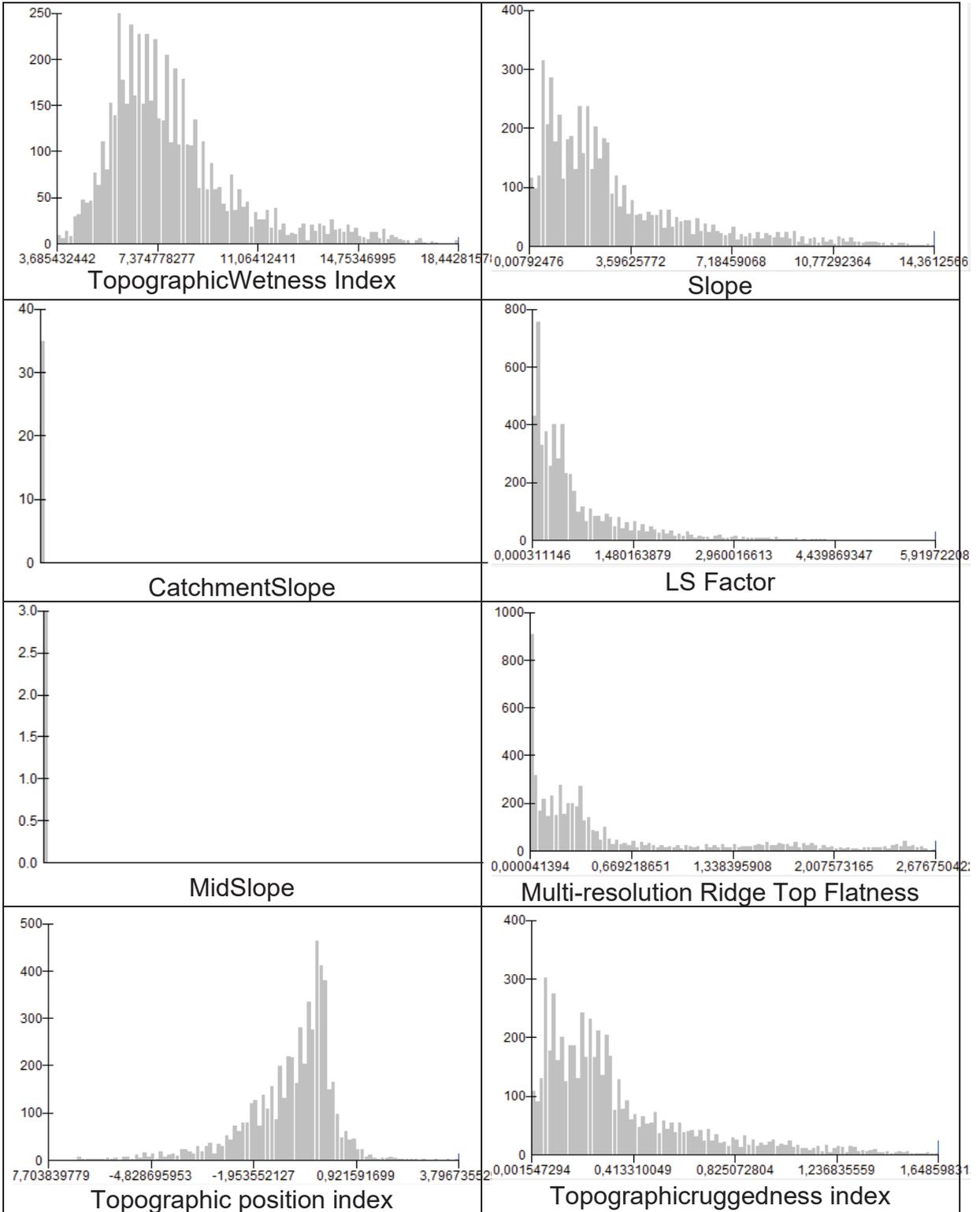
WOLSKI, M. S.; DALMOLIN, R. S. D.; FLORES, C. A.; et al. Digital soil mapping and its implications in the extrapolation of soil-landscape relationships in detailed scale. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 52, n. 8, p. 633–642, 2017.

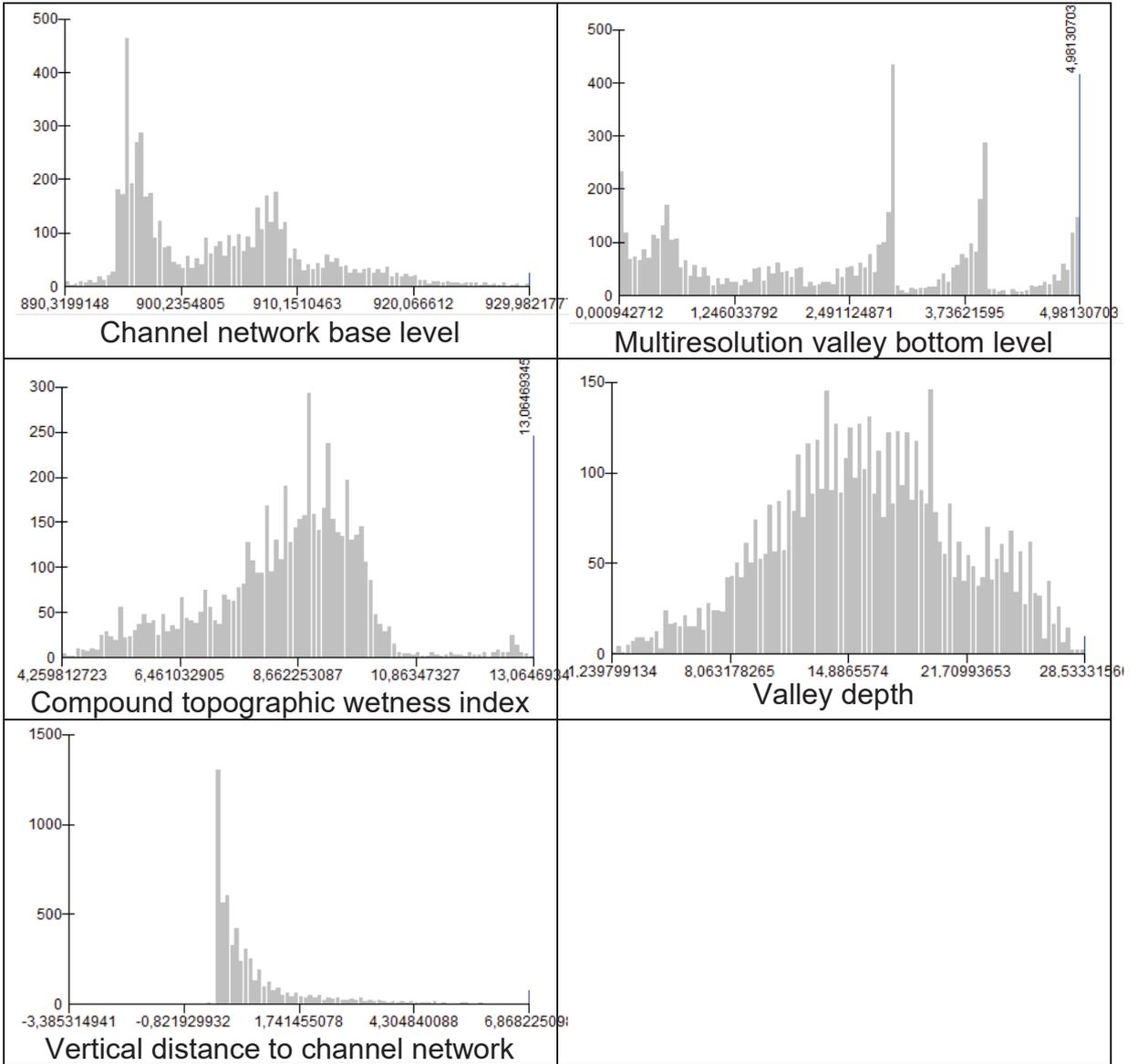
ZERAATPISHEH, M.; BAKHSHANDEH, E.; HOSSEINI, M.; ALAVI, S. M. Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. **Geoderma**, v. 363, n. May 2019, p. 114139, 2020. Elsevier.

ZHU, A. X.; LIU, J.; DU, F.; et al. Predictive soil mapping with limited sample data. **European Journal of Soil Science**, v. 66, n. 3, p. 535–547, 2015. Blackwell Publishing Ltd.

APÊNDICE 2–Histogramas Dos Atributos Topográficos

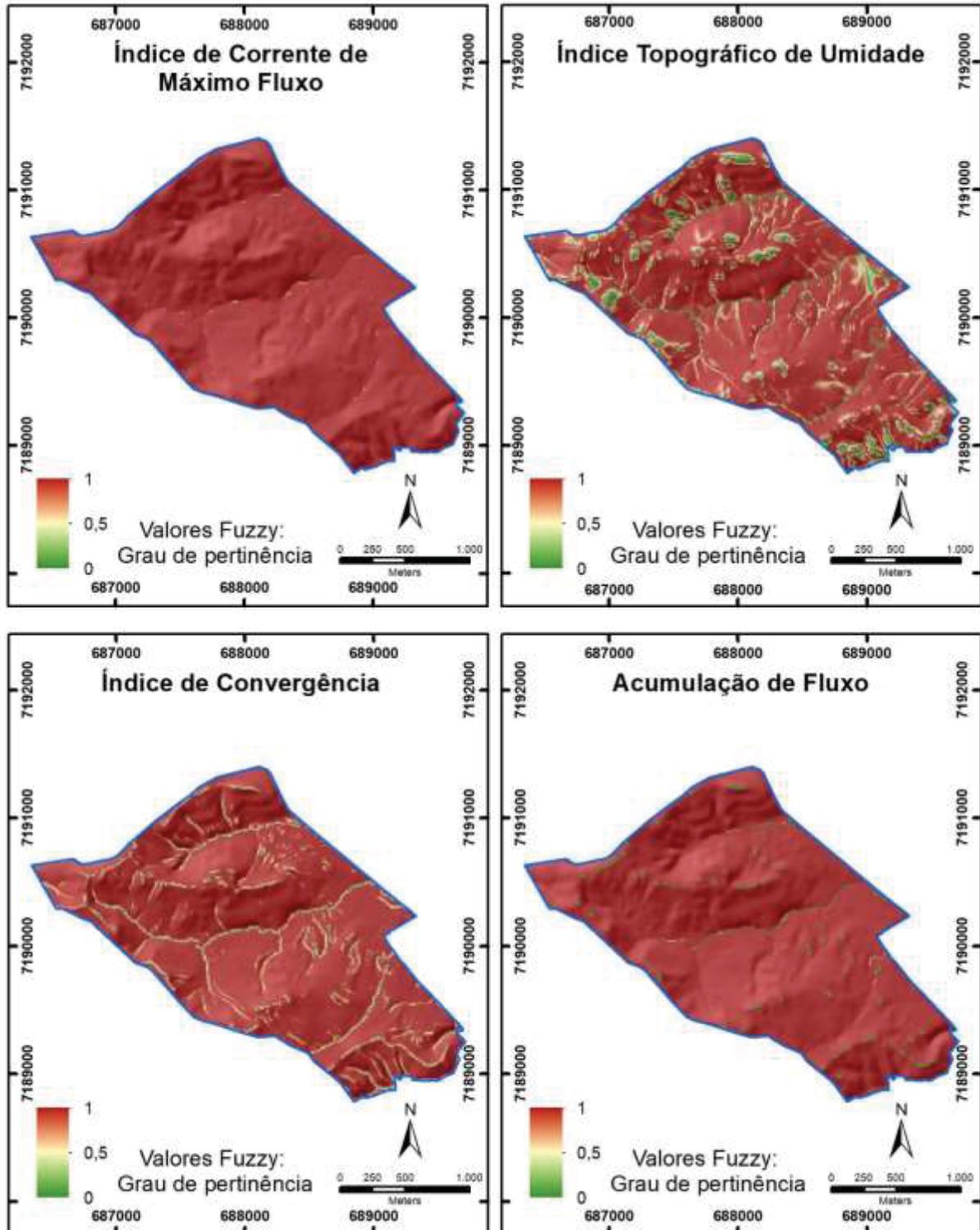


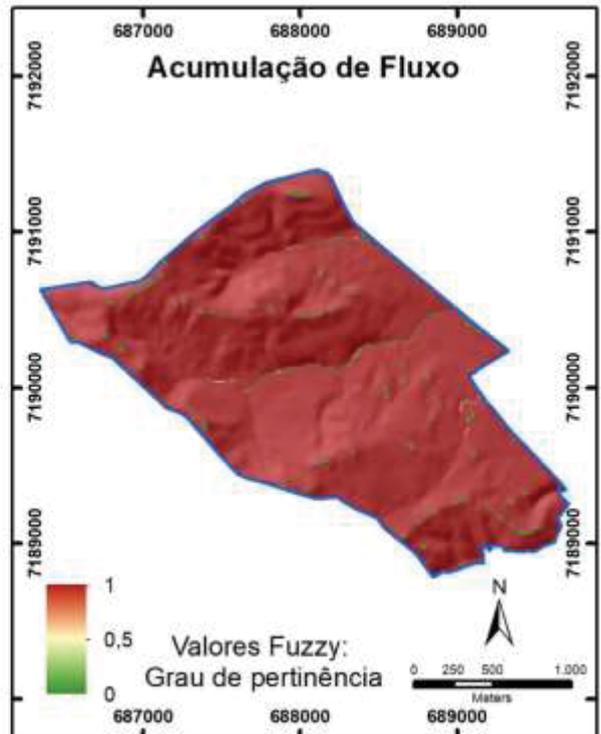
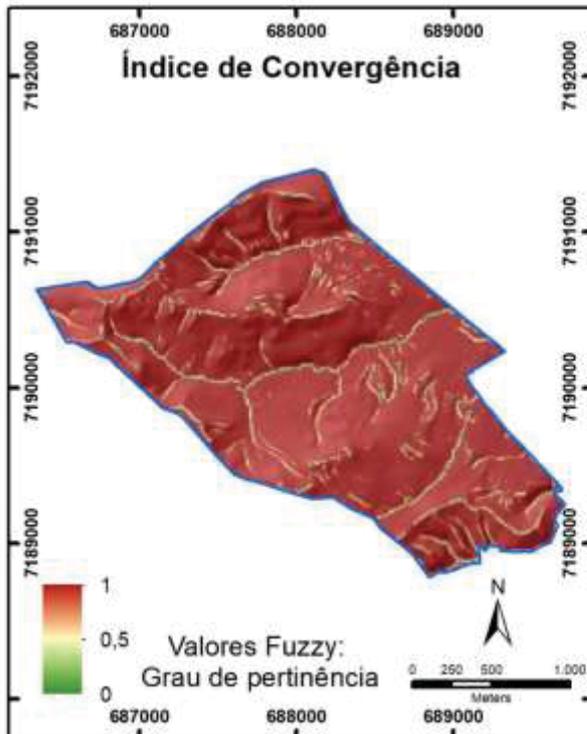
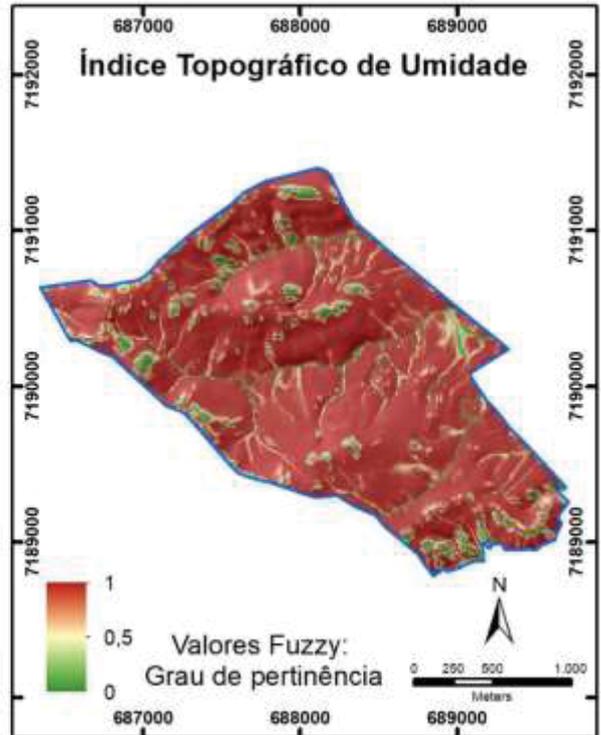
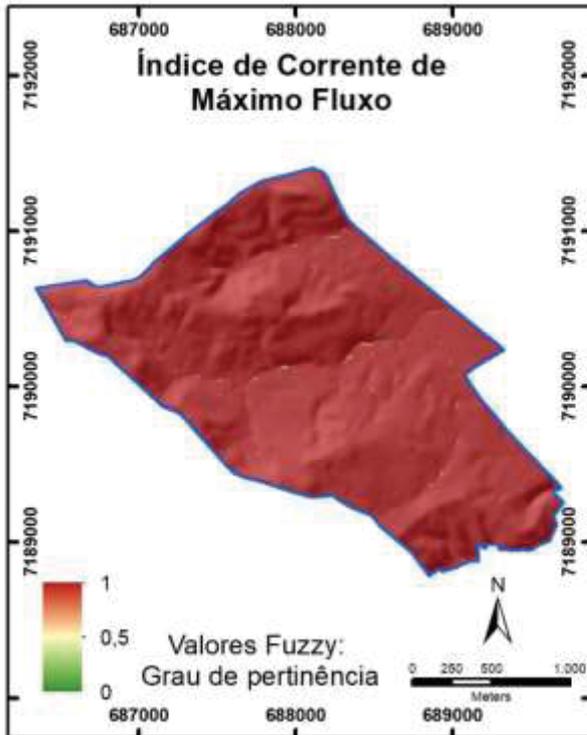


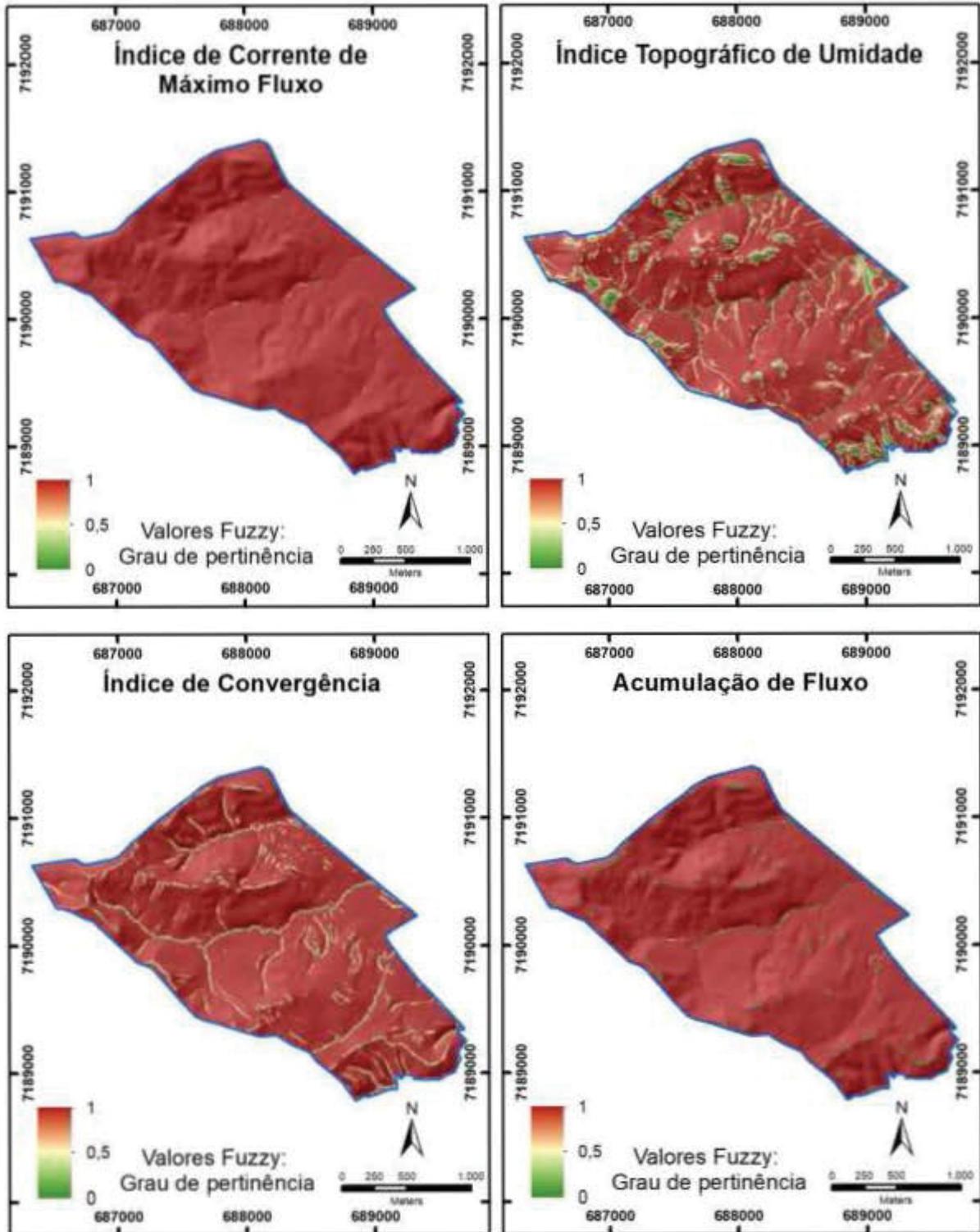


APÊNDICE 3 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS FUZZIFICADOS

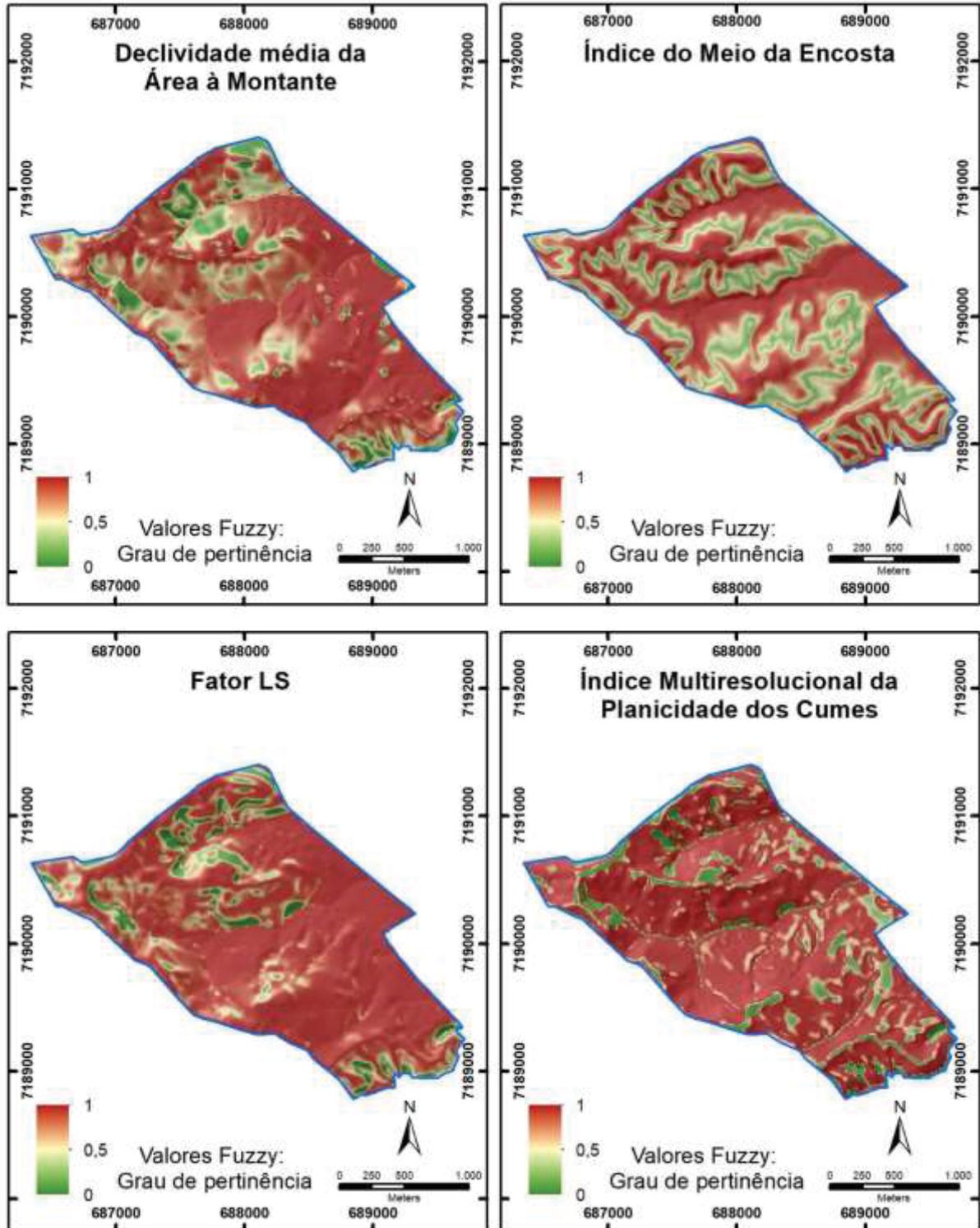
Grupo dos atributos Muito Generalizados

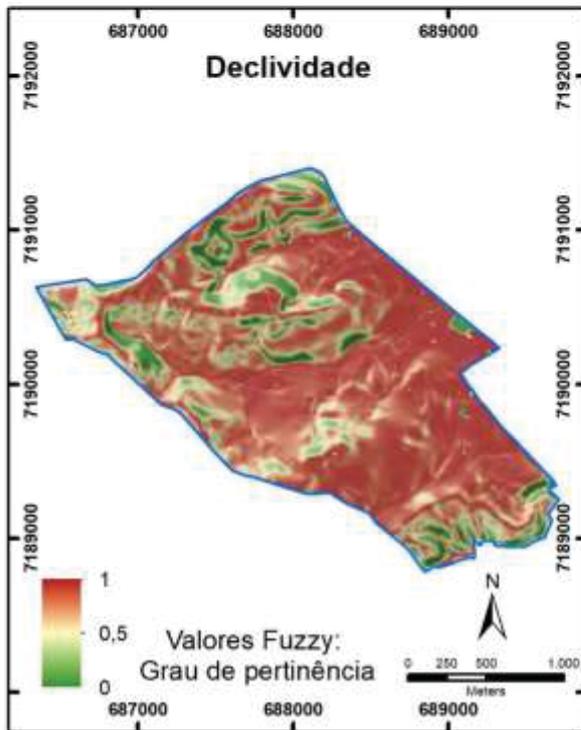
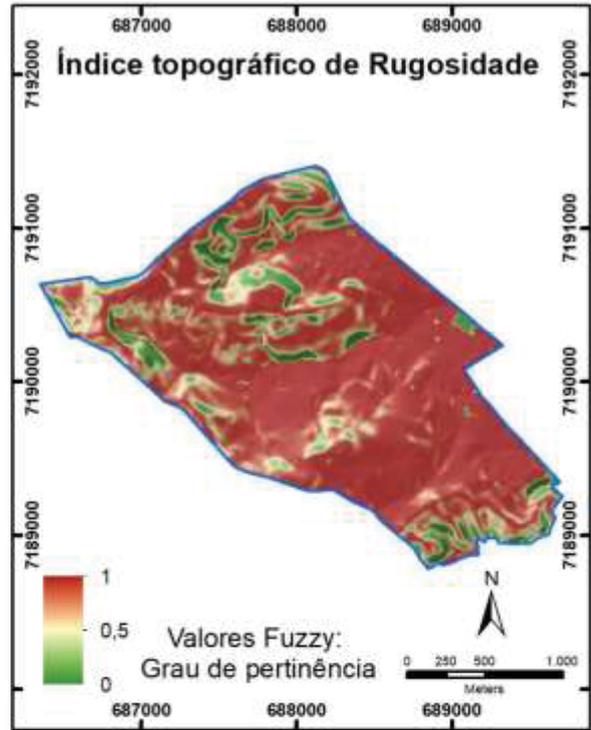
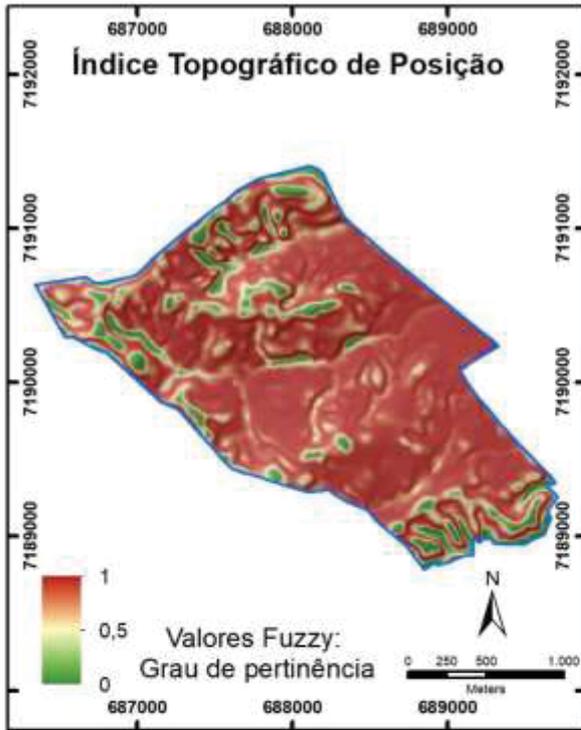






Grupo dos atributos Moderados





Grupo dos atributos Específicos

