

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM TECNOLOGIAS COMPUTACIONAIS PARA O AGRONEGÓCIO

EVELIN TAIS SCHLICKMANN KRUG

**ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO POR EROSÃO LAMINAR EM
FUNÇÃO DE SUAS CARACTERÍSTICAS E DIFERENTES NÍVEIS DE
PRECIPITAÇÃO**

Medianeira

2020

EVELIN TAIS SCHLICKMANN KRUG

**ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO POR EROÇÃO LAMINAR EM FUNÇÃO DE
SUAS CARACTERÍSTICAS E DIFERENTES NÍVEIS DE PRECIPITAÇÃO**
**Estimation of soil loss by laminar erosion as a function of its characteristics
and different levels of precipitation**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Tecnologias
Computacionais para o Agronegócio da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Claudio Leones Bazzi.

MEDIANEIRA

2020



Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.



EVELIN TAIS SCHLICKMANN KRUG

ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO POR EROSÃO LAMINAR EM FUNÇÃO DE SUAS CARACTERÍSTICAS E DIFERENTES NÍVEIS DE PRECIPITAÇÃO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em tecnologias computacionais para o Agronegócio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Área de concentração: Tecnologias computacionais aplicados a produção agrícola e agroindústria.

Data de aprovação: 23 de Junho de 2020

Prof. Claudio Leones Bazzi, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Fabiana Costa de Araujo Schutz, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciano Gebler, Doutorado – Embrapa

Documento gerado pelo sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 23/06/2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde, força e perseverança para superar todas as dificuldades e conseguir alcançar meus objetivos.

À minha família que sempre me motivou a buscar meus sonhos e me proporcionou oportunidades de estudar.

Ao meu noivo Eduardo Gomes Figueiredo por todo apoio e incentivo nos momentos que precisei.

Ao Prof. Dr. Claudio Leones Bazzi pela orientação, apoio e confiança.

Aos colegas de mestrado pela amizade, troca de conhecimentos e vivências.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo para realização do mestrado.

RESUMO

KRUG, Evelin Tais Schlickmann. **Estimativa de perda de solo por erosão laminar em função de suas características e diferentes níveis de precipitação.** 2020. Monografia (Mestrado em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Devido à crescente perda de capacidade produtiva dos solos brasileiros ao longo de décadas de uso e manejo inadequado, bem como a necessidade crescente de produzir alimentos e combustíveis, a erosão do solo coloca um desafio à sustentabilidade da produção agrícola. Com o intuito de buscar formas de prever erosão e mitigar seus impactos, diversos métodos foram desenvolvidos, sendo a modelagem uma importante ferramenta utilizada para obter avaliações confiáveis de predições de perdas de solo e, ainda, para o planejamento de medidas de controle desse fenômeno. Apesar dos diversos estudos realizados, a modelagem do processo erosivo é complexa e a maioria dos métodos não leva em consideração a variabilidade espacial dos fatores que influenciam a erosão. Assim o presente trabalho objetivou desenvolver um modelo que permita identificar áreas suscetíveis a erosão laminar em solo trabalhados com agricultura de precisão (AP). Para isso foram utilizadas amostras de solo de três propriedades da região oeste do Paraná, sendo uma no município de Céu Azul e duas em Serranópolis do Iguaçu. Os dados foram submetidos a análise estatística e geoestatística e a interpolação dos dados por krigagem. Após essa etapa, foram calculados os fatores para estimativa de perda de solo, sendo gerados mapas temáticos. Tais mapas, foram integrados por meio de álgebra de mapas, resultando no modelo de identificação de áreas suscetíveis a erosão. A área A apresentou baixa e média suscetibilidade sendo mais influenciada pelo fator topográfico e pelo fator erodibilidade, enquanto as áreas B e C apresentaram baixa suscetibilidade, sendo mais influenciadas pelo Fator topográfico.

Palavras-chave: conservação de precisão¹; geoestatística²; krigagem³.

ABSTRACT

KRUG, Evelin Tais Schlickmann. **Estimation of soil loss by laminar erosion as a function of its characteristics and different levels of precipitation.** 2020. Monografia (Mestrado em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Due to the increasing loss of productive capacity of Brazilian soils over decades of inadequate use and management and the growing need to produce food and fuel, soil erosion poses a challenge to the sustainability of agricultural production. In order to find ways to predict erosion and mitigate its impacts, several methods have been developed, with modeling being an important tool used to obtain reliable estimates of soil loss predictions and also for the planning of measures to control this phenomenon. In spite of several studies, modeling of the erosive process is complex and most of the methods do not take into account the spatial variability of the factors that influence erosion. Thus, the present work aimed to develop a model that allows the identification of areas susceptible to laminar erosion in soil worked with precision agriculture (AP). For this, soil samples from three properties in the western region of Paraná will be used, one in the city of Céu Azul and two in Serranópolis do Iguaçu. The data were subjected to statistical and geostatistical analysis and data interpolation by kriging. After this stage, the factors for estimating soil loss were calculated and thematic maps were generated. Such maps were integrated through map algebra, resulting in the identification model of areas susceptible to erosion. Area A showed low and medium susceptibility, being more influenced by the topographic factor and erodibility factor, while areas B and C showed low susceptibility, being more influenced by the topographic factor.

Key-words: precision conservation¹; geostatistics²; kriging³.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Parâmetros do semivariograma.....	23
Figura 2:Localização das áreas.....	36
Figura 3: Localização e grade amostral da Área A	37
Figura 4: Localização e grade amostral da Área B	38
Figura 5: Localização e grade amostral da Área C	38
Figura 6: Equipamento utilizado para coleta de imagens.....	44
Figura 7: Fluxograma para obtenção da estimativa de perda de solo	46
Figura 8: Mapas temáticos da Área A	50
Figura 9: Mapas temáticos da Área B	53
Figura 10: Mapas temáticos da Área C	55
Figura 11: Erodibilidade das áreas de estudo.....	61
Figura 12: Declividade das áreas de estudo	63
Figura 13: Comprimento de rampa das áreas de estudo.....	65
Figura 14: Fator Topográfico das áreas de estudo	66
Figura 15: Fotografia das Áreas	67
Figura 16: Mapa de uso e Ocupação do solo.....	69
Figura 17: Estimativa de perda de solo	71
Figura 18: Mapa de suscetibilidade a erosão laminar	73

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Estatística descritiva das Áreas	47
Tabela 2: Métodos de interpolação e parâmetros dos atributos na Área A.....	49
Tabela 3: Métodos de interpolação e parâmetros dos atributos na Área B	51
Tabela 4: Métodos de interpolação e parâmetros dos atributos na Área C	53
Tabela 5: Médias mensais de Precipitação em Céu Azul.....	56
Tabela 6: Médias mensais de Precipitação em Serranópolis do Iguaçu.....	57
Tabela 7: Erosividade Anual ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$)	58
Tabela 8 : Classificação das taxas de erosão.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	EROSÃO	12
2.1.1	Fatores condicionantes da erosão	15
2.1.2	Medidas de controle da erosão.....	18
2.2	AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	20
2.2.1	Geostatística.....	22
2.2.2	Geoprocessamento.....	26
2.3	CONSERVAÇÃO DE PRECISÃO.....	28
2.3.1	Modelos preditivos de erosão	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS	36
3.2	COLETA e ANÁLISE DE AMOSTRAS DE SOLO.....	37
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	39
3.4	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	40
3.5	GEOPROCESSAMENTO DAS IMAGENS	40
3.6	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO.....	41
3.6.1	Erosividade	41
3.6.2	Erodibilidade	42
3.6.3	Fator Topográfico	43
3.6.4	Uso e manejo do solo	43
3.6.5	Práticas conservacionistas	45
3.7	Estimativa de perda de solo.....	45
4	RESULTADOS	47
4.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	47
4.2	ANÁLISE espacial DOS DADOS.....	48
4.3	PARÂMETROS PARA ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO.....	56
4.3.1	Erosividade	56
4.3.2	Erodibilidade (k)	59
4.3.3	Fator Topográfico	62
4.3.4	Uso e manejo do solo	67

4.3.5 Praticas conservacionistas	69
4.4 Estimativa de perda de solo.....	70
5 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma atividade econômica que consiste no uso dos solos para cultivo de vegetais a fim de garantir a subsistência alimentar do homem, bem como produzir matérias-primas para seu consumo e em função disso é um dos setores que tem se destacado nos últimos anos pelo uso de novas tecnologias em seu meio.

Com o aumento da população, a demanda por produtos vegetais tem aumentado e como em vários países praticamente não há a possibilidade de crescimento da área cultivada, a necessidade do aumento da produção está diretamente relacionada com a utilização intensiva de tecnologias e diferentes formas de manejo, mais adequadas e que possibilitam a redução dos impactos ambientais causados ao meio ambiente (SAATH; FACHINELLO, 2018).

Nesse sentido, diversos avanços tecnológicos vêm apresentando destaque no setor, tais como a agricultura de precisão (AP) que se mostra como uma prática essencial e ganha cada vez mais adeptos. A finalidade da AP é conhecer os diferentes fatores que influenciam na produtividade das culturas para aplicar um método de gerenciamento eficiente, que busque o máximo rendimento com o uso racional de insumos.

A degradação dos solos nas áreas agrícolas, em sua grande maioria, está associada à erosão hídrica, resultando em perdas de solo e conseqüentemente na redução da capacidade produtiva das áreas produtoras. Além disso, contribui para o assoreamento e redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios de água utilizados para geração de energia e abastecimento de grandes cidades (SCHULTZ, et al., 2014).

Projeções divulgadas pela Food Agricultural Organization (FAO) da ONU (Organização das Nações Unidas), afirmam que em 2050 a população mundial deve atingir nove bilhões de pessoas e, para alimentar essa população o mundo precisará aumentar a produção de alimentos em cerca de 70%. Neste sentido, para atingir estes patamares, será necessário expandir as terras agricultáveis no mundo, em cerca de 120 milhões de hectares nos próximos 40 anos (FAO, 2015).

Nesse contexto, frente à crescente perda de capacidade produtiva dos solos brasileiros ao longo de décadas de uso e manejo inadequados e necessidade crescente de produzir alimentos, a redução da erosão do solo torna-se um desafio à sustentabilidade da produção agrícola. Como a erosão é um fenômeno universal e está condicionada por diversos fatores ambientais e antrópicos, reconhece-se a necessidade de se fazer estimativas locais ou regionais

para que sejam tomadas providências compatíveis com os objetivos de sustentabilidade da agricultura (MARQUES; PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2005).

Existem vários métodos de pesquisas para se estudar e avaliar as ocorrências e consequências do processo de erosão, sendo a modelagem uma importante ferramenta no desenvolvimento de avaliações confiáveis de predições de perdas de solo e, ainda, para o planejamento de medidas de controle.

Apesar de resultados confiáveis, a modelagem do processo erosivo é complexa e a maioria dos métodos não leva em consideração a variabilidade espacial dos fatores que influenciam a erosão. Visando implementar práticas de manejo conservacionista que levem em consideração aspectos espaciais e variabilidade entre sistemas naturais e agrícolas Berry et al. (2003) desenvolveu o conceito de conservação de precisão.

Esse conceito usa informações sobre fluxos de superfície e subterrâneos para analisar sistemas, a fim de tomar decisões viáveis para a aplicação da gestão de práticas que contribuem para a conservação de áreas agrícolas, pastagens e áreas naturais (DELGADO; BERRY, 2008).

Assim o presente trabalho tem como objetivo geral estimar a perda de solo por erosão laminar por meio de modelos de previsão quantitativo em solos trabalhados em agricultura de precisão. Além disso, como objetivo específico espera-se identificar como os atributos analisados variam espacialmente e influenciam no processo de erosão e avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta para o planejamento de medidas de controle da erosão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 EROSÃO

O termo “erosão” vem do latim “erodere” que significa desgaste, que de forma geral pode ser definido como um conjunto de processos pelos quais os materiais terrosos e rochosos da crosta terrestre são desagregados e transportados pela ação dos agentes erosivos (IPT, 1986).

Um conceito mais recente é dado por Rubira, Melo e Oliveira (2016), em que a erosão é definida como um processo mecânico que age em superfície e profundidade, em certos tipos de solo e sob determinadas condições físicas, traduzindo-se na desagregação, transporte e deposição de partículas do solo.

Segundo Goulart et al. (2016) a erosão se configura como um processo de modelação da paisagem, viabilizado por meio da ação de agentes erosivos fundamentais, como a água e o vento, associados a outros condicionantes como a gravidade, as mudanças de temperatura, a taxa de umidade do solo e atmosfera e os fatores bióticos.

Independente do agente erosivo, o processo da erosão pode ser classificado quanto a sua natureza, em dois tipos: geológico (natural) ou antrópico (acelerado). O processo natural é aquele que ocorre ao longo do tempo geológico essencial para a formação do solo e embora ocorra de forma lenta e contínua, o ser humano, a fim de atender suas necessidades, tem provocado modificações que agravam e aceleram esse processo. Assim a erosão acelerada é o aumento da taxa de erosão em decorrência da quebra de equilíbrio do meio ambiente induzido pela intervenção do homem (FENDRICH, 1997).

Segundo Shultz et al. (2014), quando a água escoar, em geral, remove a camada mais rica em nutrientes e matéria orgânica do solo. De acordo com Ferreira et al. (2010) a erosão é a principal causa da diminuição da fertilidade do solo e, conseqüentemente, da produção agrícola, pois afeta diretamente a qualidade do solo, sua produtividade e sua diversidade biológica.

Além disso, Pereira, Ferreira e Cruz (1994) apontam uma estreita correlação entre causas e efeitos da erosão. Para eles, enquanto a produção vegetal é afetada por esse processo, a baixa da produtividade contribui para a erosão, fechando um ciclo extremamente prejudicial

à preservação ambiental, ou seja, ao mesmo tempo em que a erosão diminui a produtividade do solo, ela também agrava o processo de degradação do solo, deixando-o mais suscetível.

A redução de nutrientes, causado pela erosão do solo, tem causado problemas ambientais com relação a aplicação excessiva de fertilizantes necessários para suprir a perda de nutrientes do solo, podendo contribuir à degradação do mesmo e para a contaminação do meio ambiente por via do seu arrastamento pelas águas de escoamento superficial, bem como nas águas de percolação (SHULTZ, et al.,2014). Alguns nutrientes são depositados em corpos hídricos causando eutrofização, que segundo Wiegand, Piedra e Araújo (2016) é o fenômeno pelo qual um ecossistema se torna cada vez mais produtivo pelo enriquecimento por nutrientes, principalmente pelo fósforo e nitrogênio, gerando-se o crescimento excessivo de macrófitas e algas planctônicas e conseqüentemente a depleção do oxigênio dissolvido, a redução do espelho d'água, a morte de plantas e animais aquáticos e a produção de toxinas por algas cianofíceas.

Outro aspecto citado por Maiato (2016) diz respeito a redução na capacidade de infiltração e de retenção de umidade do solo devido à compactação causada pelas gotas da chuva e contribui para o assoreamento de lagos e rios. Este fato, reduz a capacidade de uso da água para geração de energia e abastecimento, ocasionando também a elevação dos custos de tratamento de água, além de contribuir para o processo de eutrofização.

A erosão é considerada como a principal e mais generalizada forma de degradação do solo (MARTINS; FERNANDES, 2017). Na década de 1990 estudos já indicavam que 15% da superfície global estavam degradadas, com as maiores proporções na Europa, Ásia e África, sendo a erosão do solo responsável por 83% desse total (MIQUELONI; GIANELLO; BUENO, 2015).

Atualmente, as atividades antrópicas destacam-se como o fator principal no desenvolvimento dos processos erosivos. Segundo a FAO (2015) estima-se que 33% das terras possuem alto ou médio grau de degradação e que 0,3% da produção são perdidas anualmente devido à erosão.

No Brasil, a principal forma de erosão é a hídrica, desencadeada pela ação da água da chuva, por meio do impacto das gotas sobre o solo e seu escoamento na superfície (SILVA JUNIOR, 2014). De acordo com Mafra (2010) a erosão hídrica consiste basicamente numa série de transferências de energia e matérias geradas por um desequilíbrio do sistema água/solo/cobertura vegetal, as quais resultam numa perda progressiva do solo.

O processo erosivo causado pela água da chuva tem abrangência em quase toda a superfície terrestre, em especial em áreas de clima tropical onde a precipitação é maior.

Segundo Fendrich (1997), esse processo conhecido como erosão por splash ou por salpicamento, inicia-se com o embate das gotas de chuva com o chão, desagregando as partículas do solo desnudo e quebrando-os em tamanhos menores. De acordo com Guerra (1999), esse processo vai depender da resistência do solo ao impacto das gotas e da energia cinética delas, sendo que de acordo com a energia impactada vai ocorrer a ruptura dos agregados com maior ou menor facilidade.

As partículas desagregadas salpicam com as gotículas de chuva e retornam à superfície selando o solo. Esse processo diminui a porosidade e aumenta a densidade aparente do solo dando início a formação de crostas e acelerando o escoamento superficial. Outro fator importante a ser considerado é a umidade do solo, pois a medida que a umidade aumenta a resistência ao cisalhamento diminui e o solo pode atingir seu limite de liquidez e começar a fluir atuando como um elemento agregador (GUERRA, 1999).

Conforme aumenta a intensidade da chuva e esta passa a ser maior que a taxa de infiltração, começa também a haver acúmulo de água sobre a superfície do solo formando-se poças e iniciando-se a segunda fase do processo, que é o transporte das partículas, ou seja, o escoamento superficial (TÔSTO; PEREIRA; TÔSTO, 2013).

No início do escoamento, forma-se uma película laminar que aumenta de espessura à medida que a precipitação prossegue. Esse escoamento é conhecido como laminar e da origem a erosão laminar ou em lençol (GUERRA, 2012).

A erosão laminar caracteriza-se pelo desgaste laminar causado pelas enxurradas de forma suave e uniforme em toda sua extensão (FENDRICH, 1997). A força de cisalhamento imposta por esse fluxo ainda não é suficiente para transportar partículas, entretanto a medida que o fluxo aumenta e acelera, começa a ocorrer uma pequena incisão no solo (GUERRA, 1999).

O principal fator que provoca a erosão laminar é a velocidade do fluxo, pois é necessário quebrar a resistência do próprio solo para o fenômeno ocorrer (GUERRA, 2012). Segundo Fendrich (1997) é uma forma de erosão difícil de ser observada, entretanto sua ocorrência pode ser constatada pelo decréscimo de produção, tendo em vista que a matéria orgânica e as partículas de argila são as primeiras porções do solo a se despendarem e são as partes mais ricas em nutrientes para as plantas.

O estágio seguinte segundo Guerra (1999), é o desenvolvimento de fluxos lineares em canais ou erosão em sulcos. À medida que o fluxo se torna concentrado, a profundidade aumenta e a velocidade diminui devido ao aumento da rugosidade. Essa rugosidade faz com que haja um forte atrito entre as partículas e o fundo do canal aumentando a erosão. A partir

daí a água escoar por canais bem definidos, a turbulência dos fluxos aumenta e ocorre a formação de processos erosivos críticos como as ravinas e voçorocas.

Para Corrêa (2015) a diferenciação dos conceitos pode se apresentar com relação às dimensões da incisão, geometria da feição, afloramento do lençol freático e com o tipo de fluxo do escoamento. No entanto, as classificações mais utilizadas internacionalmente são aquelas relacionadas às dimensões das incisões erosivas.

Dessa forma, Lima (2003) aponta que a erosão em ravinas ocorre a partir do momento em que a velocidade do fluxo concentrado excede os 30 m/s e adquire um regime turbulento originando feições mais visíveis e permanentes no solo. Já a erosão em voçorocas possui características erosivas relativamente permanentes nas encostas, com paredes laterais íngremes e, em geral, fundo chato, ocorrendo fluxo de água no seu interior durante os eventos chuvosos.

Para Corrêa (2015), a erosão em voçoroca representa um estágio avançado da erosão em sulcos, ocorrendo em canais com dimensões relativamente grandes, onde a profundidade varia em função da espessura do substrato geológico intemperizado do perfil de solo e do volume de água concentrado que escoar sobre o leito da mesma. Com o aumento da turbulência, as partículas mais finas são transportadas em suspensão pelo fluxo, as menos leves permanecem por determinado tempo em suspensão e se depositam na superfície do solo sendo transportadas por arrasto até que um novo fluxo as coloque em suspensão. Por último, as partículas mais grossas e pesadas permanecem na superfície, deslizando ou rolando sobre o solo (FENDRICH, 1997).

A última fase do processo erosivo corresponde a deposição, que segundo Correa (2015), acontece quando o agente perde a sua força, ou seja, quando o fluxo encontra algum obstáculo que reduz sua velocidade ou quando o seu volume é reduzido.

2.1.1 Fatores condicionantes da erosão

A erosão é um fenômeno bastante complexo, uma vez que envolve a ação direta e/ou indireta de diversos fatores, tais como as características geológicas e geomorfológicas, os tipos de solos, clima, vegetação, além da interferência humana que modifica as condições naturais destas características (OLIVEIRA, SANTOS, ARAUJO, 2018). Dessa forma, é importante

abordar as relações dos principais fatores condicionantes da erosão, quais sejam: clima, cobertura vegetal, natureza do solo e a topografia do terreno.

A chuva é um elemento climático que exerce considerável influência na erosão hídrica do solo pois o impacto das gotas de chuva no solo constitui uma das contribuições da precipitação sobre a erosão do solo (LIMA, 2003). O índice que expressa a capacidade da chuva de provocar erosão é conhecido como erosividade e embora o conceito seja simples, a determinação do potencial erosivo é complexa pois depende de parâmetros de erosividade e das características das gotas de chuva que variam no tempo e espaço (GUERRA, 2012).

Segundo Guerra (2012) os parâmetros utilizados para investigar a erosividade correspondem ao volume total de chuva ocorrida, sua intensidade, o momento e a energia cinética ocorrida. Embora essas características sejam fundamentais no que se refere ao impacto das gotas da chuva no solo, a mais importante no fenômeno erosivo é a intensidade, seguida da duração, que é o seu complemento e que determina a chuva total (LIMA, 2003).

A intensidade está relacionada com a energia cinética da chuva que de acordo com Guerra (2012) é a energia do número total de gotas de um evento chuvoso e varia função da duração, massa e tamanho da gota e da velocidade.

Outra influência deste fator é obtida de forma indireta, por meio da análise de cobertura vegetal, visto que o clima corresponde a um fator decisivo para obtenção das características naturais, definindo o tipo de proteção oferecida ao solo (OLIVEIRA, SANTOS, ARAUJO, 2018).

Para Guerra (1999), a cobertura vegetal é a defesa natural do solo contra a erosão, sendo que além de proteger contra o impacto direto das gotas de chuva, a vegetação dispersa e quebra a energia das águas do escoamento superficial, aumenta a infiltração por ação das raízes e aumenta a capacidade de retenção de água pela estruturação do solo e incorporação de maneira orgânica (GUERRA, 1999). Guerra (2012) corrobora com tais considerações acrescentando que a matéria orgânica atua na agregação das partículas constituintes do solo e que as raízes ao se decomporem fornecem húmus aumentando a estabilidade dos agregados.

Outro componente importante no processo erosivo corresponde às propriedades do solo, pois juntamente com outros fatores pode afetar a erodibilidade, sendo definido como a vulnerabilidade ou suscetibilidade de um solo à erosão (GUERRA, 2012). A erodibilidade é determinada pelas propriedades intrínsecas do solo, que afetam a velocidade de infiltração da água, permeabilidade e a capacidade de absorção da água pelo solo; bem como por propriedades que conferem resistência à dispersão, ao salpicamento, à abrasão (COSTA, 2008).

De acordo com Guerra (2012), as principais propriedades que interferem na erodibilidade dos solos são textura, densidade aparente, porosidade, teor de matéria orgânica, teor e estabilidade dos agregados e o pH do solo.

A textura influi na capacidade de infiltração e de absorção da água da chuva, interferindo no potencial de enxurradas, e em relação a maior ou menor coesão entre as partículas (FENDRICH et al., 1999). De forma geral, solos argilosos tendem a ser mais resistentes à erosão do que solos arenosos e com maior capacidade de agregação das partículas (LIMA, 2003).

Igualmente a textura, a estrutura do solo influi na capacidade de infiltração e absorção da água e na capacidade de arraste das partículas do solo sendo definida como o modo como se arranjam as partículas de solo (FENDRICH, 1999). Para Lima (2003) a estrutura representa a condição de estabilidade dos agregados e exerce influência sobre as forças de dispersão, desagregação e destacamento das partículas pela água.

A textura e a estrutura das partículas associadas ao teor de matéria orgânica influenciam na estabilidade dos agregados pois permitem maior agregação e coesão entre as partículas, tornando o solo mais estável, mais poroso e com maior poder de retenção de água. O teor de matéria orgânica se relaciona com a densidade aparente, assim a medida que o teor de matéria orgânica diminui, aumenta a ruptura dos agregados, diminui a porosidade e conseqüentemente aumenta a compactação (GUERRA, 2012).

A densidade dos solos é outro fator que deve-se considerar nos processos erosivos pois refere-se a maior ou menor compactação do solo (GUERRA, 2012). Segundo Fendrich et al (1999) a densidade é a relação entre a massa total e o volume do solo e é inversamente proporcional à sua porosidade e permeabilidade, ou seja, a medida que a densidade aparente aumenta a porosidade diminui ocorrendo em consequência a redução da infiltração da água.

A topografia do terreno influencia na quantidade e na velocidade da enxurrada, pois é composta pelos elementos comprimento, inclinação e forma da encosta, que podem aumentar a velocidade de escoamento da água e carregar maior quantidade de partículas do solo (JENDRZIKOWSKI, 2018).

A inclinação dos terrenos é avaliada por meio da declividade das encostas por meio de cartas de declividade produzidas a partir de uma base cartográfica pré-existente ou de uma base cartográfica produzida especificamente para esta finalidade. Apesar das diferenças entre as classes definidas por diversos autores, a maioria deles concorda que declividades superiores a 10 ou 12% indicam condições de desenvolvimento de processos erosivos acelerados em áreas com solos potencialmente erodíveis (SENA, 2008).

Quanto ao comprimento de rampa da encosta, este pode ser definido como a distância, em superfície, entre os pontos de maior e menor cota do perfil longitudinal da encosta, é uma variável de grande importância na intensidade do processo erosivo (SENA, 2008). À medida que aumenta o comprimento de rampa, aumenta a velocidade adquirida pelas águas que escorrem, aumentando sua capacidade de transporte de partículas do solo e, conseqüentemente, a quantidade de terra arrastada pela erosão (LIMA, 2003).

Quanto à forma da encosta, as formas convexas apresentam dois fatores propícios à aceleração do escoamento: o crescimento das declividades locais em direção à base da encosta e a tendência de concentração do fluxo em determinadas direções. Já as formas côncavas tendem a apresentar redução dos valores locais de declividade em direção à base da encosta e concentração de fluxo em direção ao centro da base, definindo, assim, condições de fluxo menos danosas. De acordo com Lima (2003) nas vertentes côncavas o escoamento superficial é, em geral, maior a montante do que a jusante, e, no caso das vertentes convexas, o processo se inverte, ou seja, o escoamento é maior a jusante.

Além desses fatores naturais o homem e a forma como se usa o solo tem grande influência no processo erosivo e constitui o fator decisivo da aceleração dos processos erosivos. De acordo com Ridente Junior et al. (2002) entre as principais agressões causadas pela ação antrópica estão:

- Retirada da cobertura vegetal, seguida pela queimada;
- Agricultura praticada sem conservação do solo;
- Formação de pastos com alta densidade de animais, proporcionando um excessivo pisoteio em determinadas direções, formando trilhas e sulcos;
- Divisa de propriedades, de culturas perpendiculares às curvas de nível;
- Aberturas de estradas e carregadores sem o devido cuidado na execução de obras de drenagem para coletar e transportar águas pluviais; e
- Execução de loteamentos sem implantação da infraestrutura.

2.1.2 Medidas de controle da erosão

A primeira atividade para reduzir a erosão é a ocupação da área de acordo com a sua capacidade de uso, otimizando o seu aproveitamento. Neste contexto, as práticas de manejo

favoráveis ao controle da erosão são aquelas que melhoram a capacidade de infiltração da água no solo, diminuem o escoamento superficial, favorecem a formação de agregados e reduzem o impacto das gotas da chuva (ZONTA, 2012).

O controle da erosão em áreas rurais é bastante complexo por abranger questões de ordem técnica e socioeconômica, entretanto o uso do Sistema de Plantio Direto (SPD) tem se mostrado eficiente sendo aplicado em cerca de 75% da área cultivada com culturas anuais da região subtropical úmida do Brasil. Esse sistema é uma forma de manejo para exploração agropecuária, constituído de práticas que envolvem a rotação de culturas, mobilização de solo exclusiva na linha de semeadura e cobertura permanente (CASSOL; DENARDIN; KOCHHANN, 2007).

Segundo Zonta et al. (2012) neste sistema o plantio é realizado sem que haja aração ou gradagem prévia do solo, sendo a semente colocada no solo não revolvido e a semeadura realizada por semeadoras que abrem um pequeno sulco de profundidade e largura suficientes para garantir boa cobertura e contato da semente com o solo, permitindo sua germinação.

Como esse sistema mantém os resíduos vegetais sobre o solo e promove a mobilização mínima do solo e as perdas são reduzidas em média 68% em comparação ao sistema de preparo do solo convencional, enquanto as perdas de água são reduzidas em 27% se feita a mesma comparação (CECÍLIO; PRUSKI, 2004).

Apesar de ser considerada uma das técnicas mais eficazes, sua aplicação descomprometida com as técnicas para manejo de enxurradas, além de não controlar suficientemente a erosão hídrica, potencializa o transporte de agroquímicos e sedimentos enriquecidos em carbono e nutrientes aos mananciais (DENARDIN; KOCHHANN, 2009).

Outras técnicas também podem ser aplicadas ao controle dos processos erosivos e são classificadas como vegetativa, edáfica ou mecânica (SALOMÃO, 1999). Na técnica de caráter vegetativo utiliza-se a cobertura vegetal como critério básico de contenção de erosão. Já as práticas de caráter edáfico são aquelas que, com modificações no sistema de cultivo, além do controle da erosão, mantêm-se ou melhoram a fertilidade do solo. Por último as práticas de caráter mecânico são aquelas desenvolvidas artificialmente por meio de estruturas em canais e aterros com a finalidade de controlar o escoamento superficial.

2.2 AGRICULTURA DE PRECISÃO

A preocupação com o aumento no consumo mundial de alimentos associada aos impactos ambientais tem ganhado relevância em pesquisas científicas aplicadas no agronegócio. Diante disso a agricultura de precisão (AP) tem se destacado como uma ferramenta promissora na otimização da produção agrícola visando à sustentabilidade (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

A tecnologia de AP está fundamentada no fato de que as lavouras não serem uniformes e englobam o uso de tecnologias atuais para o manejo de solo, insumos e culturas, de modo a gerenciar os problemas advindos dessa desuniformidade (INAMASU; BERNARDI, 2014).

A AP é uma filosofia de gerenciamento agrícola que parte de informações exatas, precisas e se completa com decisões exatas, ou seja, uma maneira de gerir um campo produtivo metro a metro, levando em conta o fato de que cada pedaço da fazenda tem propriedades diferentes (NUNES, 2016).

A Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP) instituída pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) em 2012 definiu a AP como “um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente” (MAPA, 2012, p.6).

Esse sistema descreve um conjunto de ferramentas baseadas em tecnologias de informação que permitem aos agricultores monitorar as condições do solo e das culturas e analisar as opções de tratamento (AUBERT; SCHROEDER; GRIMAUDDO, 2012).

Para Shiratsuchi et al., (2014) a AP, por meio de abordagens científicas e modernas, combinadas com os conhecimentos tradicionais e tecnologias de informação para uma produção agrícola inteligente, oferece uma infinidade de benefícios potenciais em rentabilidade, produtividade, sustentabilidade, qualidade da cultura, proteção ambiental, qualidade de vida, segurança alimentar e desenvolvimento econômico rural.

Desde o início do século XX, existem relatos de trabalhos que mostram a utilidade de se gerenciar as lavouras de forma detalhada e localizada (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015). Segundo Inamasu e Bernardi (2014) o registro mais antigo na literatura é de 1929, num boletim do campo experimental de Illinois, onde Linsley e Bauer recomendavam ao produtor

desenhar um mapa com testes de acidez em solos amostrados em grade para aplicação de calcário.

Apesar de ser conhecida desde essa época ou até mesmo antes se considerar o conhecimento empírico dos agricultores que já gerenciavam suas propriedades com base na experiência, Molin, Amaral e Colaço (2015) citam que a adoção real de práticas dessa natureza remete aos anos 1980, quando foram gerados os primeiros mapas de produtividade na Europa e foram feitas as primeiras adubações com doses variadas de forma automatizada nos Estados Unidos.

Por sua vez, no Brasil, as primeiras atividades ligadas à AP, ocorreram em meados da década de 1990, com a importação de equipamentos, especialmente colhedoras equipadas com monitor de produtividade de grãos. Na década seguinte surgiram as primeiras máquinas aplicadoras brasileiras para taxas variáveis de granulados e pós (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Atualmente as técnicas associadas à AP despertam crescente interesse no meio científico e entre aqueles que se dedicam à atividade agropecuária no Brasil, destacando-se a utilização de amostragens georreferenciadas para mapeamento da fertilidade do solo e distribuição de corretivos e fertilizantes em taxa variável (INAMASU; BERNARDI, 2014).

Apesar disso segundo Resende et al. (2010) a prática da AP no Brasil deve estender-se, de forma integrada, a outros aspectos relacionados ao manejo e conservação de solos com destaque para a consideração das variações de relevo, do levantamento do solo nos ambientes de produção, da sua qualidade física e da qualidade químico-biológica associada à manutenção ou incremento da matéria orgânica e práticas culturais vinculadas.

A tecnologia de AP baseia-se na coleta de informações sobre produtividade, atributos químicos e físicos do solo, condições da cultura e do terreno, associando-as a sua localização, as quais podem ser expressas na forma de mapas digitais (KNOB, 2006). Para isso utiliza-se de diversas ferramentas associadas a esta tecnologia, dentre as quais destacam-se a geoestatística e o geoprocessamento.

2.2.1 Geoestatística

O termo “Geoestatística” surgiu para focar o estudo estatístico de um fenômeno natural, por sua vez, caracterizado pela distribuição no espaço de uma ou mais variáveis, denominadas "variáveis regionalizadas" (STURARO, 2015).

As primeiras publicações sobre geoestatística tiveram início na metade dos anos de 1900, com os trabalhos de “Geoestatística” de Kolmogorov (1941), as contribuições de Daniel Krige (1951) e De Wijs (1951; 1953), Matern (1960) e Matheron (1962; 1963; 1971), com a “Teoria das variáveis regionalizadas” (SILVA JUNIOR, 2014).

O engenheiro de minas sul-africano Daniel Krige (1951), trabalhando com dados de concentração de ouro, verificou que para encontrar sentido nas variâncias em estudo era preciso levar em conta as distâncias entre as amostras. Matheron (1965) colocou esta ideia em termos matemáticos e desenvolveu a geoestatística ou teoria das variáveis regionalizadas (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2015).

Essa ferramenta ganhou impulso em áreas distintas da mineração e da geologia a partir de 1980, com grande aplicabilidade na ciência do solo. No Brasil destacam-se trabalhos pioneiros nesta área desenvolvidos pelos pesquisadores Sidney Rosa Vieira, Paulo Libardi e Klaus Reichardt (GUIMARÃES, 2004).

A geoestatística é um ramo da estatística que utiliza conceito de variáveis regionalizadas na avaliação de variabilidade espacial e não se limita apenas em obter um modelo de dependência espacial, pois permite também estimar valores de pontos nos locais onde não foram coletados (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2015).

A aplicação do objeto da geoestatística na AP tem por objetivo caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo e das culturas e estimar as inter-relações desses atributos no espaço e no tempo (BERNARDI, 2015). Dessa forma, um fator primordial para aplicação da geoestatística é a obtenção de dados com as correspondentes coordenadas geográficas. Os dados georreferenciados podem ser obtidos por meio de coleta in loco, mapas temáticos, imagens de satélite ou fotografias aéreas coletadas (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2015).

Com os dados coletados, Sturaro (2015) aponta que antes de qualquer análise mais detalhada, de um fenômeno natural, é necessário um conhecimento das características da população, através da estatística clássica. Grego, Oliveira e Vieira (2015) acrescentam que esse

processo é de suma importância e tem o objetivo de identificar previamente os dados discrepantes, a normalidade de distribuição de frequência e a variação nos dados.

Diferente da estatística clássica, a geoestatística permite separar a variabilidade explicada pela relação existente entre amostras e a variabilidade casual, além disso, com a análise geoestatística é possível organizar os dados disponíveis espacialmente de acordo com a semelhança entre vizinhos georreferenciados por meio do semivariograma, um gráfico das semivariâncias das diferenças dos valores experimentais situados a intervalos regulares (STURARO, 2015).

O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre as amostras dentro de um campo experimental e é o primeiro passo para a descrição quantitativa da variação regionalizada. Ele fornece informações úteis para a interpolação, otimização amostral e determinação do padrão espacial e seus parâmetros, alcance (a), efeito pepita (C_0), contribuição (C_1) e patamar (C_0+C_1) caracterizam os três elementos mais importantes do modelo de variabilidade de uma variável (SILVA JUNIOR, 2014). A Figura 1 representa os parâmetros do semivariograma./

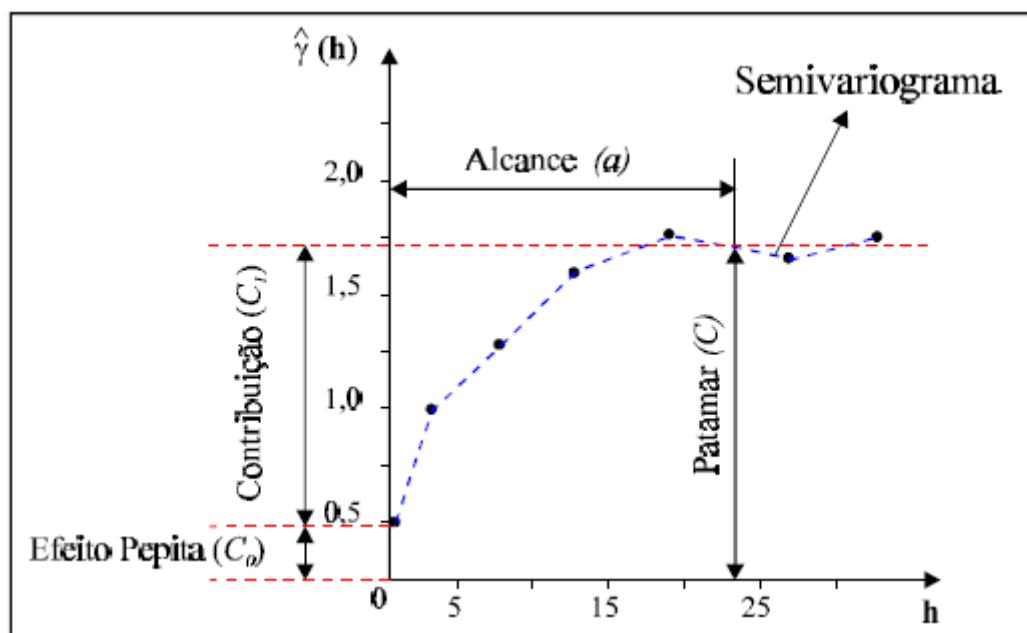


Figura 1: Parâmetros do semivariograma

Fonte: Camargo e Fuks (2001).

O efeito pepita (C_0) é o valor da variabilidade (h) para a distância igual a zero, em teoria este valor deveria ser nulo, entretanto devido a vários fatores como erros de amostragens,

espaçamentos irregulares, erros de medidas ou ainda micro regionalizações da variável em análise, causam uma descontinuidade na origem do semivariograma (GUIMARÃES, 2004).

A contribuição (C_1), também conhecida como variância da dispersão, representa as diferenças espaciais entre os valores de C_0 e o patamar, intervalo esse no qual o semivariograma cresce, havendo dependência espacial (BETZEK, 2017).

O patamar ($C_0 + C_1$) representa o nível de variabilidade onde o semivariograma se estabiliza e é um parâmetro importante, pois permite a determinação da distância limite entre dependência e independência entre as amostras. Em teoria este patamar deve ser igual à variância total dos dados (SILVA JUNIOR, 2014).

O alcance (a) também conhecido como amplitude semivariográfica é a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes, ou seja, a partir da qual a variação média entre duas observações não é mais função da distância entre elas, dando lugar a independência, sem correlações espaciais. O alcance reflete o grau de homogeneização entre as amostras, ou seja, quanto maior for o seu valor, mais homogêneo será o fenômeno ou processo estudado (GUIMARÃES, 2004).

Após a definição das semivariâncias dos valores experimentais, procura-se ajustar um modelo matemático que represente o mais próximo possível a configuração dos mesmos (STURARO, 2015). O ajuste de modelo ao semivariograma é um dos aspectos mais importantes das aplicações da geoestatística porque os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2015).

Dentre os modelos mais usuais pode-se citar o modelo esférico, modelo exponencial, modelo Gaussiano, modelo linear (para semivariogramas sem patamar), modelo logarítmico, entre outros. Após um modelo variográfico que caracterize a continuidade das variáveis em função das distâncias, pode-se calcular o erro cometido na estimação para um certo domínio (bloco, ponto), a partir de amostras situadas numa vizinhança reconhecida como estacionária (STURARO, 2015).

Havendo comprovadamente dependência espacial para a variável em estudo, por meio do ajuste de semivariograma, pode-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2015).

A krigagem é um método interpolador e leva em consideração as características espaciais de auto correlação de variáveis regionalizadas. As variáveis regionalizadas geralmente apresentam certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por

amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido.

Uma das vantagens primordiais da krigagem está relacionada a eliminação, em média, dos erros de excesso devido a ponderação das amostras aumentando a precisão. O método leva em consideração o número de amostras utilizadas; as posições das amostras na área a ser avaliada; as distâncias entre as amostras e a zona a ser estimada e a continuidade espacial da variável em estudo.

Após a interpolação por krigagem, os resultados são submetidos a espacialização resultando em mapas de isolinhas, geralmente em ambientes de sistema de informação geográfica, onde outras bases podem ser visualizadas e agrupadas (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2015).

A estimativa por krigagem é reconhecida como sendo uma das melhores estimativas lineares e não tendenciosa, mas para isso é necessário que o semivariograma tenha sido elaborado adequadamente.

A utilização dos métodos geoestatísticos é essencial para um melhor entendimento das inter-relações entre atributos do solo e o seu manejo (LIMA et al., 2015) e pode ser aplicada à compreensão de diversos fenômenos. Uma das características que podem ser analisado por meio da geoestatística é a resistência a penetração do solo, um indicador da compactação do solo que influencia na infiltração da água e conseqüentemente contribui para a formação de erosão.

Corado Neto et al. (2015) desenvolveram um estudo que avaliou a variabilidade espacial da resistência à penetração em período seco e chuvoso numa área de 4 ha. No trabalho ele realizou 79 amostragens para coleta dos dados obedecendo critérios pré-estabelecidos, os dados foram submetidos a análise estatística e geoestatística e evidenciaram moderada dependência espacial da penetração do solo. Outro estudo desenvolvido por Marasca et al. (2017) analisou a aplicação de geoestatística na determinação da compactação do solo e concluiu que a ferramenta teve uma resposta satisfatória.

A avaliação dos outros atributos também auxilia no estudo do comportamento do solo em áreas degradadas e em recuperação. Dentre estes atributos Oliveira et al. (2013) destaca a textura, a qual possui interferência direta nas demais propriedades físicas do solo, como na estrutura, distribuição de tamanhos de poros, compactação e adensamento, selamento superficial, escoamento superficial, drenagem e processo de infiltração.

Lima et al. (2015) afirmaram que estudos de variabilidade espacial permitem obter uma melhor análise para tomada de decisões e resoluções das referidas problemáticas e em seu

estudo avaliou a variabilidade espacial da infiltração de água no solo, densidade do solo e textura em área de encosta sobre processo de degradação. Para o trabalho foram coletadas 98 amostras (49 pontos nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm) e então analisados geoestatisticamente por meio da análise semivariográfica, interpolação dos dados por krigagem e construção de mapas de isolinhas. Todos os atributos físicos analisados apresentaram dependência espacial.

2.2.2 Geoprocessamento

O geoprocessamento é entendido por Rosa (2013, p. 59) como “o conjunto de tecnologias destinadas a coleta e tratamento de informações espaciais, assim como o desenvolvimento de novos sistemas e aplicações, com diferentes níveis de sofisticação” e tem permitido um melhor gerenciamento de grandes áreas com rapidez precisão e a custos bem mais baixos quando comparados a levantamentos realizados em campo.

Tendo em vista que a AP objetiva um gerenciamento mais detalhado do sistema de produção agrícola como um todo, é necessário a análise de um volume grande de informações que variam no espaço e no tempo. Neste sentido, o geoprocessamento tem sido de grande importância.

Os dados utilizados em AP apresentam, além da informação em si, as coordenadas geográficas que permitem identificar o local onde o dado foi coletado. A visualização desses dados exige o uso de programas apropriados, conhecidos como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que englobam, além da visualização das informações, a organização, armazenamento e processamento dos dados (TREVISAN; MOLIN, 2014).

Segundo Câmara e Medeiros (2003) os SIGs permitem a realização de análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e criar bancos de dados georreferenciados. Essa integração de dados e informações permite que se obtenha diversos resultados de interesse com uma elevada exatidão do produto final e grande economia de tempo em relação aos métodos de análise tradicionais.

Além dos SIGs outra ferramenta importante para o geoprocessamento é o sensoriamento remoto, definido, de uma maneira ampla, como sendo a forma de obter informações de um objeto ou alvo, sem que haja contato físico com o mesmo (ROSA, 2013).

Uma definição mais científica é dada por Meneses e Almeida (2012, p. 3) onde “Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres”.

Segundo Rosa (2013) os dados obtidos pelo sensoriamento remoto podem ser agrupados em quatro domínios ou resoluções:

- Resolução temporal: relacionada à repetitividade que o sistema sensor possui na obtenção de informações dos alvos.
- Resolução radiométrica: relacionada a maior ou menor capacidade de um sistema sensor em detectar e registrar diferenças de refletância e/ou emitância dos elementos da paisagem (rocha, solo, água, vegetação etc.).
- Resolução espectral: refere-se a melhor ou pior caracterização dos alvos em função da largura espectral e/ou número de bandas em que opera o sistema sensor.
- Resolução espacial: definida como sendo a mínima distância entre dois objetos (alvos) na qual um sensor pode registrá-los como sendo objetos distintos.

De acordo com Pereira, Silva e Pamboukian (2016) os sensores remotos funcionam como “máquinas fotográficas digitais”, que captam e registram em forma de imagem a energia refletida ou emitida pelos elementos da superfície terrestre. A forma de transmissão dos dados, do objeto para o sensor, é por meio da Radiação Eletromagnética (REM) em diferentes comprimentos de onda, representados no espectro eletromagnético por bandas ou regiões.

O comportamento espectral de um alvo pode ser definido como sendo a medida da refletância deste alvo ao longo do espectro eletromagnético, dessa forma o comportamento espectral do solo depende diretamente de sua composição química, física, biológica e mineralógica, sendo afetados principalmente pela matéria orgânica e os óxidos de ferro. A mineralogia da fração argila, tamanho de partículas e a rugosidade, além da umidade do solo, também são importantes neste processo (DALMOLIN et al., 2005).

Da mesma maneira a medida da refletância espectral da vegetação também depende de uma série de fatores como a espécie, solo (granulometria, água, nutrientes), índice de área foliar (cobertura da vegetação por unidade de área), estado fenológico (variação sazonal), biomassa (densidade total de vegetação), folha (forma, posição, água, pigmentação, estrutura interna etc.), geometria de medida, tipo de sistema sensor e cobertura da copa (ROSA, 2013).

Os produtos do SR são utilizados para diferentes finalidades, nas quais se destacam estudos sobre vegetação, por meio dos Índices de Vegetação (IV). Há uma variedade de índices

de vegetação que têm sido desenvolvidos para auxiliar no monitoramento da vegetação, entretanto o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (Equação 1) é o mais comumente empregado e utiliza os valores de reflectância na faixa do vermelho (R - Red) e infravermelho próximo (NIR) (PEREIRA; SILVA; PAMBOUKIAN, 2016).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Os valores do NDVI variam de -1 a 1, onde valores próximos de 1 são para vegetação verde, o solo nu é representado com valores próximos de 0 e os corpos de água são representados com valores negativos (KARABURN, 2010).

2.3 CONSERVAÇÃO DE PRECISÃO

A conservação de precisão (CP) corresponde a “um conjunto de tecnologias e procedimentos espaciais ligados a variáveis mapeadas direcionadas para implementar práticas de manejo conservacionista que levam em consideração a variabilidade espacial e temporal entre sistemas naturais e agrícolas” (BERRY et al. 2003).

Para Berry et al. (2005) a CP integra modernos receptores GPS para estabelecer posições na superfície da terra dentro de alguns metros ou mesmo centímetros para monitorar as características e condições da paisagem, a fim de realizar avaliações de risco e desenvolver melhor cenários de gestão. Esse conceito ajuda a implementar práticas de conservação por meio da análise das relações dentro e entre os dados mapeados por três abordagens amplas: modelagem de superfície, mineração de dados espaciais e análise de mapas.

Segundo Delgado e Berry (2008) a CP é uma ciência chave que contribuirá para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas intensivos, ajudando a analisar relações temporais para uma melhor compreensão das práticas agrícolas e sistemas naturais.

Ao contrário da AP, que foi orientada para maximizar os rendimentos em campos agrícolas, a CP tem como objetivo utilizar informações sobre fluxos de superfície e subterrâneos para analisar sistemas, a fim de tomar as melhores decisões para a aplicação da gestão práticas que contribuem para a conservação de áreas agrícolas, pastagens e áreas naturais (DELGADO; BERRY, 2008).

Nesse sentido, Berry et al. (2003, 2005) apresentaram exemplos de como fazer uso de mapas para avaliar os fluxos variáveis potenciais de campo para áreas naturais. Eles fizeram uso de um software para avaliar o fluxo variável ao longo da paisagem e criar um mapa de erosão potencial sobreposto a um mapa topográfico. O mapa mostrou os locais onde os fluxos se originam e também mostrou as áreas com maior confluência de água, identificando os locais do campo que podem ter maior potencial para o escoamento concentrado.

Schumacher et al. (2005) relataram que a avaliação espacial de erosão o desenvolvimento de mapas a partir dos dados resultantes pode ser útil para identificar áreas altamente sensíveis dos campos. Eles recomendaram que esses mapas poderiam ser utilizados para desenvolver práticas de conservação específicas, incluindo culturas de cobertura, adições de matéria orgânica e plantio direto para as áreas específicas do local que têm taxas mais elevadas de oferta.

Kitchen et al. (2005) descreveram uma abordagem baseada em consenso para implementar um sistema de AP em um campo que tinha 11 anos de coleta de dados específica para pré-implementação. Eles montaram um grupo de pesquisadores que avaliou a rentabilidade espacial, a qualidade da água e do solo para o campo de pesquisa.

Berry et al. (2005) relatou em seu estudo, outros trabalhos com aplicações para a CP, dentre eles o co-gerenciamento de carbono e nitrogênio (Pennock; 2005), como caracterizar a variabilidade espacial potencial da zona de gestão pode reduzir Lixiviação de $\text{NO}^3\text{-N}$ (Goddard; 2005), avaliação dos efeitos de melhores práticas de gestão (BMPs) na lixiviação de $\text{NO}^3\text{-N}$, incluindo a variabilidade entre os campos (Delgado; 2001). Além disso, citou estudos que utilizaram a conservação de precisão para avaliar os cenários de nutrientes ou erosão como Lindstrom et al. (1990) e Govers et al. (1994), Papiernik et al. (2005), Terra et al. (2005); Mueller et al. (2005), Dosskey et al. (2005) e Sadler et al. (2005).

Trabalhos mais recentes também abordaram a temática, Mcconnerr e Burger (2011) desenvolveram uma ferramenta de apoio à decisão geoespacial que demonstra as condições sob as quais a implementação de práticas de conservação de precisão pode aumentar concomitantemente a rentabilidade em todo o campo e os serviços ambientais.

Tomer et al. (2013) defende que a tecnologia na CP ajuda a gerenciar solos agrícolas e poderia fornecer a base para desenvolvimento de estratégias específicas para melhorar as condições ambientais e produção agrícola com eficiência e flexibilidade em bacias hidrográficas.

2.3.1 Modelos preditivos de erosão

Entre as perspectivas de estudo da erosão do solo que levam em consideração a análise espacial do fenômeno, está a avaliação preditiva como forma de subsidiar o planejamento do uso da terra, bem como definir as medidas de conservação (LIMA, 2003).

Inicialmente as pesquisas realizadas para compreender os processos erosivos eram baseadas no estudo da erosão laminar e da erosão em sulcos e limitavam-se ao entendimento e a descrição qualitativa dos principais fatores que afetavam o processo erosivo (CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014). Segundo Checchia (2005) alguns dos trabalhos desenvolvidos nesse período são de COOK (1936), LAWS (1940) e ELLISON (1947).

A medida que os estudos foram se aperfeiçoando a noção de complexidade desse fenômeno se tornou mais evidente, sendo que desde meados da década de 50, os estudos de erosão têm sido subsidiados por modelos de predição que possibilitam a previsão e quantificação das perdas de solo (CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014).

Segundo Galdino (2017), os modelos matemáticos de predição de erosão são ferramentas de pesquisa que possibilitam subsidiar a recomendação de tipos de uso das terras agrícolas sob o aspecto conservacionista do solo, auxiliando, assim, programas voltados ao planejamento do uso dessas terras.

Ao longo das últimas três décadas, vários modelos de erosão com níveis variados de complexidade foram desenvolvidos para abordar uma ampla gama de questões ambientais e compreender o comportamento dos sistemas terrestres e hídricos sob as condições prevalentes e projetadas de uso da terra e clima (ASCOUGH, et al., 2017).

Dentre os diversos modelos desenvolvidos destacam-se a USLE (Universal Soil Loss Equation) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), o WEPP (Water Erosin Prediction Project) e a RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) desenvolvidos pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em parceria com outras instituições a partir da década de 1980 (CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014).

A USLE é o modelo mais conhecido no Brasil e foi primeiramente usada em trabalhos desenvolvidos por BERTONI et al. (1975) no Estado de São Paulo e vem, desde então, sendo avaliada por vários autores quanto à sua aplicabilidade em nossas características tropicais (CHECCHIA, 2005).

O modelo foi desenvolvido para estimar perdas de solo com o objetivo de orientar práticas conservacionistas e prediz em médio e longo prazo a perda média anual associada a erosão hídrica por meio da Equação 2.

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (2)$$

em que, R corresponde a erosividade da chuva; K corresponde a erodibilidade do solo; L expressa os efeitos do comprimento da rampa; S é a declividade do terreno; C refere-se ao uso do solo; e P as práticas conservacionistas.

A erosividade expressa a capacidade da chuva de causar erosão em área sem proteção e foi definida por Wischmeier (1959) como o produto da energia cinética de determinada chuva (E_c) pela sua máxima intensidade em 30 minutos (I_{30}), entretanto, a obtenção de registros pluviográficos que registram a intensidade da chuva são escassos ou em muitas das vezes inexistentes em várias localidades, impossibilitando por este meio o acesso aos dados de intensidade das chuvas (MACHADO et al. 2014).

Para suprir essa necessidade, vários autores criaram métodos para mensurar a erosividade das chuvas levando em consideração condições climáticas de cada região estudada. Dentre eles destaca-se Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), que, com base em dados pluviométricos de 22 anos, desenvolveram a Equação 3 para encontrar o fator R com base na precipitação média mensal e a média anual, onde se obteve um alto grau no coeficiente de determinação, validando o método:

$$EI = 67,355 \left(\frac{r^2}{P} \right)^{0,85} \quad (3)$$

em que, EI - é a média mensal do índice de erosão; r - corresponde precipitação média mensal (mm); e P é a precipitação média anual (mm).

Já a erodibilidade (K) é um valor quantitativo determinado experimentalmente para um solo em particular, como sendo a taxa de perda de solo por unidade do índice de erosão conforme medido em parcela unitária padrão (22 m de comprimento; 0,09 m.m⁻¹ de declividade; sem cobertura, arado morro abaixo) (SILVA et al., 2016).

Esse método é caro, oneroso e envolve medidas de campo, sob chuva natural por longos períodos. Dessa forma desenvolveu-se métodos indiretos que envolvem a aplicação de

equações ou modelos que utilizam atributos simples do solo como variáveis independentes, para predição do fator.

Um método indireto consagrado na determinação da erodibilidade é o método proposto por Wischmeier et al. (1971), com base nos parâmetros textura, estrutura, classes de permeabilidade e na porcentagem de matéria orgânica, combinando-os graficamente em um monograma. No Brasil esse método foi avaliado em diversas regiões e alguns pesquisadores observaram a inadequação para latossolos (CORRECHEL, 2003).

Para Lima et al. (1990) os índices de erodibilidade com base nos resultados de granulométrica geralmente superestimam a resistência dos latossolos à erosão, assim eles propuseram modificação ao método no monograma onde a porcentagem de partículas e/ou agregados menores do que 0,1mm dispersos em água substitui a porcentagem de silte mais areia muito fina do método do nomograma original, e a porcentagem de partículas e/ou agregados maiores que 0,1mm, também dispersos em água, substitui a porcentagem de areia correspondente (>0,1mm). Os demais parâmetros são os mesmos do nomograma original (SILVA et al, 2016). A Equação 4 representa o método do monograma modificado.

$$k = 1,451 \cdot 10^{-10} Ma^{1,14} (120 - MO) + 0,0043(S - 2) + 0,0033(P - 2) \quad (4)$$

em que, K - é a Erodibilidade do solo ($Mg \ h \ Mj^{-1}$); MO - corresponde ao teor de matéria orgânica, expresso em gKg^{-1} ; Ma - é a Soma dos teores de silte e areia muito fina, expressos em gKg^{-1} , multiplicado por 1000, menos o teor de argila expresso em gKg^{-1} ; S - corresponde a estrutura que foi codificada em: muito pequena granular = 1; pequena granular = 2; média a grande granular = 3; e blocos, laminar ou maciça = 4; P - referente a permeabilidade foi codificada em: rápida = 1; moderada a rápida = 2; moderada = 3; lenta a moderada = 4; e lenta = 5.

No Brasil uma das primeiras metodologias relativas ao critério de erodibilidade de solos é o modelo desenvolvido por Denardin (1990) que estimou a erodibilidade dos solos a partir de seus parâmetros físicos e químicos, utilizando dados de erodibilidade de trinta e um perfis de solo do Brasil e quarenta e seis perfis de solo dos Estados Unidos, determinados no campo sob chuva natural e/ou simulada. Sua equação é apresentada na Equação 5.

$$K = 7,48 \cdot 10^{-6} X1 + 0,00448059 X2 - 0,0631175 X3 + 0,01039567 X4 \quad (5)$$

em que, K – corresponde a Erodibilidade do solo; $X1 = [(novo\ silte + nova\ areia) * novo\ silte]$, onde novo silte é a soma do silte e areia muito fina e nova areia é a soma da areia muito grossa, areia grossa, areia média e areia fina; X2 – é a classe de permeabilidade do solo; X3 – corresponde ao diâmetro médio da partícula calculado segundo a expressão: $DMP = \sum(C_i P_i)$, em que C_i é centro da classe textural i e P_i é a proporção de ocorrência da classe textural i; $X4 = (MO \% * Nova\ Areia)/100$, sendo MO % o valor da matéria orgânica em porcentagem.

Outra metodologia bastante difundida tem sido a de Bouyoucos (1935) apresentada por Manningel et al. (2002). A sua aplicação é baseada em uma simples relação entre os componentes granulométricos do solo dada pela Equação 6.

$$\text{Fator K} = ((\% \text{ areia} + \% \text{ silte}) / (\% \text{ argila}))/100 \quad (6)$$

em que, K é a erodibilidade; % areia representa a fração de areia; % silte representa a fração de silte; e % argila representa a fração de argila.

Na proposição da USLE (Equação 2) o produto dos fatores erosividade (R) e erodibilidade (K) expressa a perda de solo por unidade de área mantida na condição padrão enquanto os demais fatores (L, S, C, P), entram na equação apenas para corrigir o valor de perda de solo para uma condição diferente daquela considerada como padrão.

O fator L expressa os efeitos do comprimento de rampa e procura exprimir os efeitos do escoamento superficial a partir do seu início até que atinja um curso hídrico ou se inicie a deposição de sedimentos, enquanto o fator S expressa os efeitos do gradiente de inclinação (ou declividade) do terreno, fornecendo informações quanto a sua uniformidade. Apesar de serem calculados separadamente na prática esses valores representam com um único fator, o fator topográfico, definido como a taxa e perda de solo por unidade de área de uma parcela padrão de 22,13 m de comprimento e 9% de declive (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012)

Por sua vez o fator uso e ocupação do solo (C) segundo Rodrigues et al. (2017) representa a relação entre a perda de solo ocorrida em uma área coberta e sob um manejo em particular e a perda ocorrida em uma área equivalente, considerando o mesmo tipo de solo, declive e erosividade da chuva, porém, com o solo continuamente descoberto. De acordo com Eduardo (2012) o fator C pode ser obtido pelo somatório dos produtos da razão de perdas de solo (RPS) pela fração do índice de erosividade (FEI30) de cada fase do desenvolvimento da cultura, onde a RSP é a razão entre a perda de solo ocorrida em um determinado sistema de manejo e a perda ocorrida num solo descoberto a FEI30 a porcentagem do índice de erosividade que produziu essa perda.

O fator C varia de 0 a 1, onde valores próximos de 1 representam áreas com cobertura vegetal quase nula, e, portanto, mais vulneráveis à erosão hídrica, entretanto tem se constituído um parâmetro de complexa determinação por requerer de vários experimentos de campo. Para contornar essa dificuldade muitos estudos têm utilizado os valores experimentais estabelecidos por Bertoni e Lombardi Neto (1990) e Stein et al. (1897) que conseguiram quantificar as perdas de solo em função dos diferentes fatores de uso e manejo do solo.

O fator de práticas conservacionistas (P) representa à relação entre a perda de solo em uma área sob dada prática de suporte e a perda de solo em uma área equivalente, sem nenhuma prática (AMARAL, 2006). O valor P de forma geral, também é menor ou igual a 1, uma vez que a não utilização de práticas conservacionistas refletem, na maioria das vezes, uma condição de uso do solo que causa as maiores perdas possíveis, sendo que qualquer outra forma de utilização pode acarretar em menores perdas.

Apesar da USLE ser usada em vários trabalhos, exigir um número de informações relativamente pequeno quando comparado aos modelos mais complexos e ser considerada um bom instrumento para previsão das perdas de solo a equação possui algumas limitações (CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014), tendo em vista que não considera, de forma individualizada, os processos físicos envolvidos na erosão do solo, como o desprendimento e transporte das partículas do solo sendo discriminadas apenas as significâncias dos diferentes fatores que regem o processo erosivo.

A USLE também não considera os processos de deposição nos sopés das encostas e não incorpora o processo de erosão em voçorocas. Esses fatos são responsáveis por subestimativas de perda de solo pelo modelo, quando ocorrem processos como o de voçorocamento em uma região (VALENTIN, 2008).

Da mesma forma que a USLE os demais modelos desenvolvidos também possuem limitações e não levam em consideração a presença de estrutura de dependência espacial entre os fatores de erosão (SILVA JUNIOR, 2014).

Tendo em vista a necessidade e a importância de conhecer os processos erosivos Silva Junior (2014) cita os métodos geoestatísticos como promissores para o desenvolvimento de novos conceitos e/ou tecnologias dentro das relações solo-paisagem e para os processos de erosão e aponta que o uso das informações da variabilidade espacial de atributos do solo e de sua relação com a produtividade é essencial para se conhecer as causas da variabilidade espacial, e assim explicar melhor as relações de causa e efeito, podendo ser pontos-chave na inclusão de modelos de predição.

Martins Filho et al. (2009) corrobora afirmando que a modelagem espacial do processo de erosão é uma importante ferramenta no desenvolvimento de avaliações confiáveis de predições de perdas de solo, pois através da continuidade espacial de perdas de solos por erosão, é possível saber onde aplicar técnicas de controle com precisão, o que possibilita subsidiar a recomendação de tipos de uso das terras agrícolas sob o aspecto conservacionista do solo, permitindo um melhor aproveitamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS

O estudo foi realizado em três áreas agrícolas comerciais localizadas nos municípios de Céu Azul e Serranópolis do Iguaçu na região oeste do estado do Paraná – Brasil conforme Figura 2.

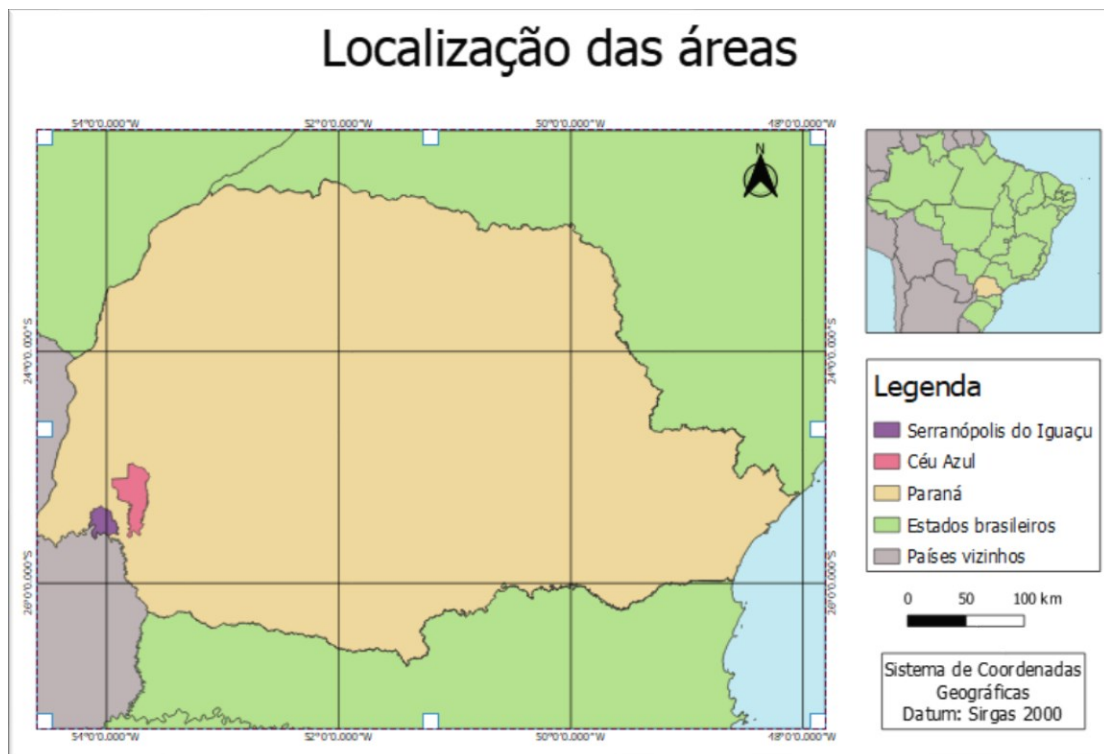


Figura 2:Localização das áreas

Fonte: Autoria própria.

A área A possui 15,5 ha e está localizada no município de Céu Azul com coordenadas geográficas centrais de 25°06'32"S e 53°49'55"O. Os solos da área A foram classificados como Latossolo Vermelho Distroférrico típico (EMBRAPA, 2013) e cultivados em sistema de plantio direto há mais de 14 anos com sequência de culturas soja, trigo, milho e aveia.

As áreas B e C possuem 9,9 ha e 23,8 ha respectivamente e estão localizadas no município de Serranópolis do Iguaçu (PR), localizado na latitude 25°24'28" S e longitude

54°00'17" W. O solo também é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico argiloso (EMBRAPA, 2006), e vêm sendo manejado com a sucessão das culturas do milho e soja sob sistema de plantio direto, a pelo menos 10 anos.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, pode ser caracterizado como subtropical úmido, com presença de verão e inverno bem definidos e com possibilidades de geadas no inverno e chuvas regulares em todos os meses.

3.2 COLETA E ANALISE DE AMOSTRAS DE SOLO

Os dados utilizados para esta etapa foram obtidos pelo Laboratório de Mecanização e Agricultura de Precisão (LAMAP) da Unioeste, câmpus de Cascavel em conjunto com alunos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Medianeira. Com o uso de grades irregulares, realizou-se a amostragem em 40 pontos na área A (2,58 pontos ha⁻¹); o que foi considerado suficiente para mensurar a variabilidade espacial dos atributos destas áreas conforme Demattê et al. (2014); Ferguson; Herert, (2009); Franzen et al. (2002). A localização dos pontos amostrais para a área A conforme apresentado na Figura 3 foi obtida a partir de um aparelho receptor GPS da marca Trimble, modelo Juno SB.

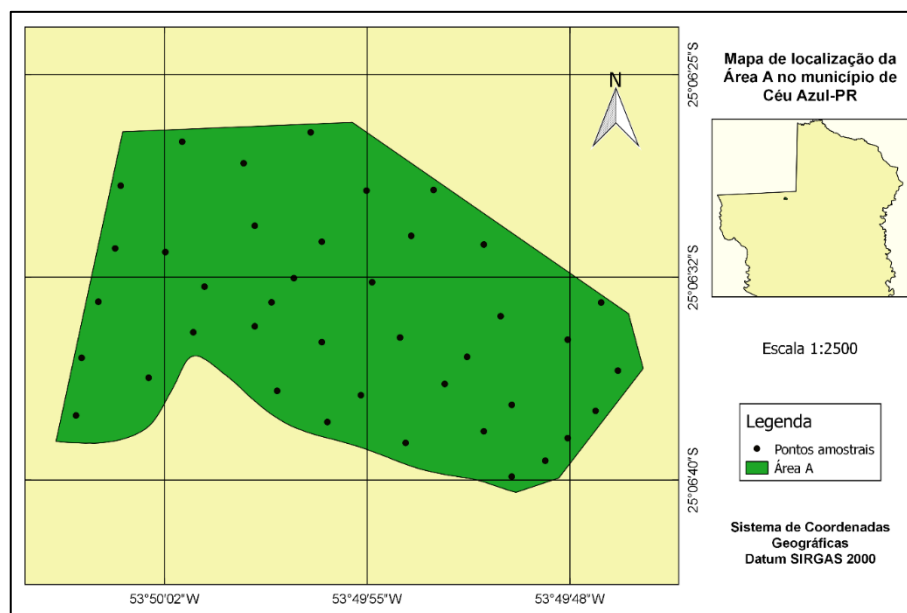


Figura 3: Localização e grade amostral da Área A

Fonte: Autoria própria.

Para a geração das grades amostrais nas áreas B e C conforme apresentado nas Figuras 4 e 5 respectivamente foi utilizado o software Pathfinder e para o mapeamento do contorno das áreas foi utilizado o receptor GPS Trimble Geo Explorer XT. Por se tratar de áreas que possuem grau de declividade e várias curvas de nível optou-se, por utilizar grades amostrais irregulares com distância mínima de 40 m para a determinação da dependência espacial, contendo 42 pontos amostrais no talhão 1 (área B) e 73 pontos amostrais no talhão 2 (área C).

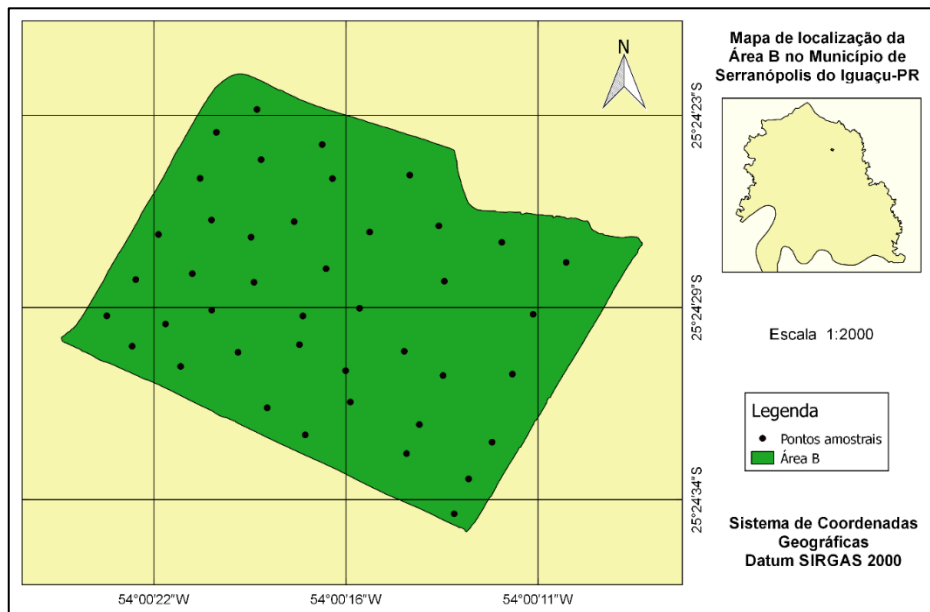


Figura 4: Localização e grade amostral da Área B

Fonte: Autoria própria.

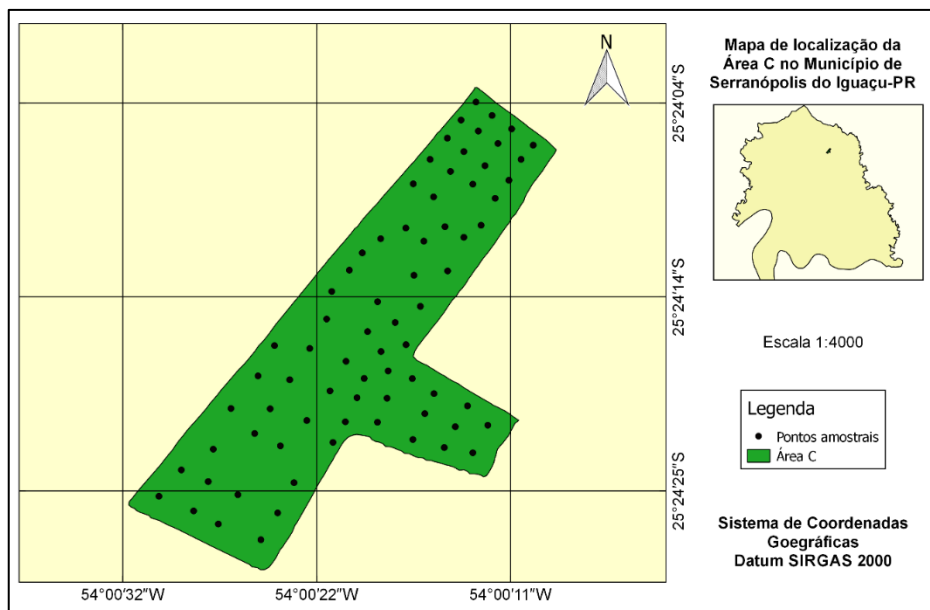


Figura 5: Localização e grade amostral da Área C

Fonte: Autoria própria.

No entorno de cada ponto definido na grade amostral foram realizadas oito perfurações (subamostras), duas por quadrante, em um raio de 3 m do ponto central, na profundidade de 0-0,2 m (adaptado de WOLLENHAUPT et al., 1994), que foram homogeneizadas fazendo uso de um balde e então retirada uma porção de solo para encaminhamento ao laboratório para análise e obtenção dos percentuais de textura (argila, silte e areia), determinação do pH e da matéria orgânica (MO) do solo.

Utilizando anel volumétrico, foram coletadas amostras de solo não deformadas, com vistas a determinar a macroporosidade, microporosidade e porosidade total. Para a determinação da porosidade (porosidade total, macro e microporosidade), as amostras de solo não deformadas foram saturadas por 24 h em bandeja com água até dois terços da altura do anel. Após o período de saturação, as amostras foram drenadas no potencial equivalente a 0,006 MPa utilizando-se mesa de tensão. Por fim, foi determinada a densidade aparente do solo, por meio do método do volume conhecido e teor de água do solo obtido com a mesa de tensão.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A variabilidade dos atributos foi avaliada pela análise exploratória dos dados, seguindo a metodologia de Vieira (2000) com o intuito de caracterizar os dados quanto a média, mediana, desvio padrão, valores máximos e mínimos, amplitude total, quartis superior e inferior, coeficiente de variação, assimetria e curtose.

Para identificação de dados discrepantes (outliers) foi feita análise da dispersão dos quartis, por meio do gráfico box-plot, uma caixa dividida em quartis onde os valores estão distribuídos, sendo que os pontos além dos limites e foram removidos. A verificação da normalidade dos dados foi feita com base na aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov.

3.4 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Após foi realizada análise geoestatística com o objetivo de obter a variabilidade espacial de cada atributo fazendo uso do software AgDataBox-Map, que permite a integração de dados obtidos de diferentes fontes e representando diferentes tipos como, mapas temáticos, amostras de solo dados, imagens georreferenciadas, dados climáticos, operações de campo, custos, pessoal e máquinas / equipamentos) (MICHELON, et al., 2019).

Para fazer uso do software é necessário o registro de usuário no link <https://adb.md.utfpr.edu.br/map/>. Os dados podem ser editados, excluídos, exportados para arquivo de texto e sincronizado com os dados centrais servidor AgDataBox-API (BAZZI, et al., 2019).

Para desenvolvimento do trabalho foram criados três projetos, nos quais foram importados os dados de contorno, pontos amostrais e as variáveis analisadas. Após a inserção dos dados foi realizada a interpolação por IDW e Krigagem utilizando o índice de seleção de interpolação para definir o melhor interpolador. Para aplicação do método IDW, foi definido os valores de expoente entre 1 e 6 e o número vizinhos entre 4 e 12, já para a krigagem utilizou-se os modelos tradicionais (esférico, gaussiano e exponencial) para o cálculo das semivariâncias, e o alcance foi limitado à metade da distância máxima entre dois pontos (cutoff = 50%).

O melhor método foi determinado de acordo com o valor mais baixo para o índice de seleção de interpolação (ISI) e a partir disso foram estimados valores para locais não amostrados e construídos mapas de distribuição espacial de cada atributo.

3.5 GEOPROCESSAMENTO DAS IMAGENS

As etapas envolvendo processamento e manipulação de imagens foram realizadas no QGis 2.18.28, um software livre com código-fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados que suporta inúmeros formatos de vetores, rasters e bases de dados (QGis, 2019). Todos os mapas foram criados fazendo uso do sistema de projeção Universal Transversa de Mercator

(UTM); fuso 21 para as áreas no município de Serranópolis do Iguaçu e 22 para a área de Céu Azul; Datum SIRGAS 2000.

3.6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO

Para essa etapa utilizou-se os parâmetros do modelo da Equação Universal de perdas de solo (USLE) proposto por Wischmeier e Smith (1978), onde a estimativa de perda de solo (A) é dada conforme a Equação 7.

$$A=R.K.LS.C.P \quad (7)$$

em que, A é a perda de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$); R é a erosividade das chuvas ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$); K é erodibilidade dos solos ($t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$); LS é o fator comprimento de rampa e declividade (adimensional); C é a forma de uso e cobertura do solo (adimensional); e P é o fator práticas conservacionistas (adimensional).

Esse modelo foi escolhido pois apesar de ser uma formulação empírica, ainda é uma grande referência no Brasil para a estimativa de perda de solo por erosão e a maioria dos trabalhos relacionados a perdas de solo traz revisões sobre a USLE. Além disso ele é empregado, com bons resultados, para pequenos talhões compatíveis com o uso agrícola, resultando na quantificação da perda de solos por erosão laminar nessas áreas.

3.6.1 Erosividade

Inicialmente foi realizada coleta de dados pluviométricos no Sistema de Informações Hidrológicas do Instituto de águas do Paraná referentes ao período de 1997 a 2018 compreendendo uma série de 22 anos para as cidades de Céu Azul e Serranópolis do Iguaçu.

Essa plataforma apresenta dados de precipitação coletados a partir de pluviômetros e disponibiliza relatórios de alturas diárias, alturas mensais e anuais e totais mensais e anuais.

Após a coleta os dados foram organizados em planilhas no Excel para facilitar a visualização e compreensão dos dados bem como comparar os índices de erosividade ao longo dos anos. O fator erosividade da chuva (R), foi determinado a partir da equação 8 proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992).

$$EI = 67,355.(r^2/P)^{0.85} \quad (8)$$

em que, EI - é o índice de erosividade média mensal (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.mês⁻¹); r - corresponde precipitação média mensal (mm); e P é a precipitação média anual (mm).

Por meio dos índices de erosividade média mensal (EI) foi possível realizar o cálculo da erosividade anual (R) obtido pela equação 9 considerando a série histórica conforme metodologia de Pereira (2014).

$$R = \sum_{i=1}^{12} EI \quad (9)$$

em que, R é a erosividade anual (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹); e EI o índice de erosividade média mensal (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.mês⁻¹).

3.6.2 Erodibilidade

Nessa etapa foram utilizados os dados interpolados de areia, silte e argila gerados na etapa 3.4 no software AgDataBox. Os dados foram importados para o QGis e então através da Tabela de atributos foi calculado o fator K a partir da Equação 10 proposta por Mannigel et al. (2002).

$$\text{Fator K} = ((\% \text{Areia} + \% \text{Silte}) / \% \text{Argila}) / 100 \quad (10)$$

em que, %Areia, %Silte e %Argila correspondem, respectivamente, às frações de areia, silte e argila do solo em estudo.

A partir do resultado foi gerado o mapa de erodibilidade do solo para as três áreas em estudo.

3.6.3 Fator Topográfico

O fator topográfico LS é a “relação esperada de perdas de solo por unidade de área em um declive qualquer em relação à perda de solo correspondente de uma parcela de 22,13 m de comprimento com 9% de declive” (LOMBARDI NETO; BERTONI, 1990 p. 259).

Para obter esse fator foi utilizada a metodologia proposta por Fronza (2019) que utilizou dados da imagem de radar da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) da carta de código 025S54, fornecidos pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, projeto Topodata (BRASIL, 2008), com resolução espacial de 30 m.

A partir da imagem SRTM foi feito o recorte usando como máscara o contorno das áreas de estudo e criado o mapa de declividade (S) através da ferramenta de análise MDE e calculado o comprimento de rampa (L) utilizando-se a função Slope Length do SAGA GIS. Após essa etapa realizou-se a multiplicação dos dados de comprimento de rampa e declividade na calculadora raster utilizando a Equação 11 proposta por Bertoni e Lombardi Neto (2005).

$$LS = 0,00984\lambda^{0.63}D^{1.18} \quad (11)$$

em que, LS é o Fator topográfico; λ representa o comprimento de rampa e D a declividade do terreno (%).

3.6.4 Uso e manejo do solo

Para o fator de uso e manejo (C) foi realizada a análise da cobertura vegetal presente na área de estudo por meio da aplicação do cálculo do Índice de Vegetação da Diferença

Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI), que é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde (SILVA, 2016).

Para coleta das imagens foi utilizado o VANT Phantom 4 Advanced, equipado com GPS/GLONASS, câmera de 20 megapixels com sensor de 1 polegada e obturador mecânico. Junto ao drone foi acoplado outra câmera Parrot Sequoia para coleta das imagens infravermelhas conforme apresentado na Figura 6. O plano de voo foi criado fazendo uso da ferramenta Drone Deploy.



Figura 6: Equipamento utilizado para coleta de imagens
Fonte: A autoria própria.

As imagens foram processadas fazendo uso do software Pix4d Mapper e Pix4d Fields sendo gerado para cada área o mosaico das imagens, obtendo-se então a cobertura total de cada área experimental. Após essa etapa, fazendo uso do software QGis foi calculado o NDVI (Equação 12).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad (12)$$

Os valores do NDVI variam de -1 (menor quantidade de vegetação) a 1 (maior quantidade de vegetação) e os valores de C variam de 0 (solo protegido) a 1 (solo exposto). Considerando essa diferença foi utilizada a metodologia proposta por Karaburun (2010) para correlacionar os dois através de regressão linear.

Para isso foram utilizados valores de referência do Fator C propostos por Pasquatto e Tomazoni, (2016). Após encontrar a equação que relaciona os valores de NDVI com o Fator C foi utilizado a calculadora raster para gerar o mapa de uso e ocupação do solo.

3.6.5 Práticas conservacionistas

Afim de evitar perdas de solo por erosão em áreas cultivadas normalmente são utilizadas algumas práticas visando retardar o fluxo de água e assim, reduzir a quantidade de solos passível de ser carregada com a enxurrada. Nas áreas estudadas a principal prática utilizada é o plantio direto, uma técnica de cultivo conservacionista em que o plantio é efetuado sem as etapas do preparo convencional da aração e da gradagem e o solo está sempre coberto por plantas em desenvolvimento e por resíduos vegetais. Tendo em visto esse contexto foi utilizado o valor de $P= 0,5$ para as áreas de lavouras, conforme proposto por Bertoni e Lombardi Neto (1985).

3.7 ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO

Após obter os mapas temáticos de cada parâmetro da USLE estes foram combinados com o objetivo de gerar um único mapa de integração que representa espacialmente as características da área. Para gerar esse tipo de informação, foi utilizado álgebra de mapas, que se baseia em um conjunto de operações realizadas para cada unidade de pixel e permite a obtenção de uma nova camada de informação, correspondendo ao mapa da suscetibilidade a erosão.

Os cálculos realizados nessa etapa foram executados fazendo uso da ferramenta Calculadora Raster do software QGIS. A Figura 7 apresenta o fluxograma da metodologia completa para obtenção da estimativa de perda de solo.

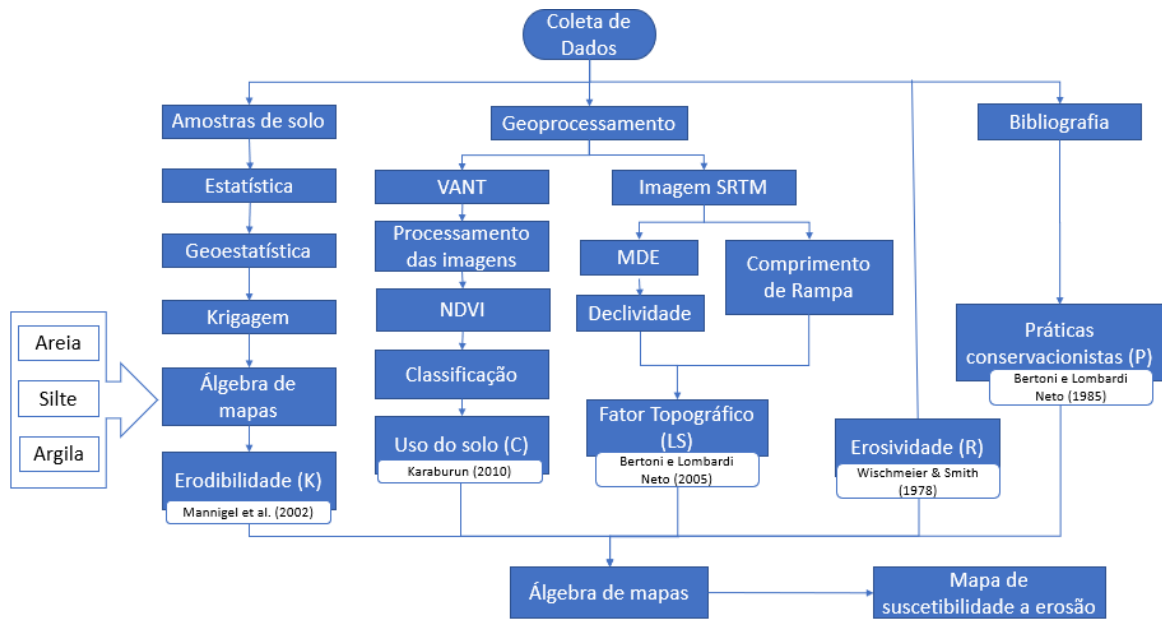


Figura 7: Fluxograma para obtenção da estimativa de perda de solo

Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A estatística descritiva foi usada para resumir os dados de cada área, tendo sido calculados máximo, mínimo, média, mediana, desvio padrão, coeficientes de variação, assimetria e curtose. A Tabela 3 apresenta os resultados da análise.

Tabela 1: Estatística descritiva das Áreas

Variável	Área	Min	Max	Média	Mediana	DP	CV	Assim	Curt
Areia	A	16,25	22,5	19,5	18,75	1,35	7,0	0,14	-0,17
	B	0	9	3,17	3	2,21	69	0,64	-0,20
	C	0,6	4,3	1,72	1,4	0,99	57	1,42	0,95
Silte	A	17,5	21,25	19,25	18,75	1,46	7,6	0,25	-1,42
	B	15,8	62,2	26,96	24,15	9,20	34	1,65	4,42
	C	14,7	37,8	21,17	21,2	3,42	16	2,88	14,45
Argila	A	58,75	66,25	61,5	61,25	2,39	3,8	0,0009	-1,62
	B	37,6	79,3	69,56	71,5	8,15	11,7	-1,88	5,14
	C	61,1	84,1	77,13	77,4	3,77	4,8	-1,90	7,54
pH	A	5,7	6,6	6,22	6,2	0,2	3,2	-0,20	-0,12
	B	4,5	6,1	5,07	5,1	0,32	6,3	0,49	1,10
	C	4,1	5,7	4,93	4,95	0,36	7,3	-0,048	-0,51
Matéria Orgânica	A	29,24	43,86	34,95	34,29	3,89	11,0	0,74	0,021
	B	21,44	41,55	31,23	31,5	4,63	14,0	-0,03	-0,51
	C	2,68	29,48	17,58	17,42	6,64	37,0	-0,17	-0,41
Porosidade Total	A	46,27	57,49	49,64	49,45	2,24	4,5	1,47	3,248
	B	38,6	54,51	43,54	43,07	3,26	7,5	1,19	2,28
	C	36,86	53,14	43,51	44,32	3,35	7,7	0,013	0,68
Macroporosidade	A	12,90	21,40	15,03	14,78	1,65	10,9	2,00	5,62
	B	4,21	22,14	12,55	12,20	3,14	25,0	0,62	2,54
	C	7,94	27,36	13,74	13,41	3,45	25,0	1,47	5,01
Microporosidade	A	32,02	41,01	34,61	34,88	1,79	5,1	1,109	2,71
	B	27,99	42,08	30,98	30,53	2,23	7,2	3,21	15,28
	C	9,49	33,61	29,76	29,83	3,58	12,0	-4,76	27,57
Densidade do Solo	A	1,16	1,47	1,38	1,38	0,06	4,4	-1,47	3,25
	B	1,17	1,59	1,46	1,47	0,084	5,8	-1,19	2,24
	C	1,21	1,63	1,46	1,43	0,087	5,9	-0,007	0,69

Fonte: Autoria própria.

Analisando a média e a mediana observa-se que em todos os atributos os valores são próximos indicando uma distribuição simétrica. Com relação aos valores extremos observa-se que na área A as variáveis de Areia, Silte, Argila, pH e densidade do solo não possuem uma diferença acentuada quando comparado a média ou a mediana, o que reforça a hipótese de

menos dispersão entre os dados e da simetria das distribuições. Nas áreas B e C observa-se um distanciamento da média indicando maior variação entre os dados.

No que diz respeito ao desvio padrão em todas as áreas os dados de pH e densidade do solo são menores indicando maior homogeneidade e concentração próximo a média e que de forma geral as áreas B e C possuem valores maiores quando comparados a área A indicando que os dados estão bem distribuídos em torno da média.

Quanto ao coeficiente de variação seguindo os critérios de Warrick e Nielsen (1980) – (baixo – $CV < 12\%$, médio – $12\% < CV < 60\%$, alto – $CV \geq 60\%$), verificou-se que todas as variáveis na área A possuem CV baixo indicando homogeneidade dos dados. Já para a área B os dados de densidade do solo, microporosidade, pH e porosidade possuem um CV baixo, a argila, macroporosidade, matéria orgânica e silte são classificadas como médio e os dados de areia possuem um coeficiente alto. Para a área C os dados de argila, pH, porosidade e densidade possuem em coeficiente de variação baixo, os demais dados possuem coeficiente médio sendo o maior deles a areia com coeficiente de 57%.

Com relação ao coeficiente de assimetria e curtose os valores foram próximos a zero indicando possível normalidade dos dados com exceção dos dados de silte na área C que apresentaram uma distribuição de frequência leptocurtica com concentração de valores abaixo da média e microporosidade nas áreas B e C também com distribuição leptocurtica com concentração de valores maiores que a média.

Os dados foram submetidos a análise de dispersão por meio dos gráficos boxplot, onde identificou-se outliers para a areia, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total para a área A. Para a área B foram identificados outliers nos dados de argila, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, pH, porosidade e silte. Na área C foram identificados outliers em todas as variáveis com exceção do pH.

Após remoção dos valores discrepantes todas as variáveis apresentaram distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-smirnov ao nível de 5% de significância.

4.2 ANÁLISE ESPACIAL DOS DADOS

A análise geoestatística foi realizada com o objetivo de obter a variabilidade espacial de cada atributo fazendo uso do software AgDataBox-Map (Bazzi, et al. 2019). O software

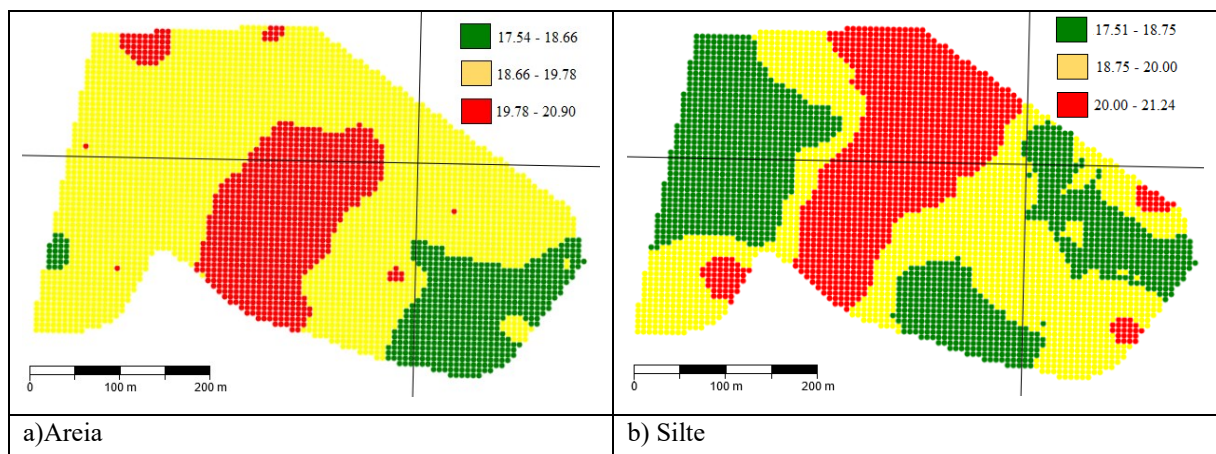
também calcula o índice de seleção de interpoladores (ISI) que permite identificar o melhor método de interpolação e a partir disso, gera o mapa temático de cada atributo. Quando a análise geoestatística não apresenta bons resultados quanto a dependência espacial das variáveis em estudo, o ISI permite definir os melhores parâmetros para o interpolador IDW. A Tabela 2 apresenta o resultado obtido para a área A.

Tabela 2: Métodos de interpolação e parâmetros dos atributos na Área A

Variável	ISI	Interpolador	Parâmetros
Areia	0.030	IDW	Exp: 1, Nei: 11
Silte	0.027	IDW	Exp: 1.5, Nei: 6
Argila	0.016	IDW	Exp: 1, Nei: 9
Matéria Orgânica (MO)	0.044	IDW	Exp: 1.5, Nei: 7
pH	0.081	IDW	Exp: 3, Nei: 5
Porosidade Total (PT)	0.052	IDW	Exp: 2.5, Nei: 6
Microporosidade	0.043	IDW	Exp: 1, Nei: 8
Macroporosidade	0.497	IDW	Exp: 2, Nei: 11
Densidade do Solo (DS)	0.110	IDW	Exp: 5, Nei: 5

Fonte: Autoria própria.

Conforme observado na Tabela 2 todas as variáveis foram interpoladas pelo método IDW. A maioria dos autores apontam que a krigagem apresenta melhores resultados entretanto em alguns casos onde a dependência espacial é fraca o IDW é mais indicado. A Figura 8 apresenta os mapas temáticos gerados após a interpolação das variáveis.



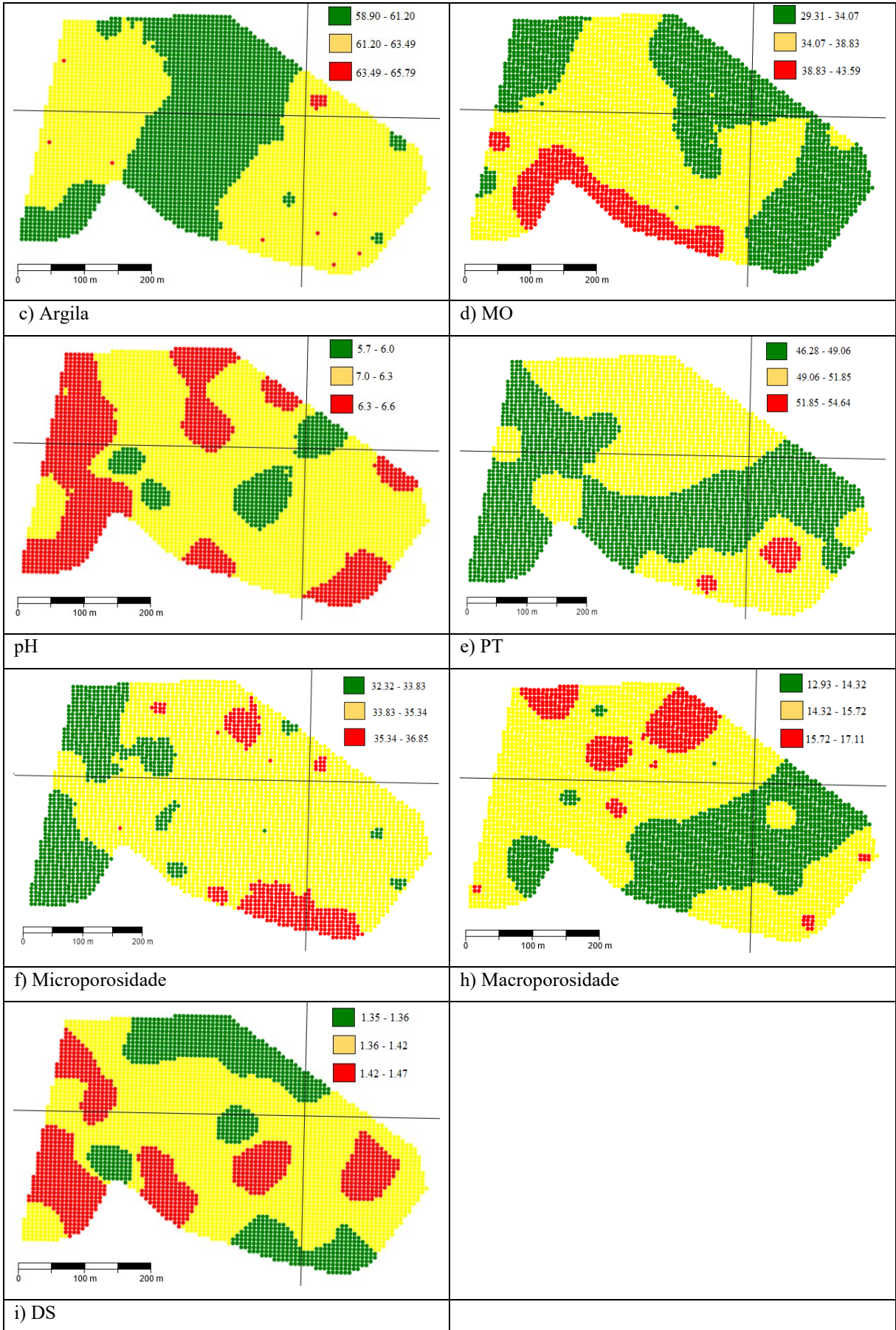


Figura 8: Mapas temáticos da Área A

Fonte: Autoria própria.

Analisando as imagens é possível observar que os mapas de areia e silte apresentam-se com distribuição contrária à distribuição dos valores de argila. De acordo com Souza et al. (2004), as frações do solo geralmente apresentam comportamento inverso, principalmente de distribuição, pois como são medidos em porcentagem quando há acréscimo de um ocorre redução de outro.

Na variável matéria orgânica observa-se concentração de valores maiores na parte inferior coincidindo com a área mais baixa do terreno e de maior deposição de sedimentos.

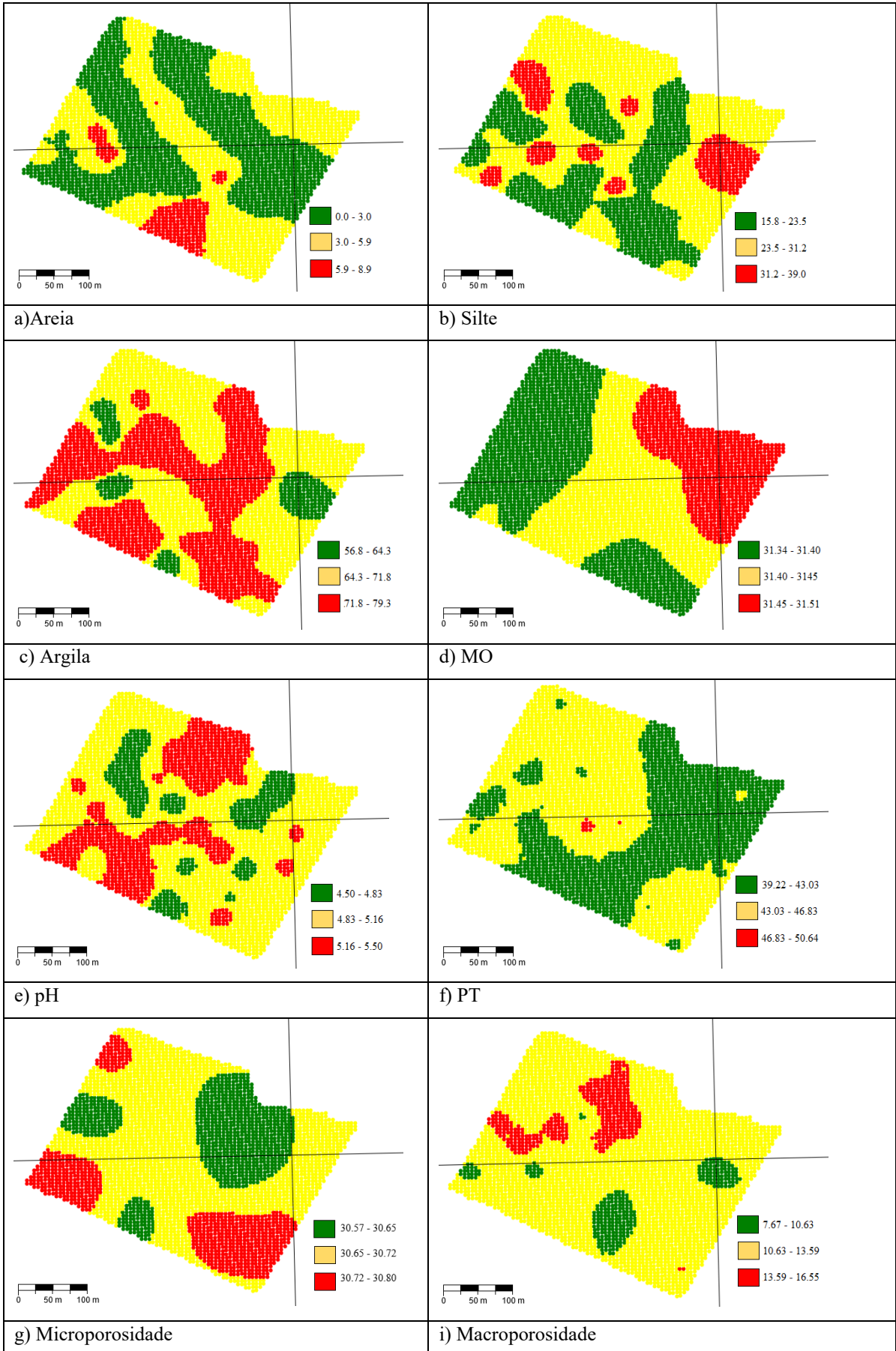
Na área B os parâmetros matéria orgânica e Microporosidade apresentaram melhor índice com a Krigagem conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Métodos de interpolação e parâmetros dos atributos na Área B

Variável	ISI	Interpolador	Parâmetros
Areia	0.071	IDW	Exp: 2.5, Nei: 4
Silte	0.135	IDW	Exp: 3.5, Nei: 9
Argila	0.81	IDW	Exp: 3.5, Nei: 11
Matéria Orgânica (MO)	0.055	Krigagem	Mod: exp, C0=20.17, C=19.28 a=119.6
pH	0.112	IDW	Exp: 2, Nei: 5
Porosidade Total (PT)	0.305	IDW	Exp: 1, Nei: 7
Microporosidade	0.047	Krigagem	Mod: esf, C0=1.55, C=1.59 a=119.6
Macroporosidade	0.399	IDW	Exp: 1.5, Nei: 5
Densidade do Solo (DS)	0.306	IDW	Exp: 1, Nei: 7

Fonte: Autoria própria.

O modelo utilizado para a Matéria Orgânica foi o exponencial e para microporosidade foi utilizado o modelo esférico indicado em diversos estudos como o que melhor se ajusta aos atributos do solo (BERTOLANI e VIEIRA, 2001; SIQUEIRA et al., 2008; GUEDES FILHO et al., 2010). Os demais foram interpolados por meio do IDW e os mapas gerados estão apresentados na Figura 9.



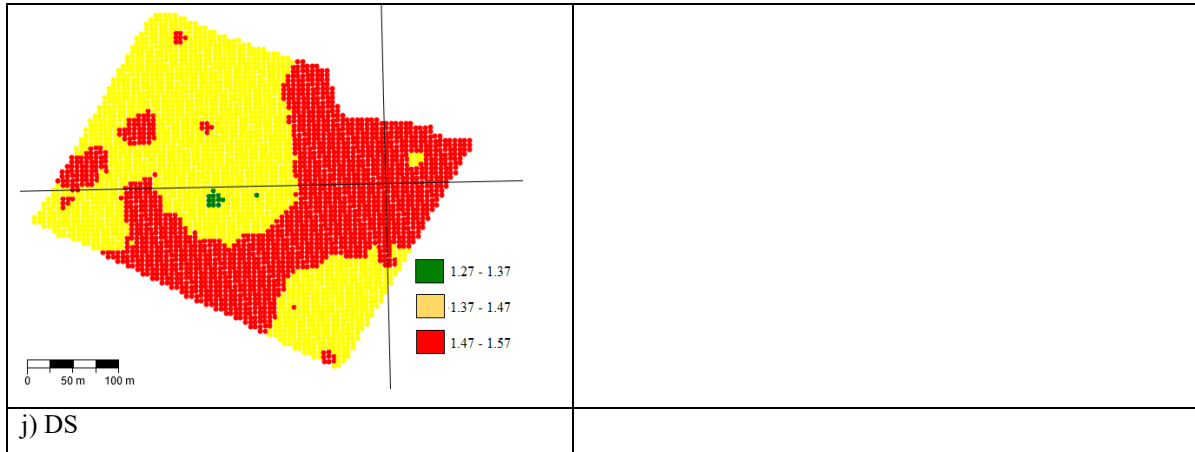


Figura 9: Mapas temáticos da Área B

Fonte: Autoria própria.

Através das imagens observa-se que as variáveis silte e argila novamente apresentaram áreas com distribuição inversa concordando com Souza et al. (2004). As variáveis Porosidade e Densidade do solo também estão inversamente apresentadas. Conforme explicação dada por Wendling (2012) a porosidade total (PT), que faz menção ao espaço não ocupado por sólidos, mas por água e ar, desempenha papel fundamental no comportamento físico-hídrico do solo (aeração, condução e retenção de água, penetração das raízes) propiciando ou não, o aproveitamento dos nutrientes disponíveis. Considerando que a densidade do solo expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco e o volume do mesmo (considerando o espaço poroso) a porosidade é inversamente proporcional à densidade (TORMENA ET AL. 2002).

Na Área C de forma geral as variáveis também foram interpoladas por IDW com exceção do pH e Macroporosidade. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

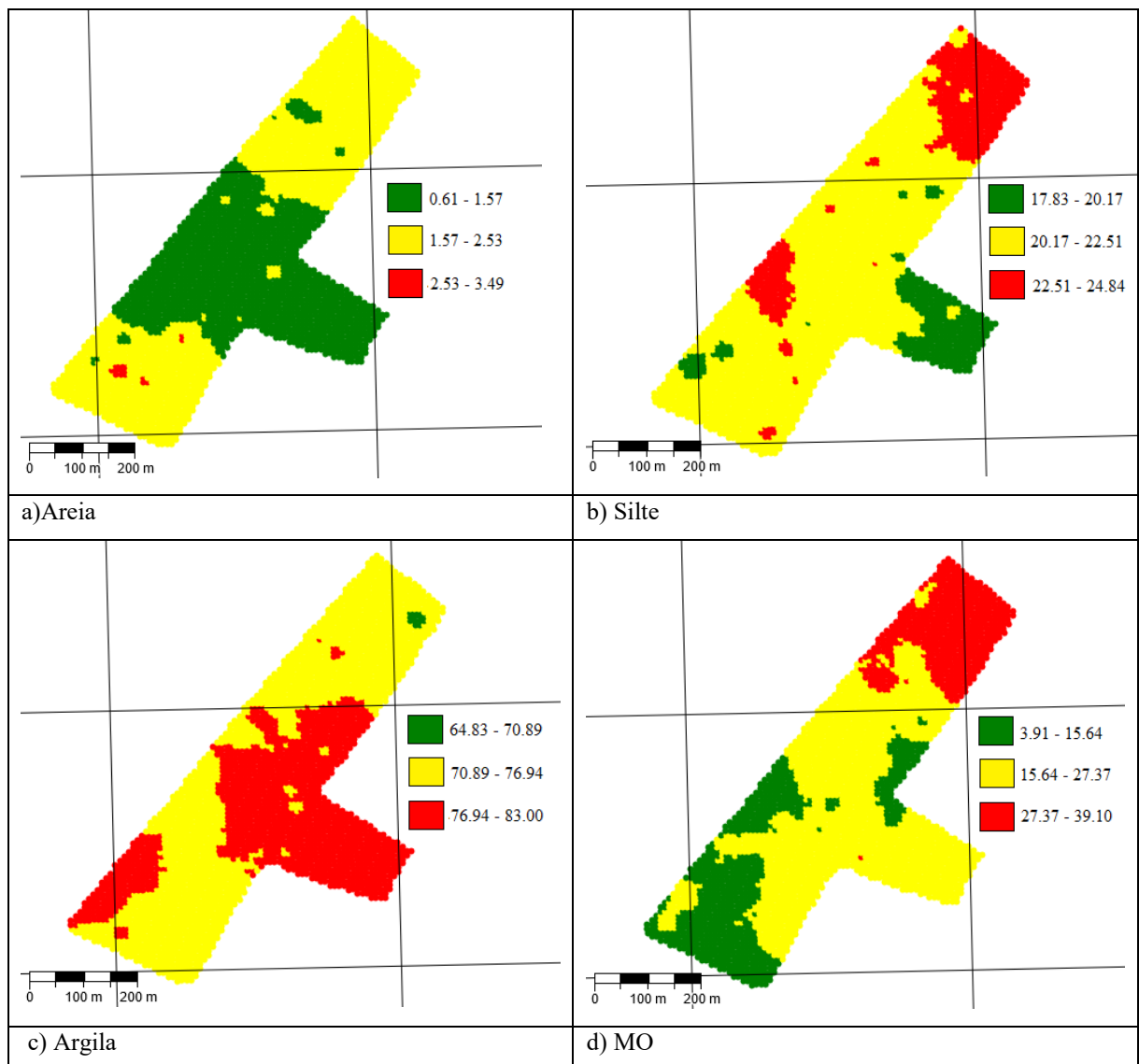
Tabela 4: Métodos de interpolação e parâmetros dos atributos na Área C

Variável	ISI	Interpolador	Parâmetros
Areia	0.048	IDW	Exp: 1, Nei: 12
Silte	0.053	IDW	Exp: 1, Nei: 9
Argila	0.107	IDW	Exp: 1, Nei: 9
Matéria Orgânica (MO)	0.247	IDW	Exp: 1, Nei: 7
pH	0.05	Krigagem	Mod: exp C0=0.11, C=0.14 a=262.01
Porosidade Total (PT)	0.207	IDW	Exp: 1, Nei: 12
Microporosidade	0.067	IDW	Exp: 5, Nei: 12

Macroporosidade	0.0	Krigagem	Mod: gau C0=6.99, C=8.66 a=104.80
Densidade do Solo (DS)	0.102	IDW	Exp: 1, Nei: 4

Fonte: Autoria própria.

O modelo utilizado para o pH foi o exponencial e para macroporosidade foi utilizado o modelo gaussiano. Os demais foram interpolados por meio do IDW e os mapas gerados estão apresentados na Figura 10.



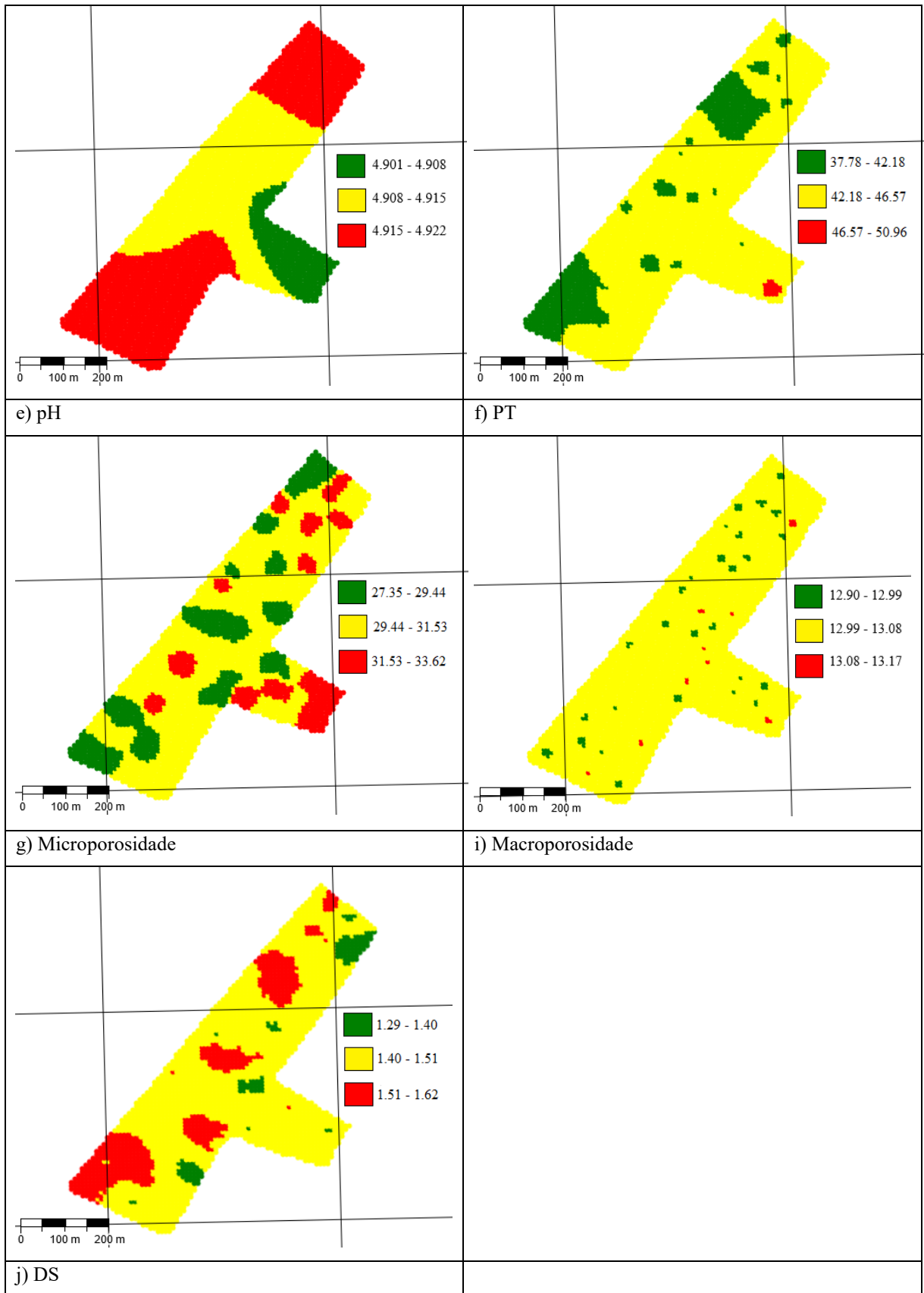


Figura 10: Mapas temáticos da Área C

Fonte: Autoria própria.

Nos mapas da área C também observa-se de maneira mais sutil a inversão entre os fatores de textura do solo e a sobreposição inversa de algumas áreas dos mapas de porosidade e densidade do solo.

4.3 PARÂMETROS PARA ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO

4.3.1 Erosividade

O Fator erosividade do município de Céu Azul e Serranópolis do Iguaçu foi obtido através dos dados disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas do Instituto de águas do Paraná coletados da estação Céu Azul (código 2553009) e Jardinópolis (código 2554018) respectivamente referentes ao período de 1997 a 2018 conforme apresentado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Médias mensais de Precipitação em Céu Azul

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1997	128,2	134	116,2	19,4	246,8	173,5	64,2	219,7	237	314,4	378,2	80,9
1998	181,1	358	307,9	506	208,7	60,5	55,1	273,9	288,5	345,4	52	177
1999	269,7	203	178,1	230,3	149,3	250,1	90,1	8,3	140,4	103,4	42,4	201,2
2000	149	269	102,8	65,9	105,4	179,6	120,7	114,3	205,8	272,6	226,9	197,4
2001	212,7	244	162,6	111,7	124,8	113,7	73,1	59,2	132,7	229,9	226	116,7
2002	236	57,8	68,2	41,2	450,2	36,1	49,3	111,9	143,9	301,5	261,8	158,6
2003	168,9	172	135,4	137,4	55,2	75,3	128,2	49,5	138,2	352,4	250,9	263,5
2004	174	12	42,5	122,9	308,1	99,5	161,5	31,5	55,5	312,5	229,5	66
2005	174	24,1	50	136,2	309,7	163	74,7	59	209,1	453,6	110,6	45,3
2006	254,2	72,2	309,4	75	0	111,7	28,5	77,4	264,6	226,4	241,3	197,8
2007	216,9	109	206,3	339,7	261,9	19	85,8	5,5	27,7	131,4	268,8	149,6
2008	326,7	124	121,6	127,7	28	187,3	133,5	182	124,2	371,3	172,3	83,5
2009	226,4	162	118,6	76,5	274,6	188,3	113,2	88,4	180,6	403,2	193,2	364
2010	181,4	160	200,8	275,9	79,5	25,8	97,7	17	96,2	277	104,7	272,9
2011	273,3	359	54	97,1	46,1	108,1	206,7	332,3	123,5	333,9	212,6	29,8
2012	149,5	129	42,8	288,1	93	243,3	96,6	0	60,5	207,3	119,8	165,9
2013	239	168	309,3	69,9	343,1	400,8	68,1	41,8	208,6	158,4	102,2	165,6

2014	66,7	114	225,2	236,1	220,9	677,5	136,3	8,8	312,7	43,6	227,2	202,9
2015	223,5	137	178,1	52,6	193	73,6	400,4	52,5	112,1	110,5	256,6	465,6
2016	137,9	298	128,7	111,7	184,5	68,6	84,5	215,1	33,1	283,5	123,8	100,3
2017	139,5	119	164,2	259,4	158,9	77,3	0	181,3	30,9	469,2	296,2	257,7
2018	231,7	224	203	51,6	107,8	93,4	8,7	66,5	161,8	242,7	188,1	29,4
MÉDIA	198,2	166	155,7	156	179,5	155,7	103,5	99,8	149,4	270,2	194,8	172,3
DES. PAD	57,7	93,1	81,4	117,3	112,3	143,1	80,1	110,2	80,8	110,2	81,5	105,5

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Médias mensais de Precipitação em Serranópolis do Iguaçu

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1997	95,7	151	123,6	30,2	315,1	240,4	70,7	226,5	214,7	294,2	204,6	90,6
1998	183,5	284	254,3	404,1	163,2	104	41,3	295,7	276,8	314,5	31,4	161,2
1999	257,8	176	82	220,7	95,9	237,2	132,8	5,2	91,7	41,6	64,6	188,1
2000	191,2	150	83,2	128,7	134,5	231,1	109,2	97,1	168,9	212,3	120,3	160,6
2001	209,5	299	129,2	132,6	90,3	128,5	83,4	54,3	115,4	159,3	248,4	152,8
2002	259,7	69,5	125,9	20,5	443,2	44,3	67,1	88,3	170,8	331,4	235,5	157,1
2003	187,6	154	221,8	171	88	96,7	72,8	23,4	139,8	295,7	196,9	421,2
2004	97,4	82,4	48,7	93,1	289,1	99,3	172,8	16,6	66,9	310	266,3	66,3
2005	375,6	5,6	106	151,2	428,1	229,2	93,2	117,8	248,3	427,4	50,9	78,8
2006	222,2	32,7	145,5	107,4	0,7	58,8	18,8	92,2	198	152,8	204,6	154,9
2007	187	157	128,3	244,4	231,7	6	95,7	13,6	16,8	137,4	203,2	115
2008	114	90,4	52,8	153,7	42,5	147,6	104,1	140,7	97,3	207,7	110	36,5
2009	221	159	72,4	86,2	358,3	130,7	122,2	154,2	180,6	332,5	249,1	201,3
2010	188,1	126	213,4	271,5	98,3	41,2	105,4	30,9	84,7	242,8	49,8	306,6
2011	191,8	191	122,8	145,6	4,5	44	243,6	241,4	113	263,3	140,8	29,7
2012	146,2	109	82,5	208,8	59,1	130,9	114,7	3	57,4	247,3	74,1	265,1
2013	174,8	204	312,3	65,8	242,4	404,1	77,3	86,1	219,4	161,7	197,6	174,2
2014	223,8	114	358,1	234,2	254,4	575,2	169,5	19,4	310	85	160,4	154,1
2015	219,3	186	189,8	95,8	168	103,7	294,2	41,6	98	113,6	251	387,9
2016	249,2	287	138,3	48,5	163,3	43,3	60,4	177,4	32,3	348,4	105,6	103,7
2017	59,8	213	97,6	162,9	219,1	104,5	7	144,2	34,6	426,2	411,6	197,9
2018	208,6	235	373,1	26,1	68,7	146,2	0	74,3	237,5	289,4	110,6	54,4
MÉDIA	193,8	158	157,3	145,6	179,9	152,1	107,4	97,5	144,2	245,2	167,6	166,3
DES. PAD	65,4	76,3	92,2	90,6	125,8	128,2	66,6	102,1	81,9	102,1	90,1	101,1

Fonte: Autoria própria.

Analisando os dados de precipitação observou-se que o em geral outubro é o mês com maior média seguido pelos meses de janeiro, maio, novembro e dezembro. Já os meses com menor média de precipitação são julho e agosto condizentes com período de inverno. Waltrick

et al. (2011) encontrou resultados semelhantes em seu estudo destacou outubro como o segundo mês mais erosivo e aponta preocupação tendo em vista que esse é o período que segue a colheita das culturas de inverno e precede o plantio das culturas de verão deixando o solo desprotegido e suscetível a processos erosivos.

Por meio desses dados foi calculado a Erosividade dos municípios através das Equações 8 e 9 onde obteve-se a Erosividade(R) para Céu azul e Serranópolis do Iguaçu conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Erosividade Anual (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹)

ANO	Céu Azul	Serranópolis
1997	9504,613	8962,55
1998	12086,92	10735,22
1999	8267,064	7562,033
2000	8283,651	7228,659
2001	7606,54	7743,257
2002	9805,347	9964,658
2003	8563,999	9395,137
2004	8345,876	8159,529
2005	9454,039	11286,24
2006	8944,011	6897,918
2007	8976,19	7501,209
2008	8866,72	5851,703
2009	10073,18	9434,145
2010	8383,663	8326,9
2011	10114,38	8057,297
2012	7617,775	7248,439
2013	10130,1	9759,34
2014	12373,32	11856,48
2015	10562,11	9344,719
2016	7961,933	8568,358
2017	10281,88	10300,09
2018	7687,013	9231,984
Média	9267,742	8791,63

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados obtidos as erosividades extremas em Céu Azul foram de 12373,32 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ e 7606,54 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ no ano de 2014 e 2001 respectivamente. Já para o município de Serranópolis a máxima erosividade foi de 11856,48 em 2014 e a mínima foi de 5851,703 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ em 2008.

Quanto a Erosividade média anual (R) obteve-se 9267,7 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ para o município de Céu Azul e 8791,63MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ para Serranópolis do Iguaçu. Waltrick

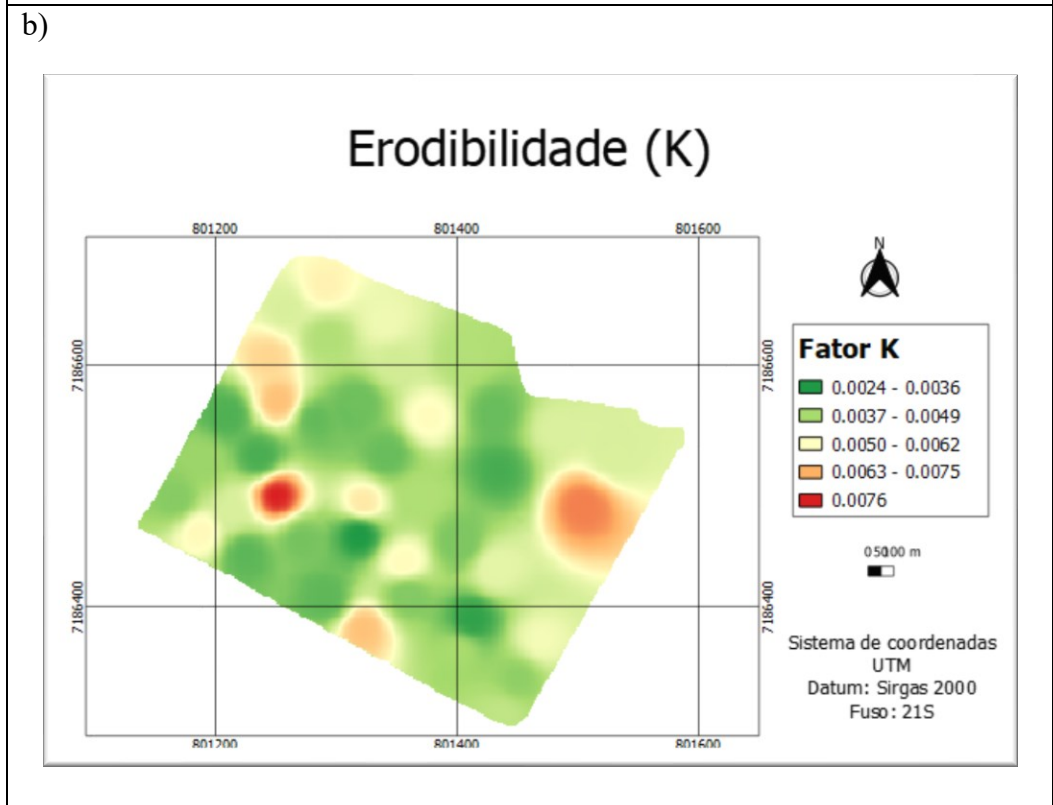
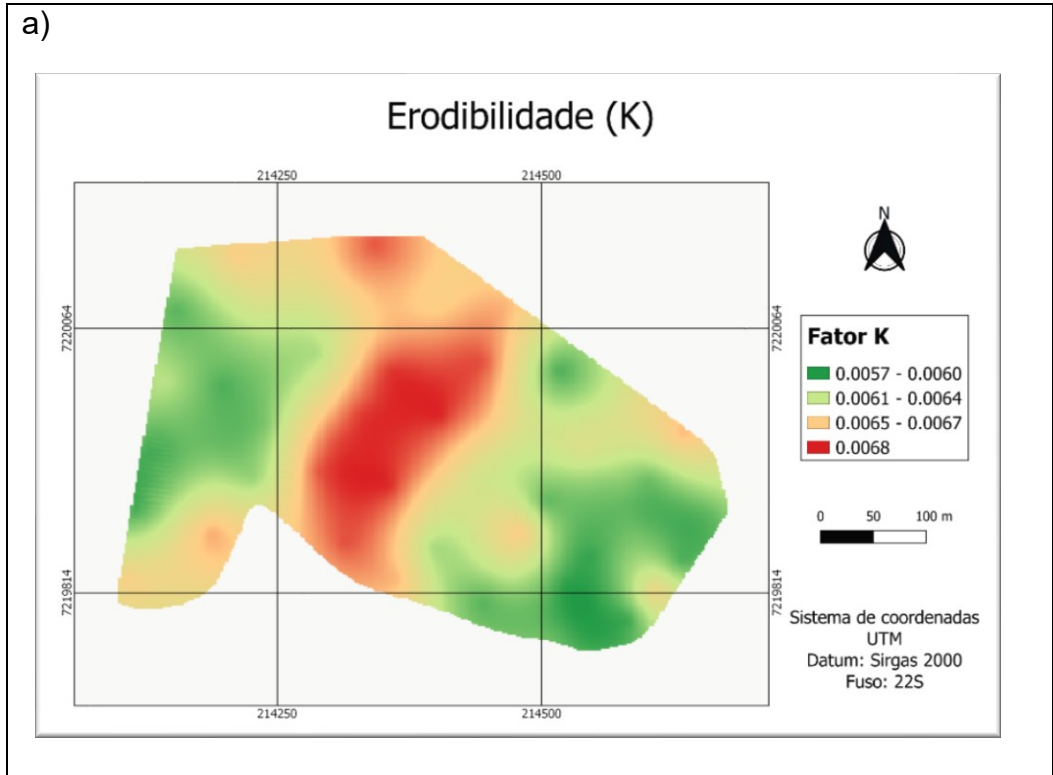
et al. (2011) calculou a erosividade em 114 localidades do Paraná levando em consideração o período de 1986 e 2008 dentre elas o município de Céu Azul encontrando Erosividade Média Anual de $12121 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e nos municípios vizinhos de Matelândia e São Miguel do Iguaçu os valores de $11531 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $10701 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ respectivamente.

Trindade et al. (2016) apresenta um estudo com valores semelhantes, em seu trabalho foi desenvolvido um mapa do índice de erosividade das chuvas do Brasil no qual classifica a região do estudo com Erosividade entre 10000 e $12000 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

A variação encontrada nos valores pode ser explicada pela diferença dos períodos de coleta, além disso é preciso destacar que a metodologia não considera os processos de deposição de sedimentos e as perdas de solo de solo em períodos chuvosos e secos não são ponderados em virtude da precipitação pluviométrica média utilizada nas equações.

4.3.2 Erodibilidade (k)

O fator Erodibilidade foi obtido utilizando os dados de argila, silte e areia apresentados nas Figuras 8, 9 e 10. Esses dados foram importados para o Qgis onde foi realizado o cálculo de acordo com a Equação 10 proposta por Mannigel et al. (2002). Os valores encontrados foram processados gerando os Mapas apresentados na Figura 11.



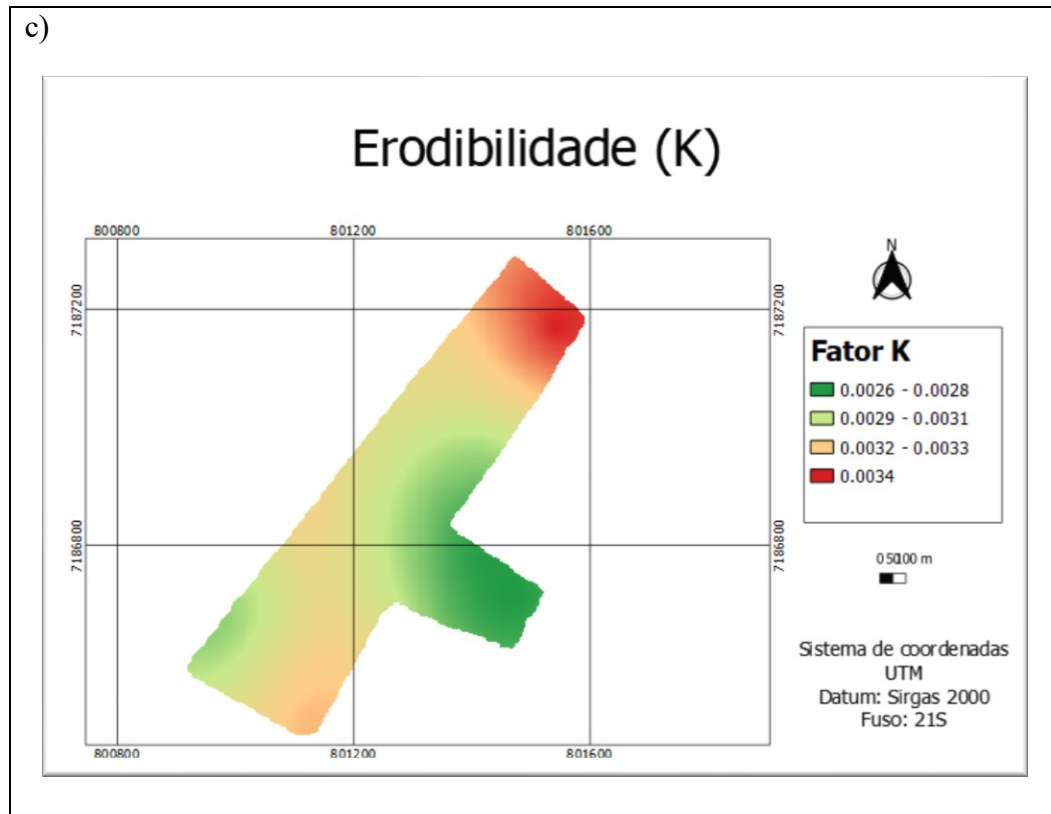


Figura 11: Erodibilidade das áreas de estudo

Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser observado os valores da erodibilidade variam de 0,0057 a 0,0068 $t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$ na área A, com maior erodibilidade no centro indicando maior suscetibilidade nessa região. Nas áreas B e C a erodibilidade varia de 0,0024 a 0,0076 $t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$ e 0,0026 a 0,0034 $t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$ respectivamente indicando que com exceção de alguns pontos na maior parte das áreas a erodibilidade é ainda menor que na área A.

De acordo com Mannigel et al. (2002) as áreas apresentam valores muito baixos de erodibilidade ($R < 0,009$) o que condiz com o solo da região. Os Latossolos possuem características como avançada evolução, muito intemperizados e profundos, e devido a isso, possuem menor susceptibilidade a erosão (PASQUATTO; TOMAZONI, 2016).

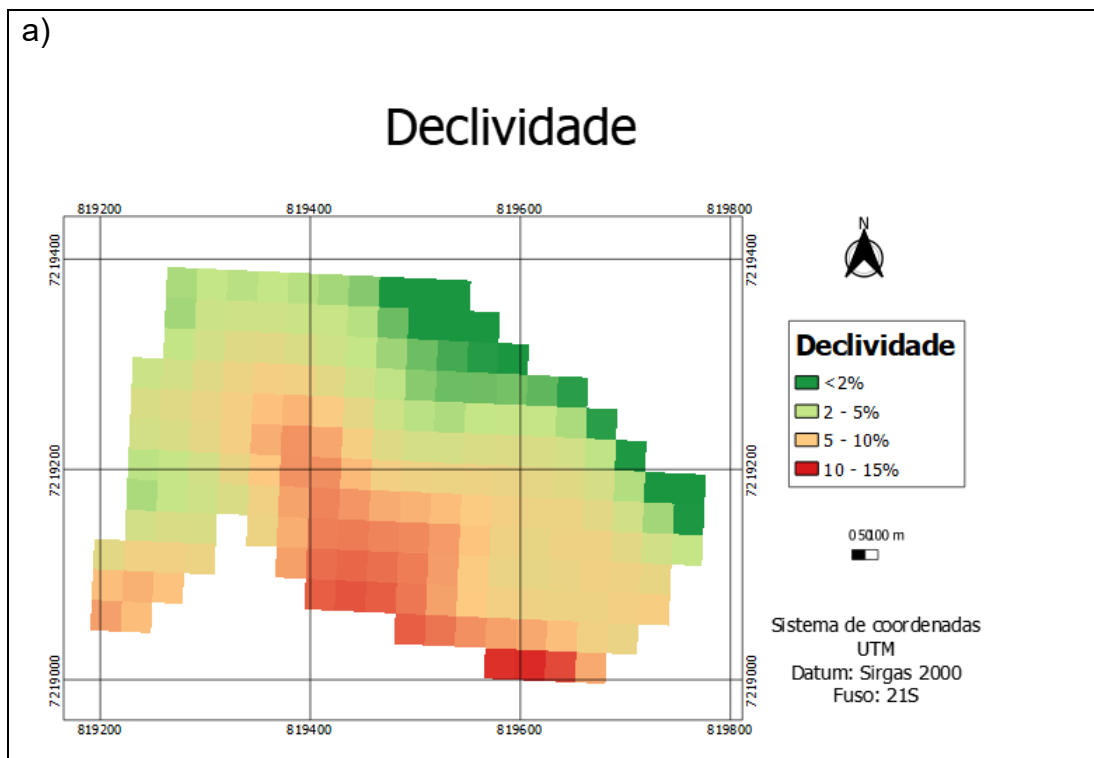
Observa-se também que nas áreas com menor erodibilidade concentram-se os maiores valores de argila. De acordo com Correchel (2003) a estrutura do solo influencia em sua resistência à erosão hídrica por meio das propriedades físico-químicas da argila que contribui para que os agregados permaneçam estáveis em presença de água e de propriedades biológicas. Assim quanto maior a estabilidade dos agregados em água, maior a permeabilidade do solo e

menor a desagregação e, por consequência, menor o escoamento superficial e o arraste de partículas pela água.

Tomazoni et al. (2005), Demarchi e Zimback (2014) e Pasquatto e Tomazoni (2016) encontraram valores de K para os Latossolos Vermelhos de 0,03, 0,041 e 0,01 t.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹, respectivamente, dessa forma, o valor de K calculado está abaixo dos valores encontrados na literatura. Essa diferença pode ser explicada pela diferença do tamanho das áreas de estudo e a precisão dos dados utilizados.

4.3.3 Fator Topográfico

A partir da imagem SRTM foi feito o recorte usando como máscara o contorno das áreas de estudo e criado o mapa de declividade (S) através da ferramenta de análise MDE e calculado o comprimento de rampa (L) utilizando-se a função Slope Length do SAGA GIS conforme proposto por Fronza (2019). As Figuras 12 e 13 apresentam os mapas gerados.



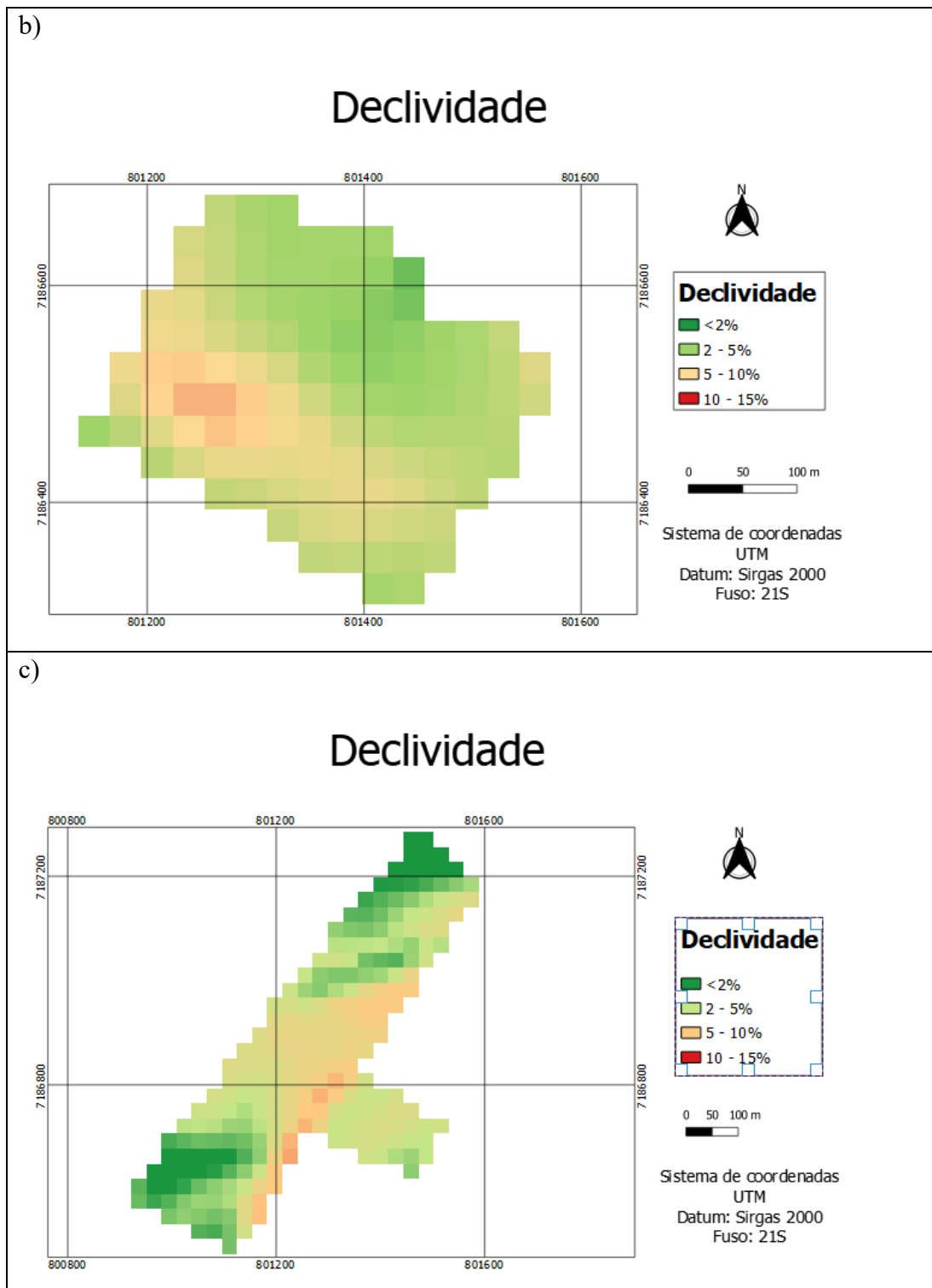
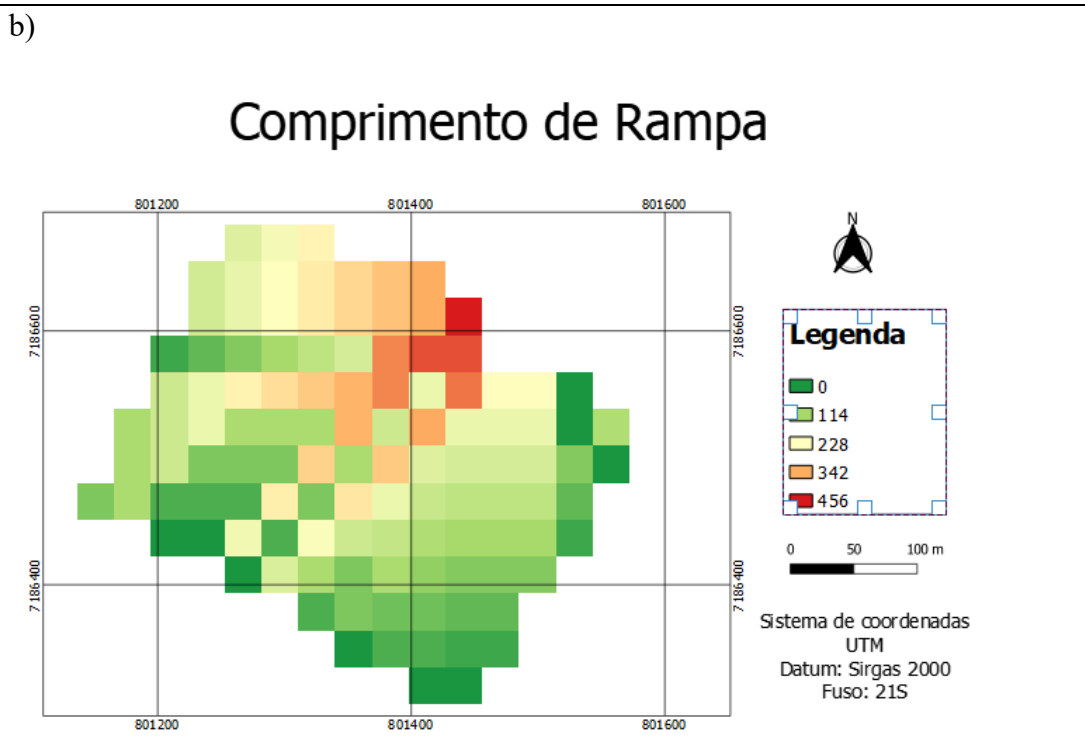
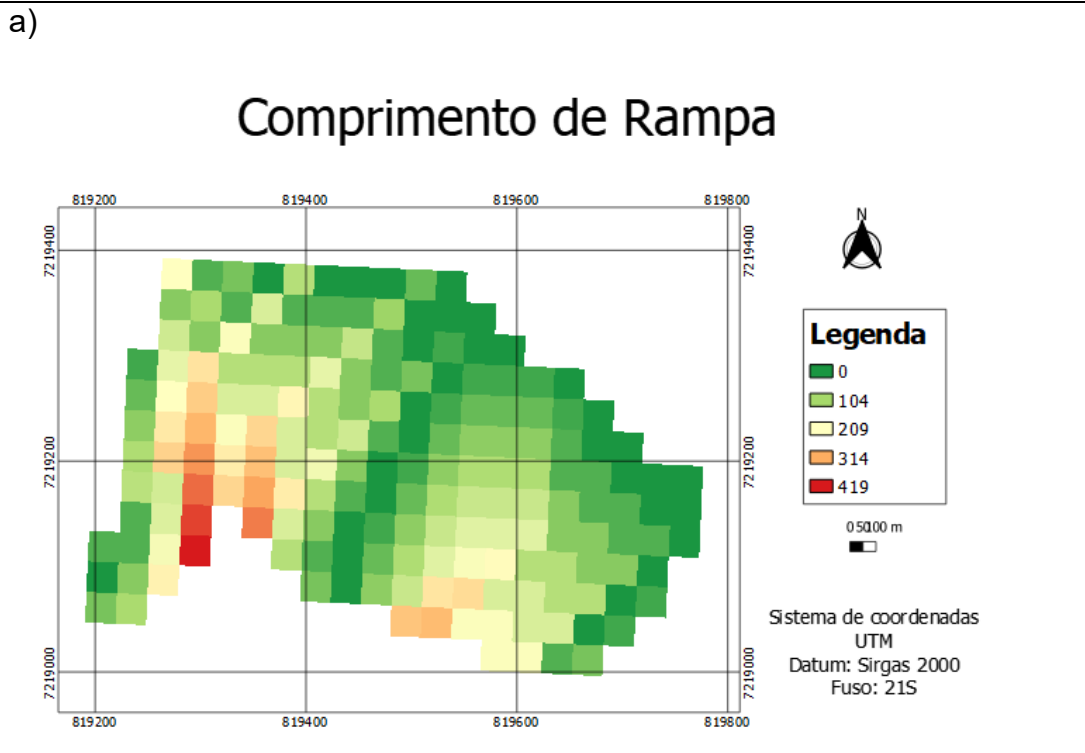


Figura 12: Declividade das áreas de estudo

Fonte: Autoria própria.



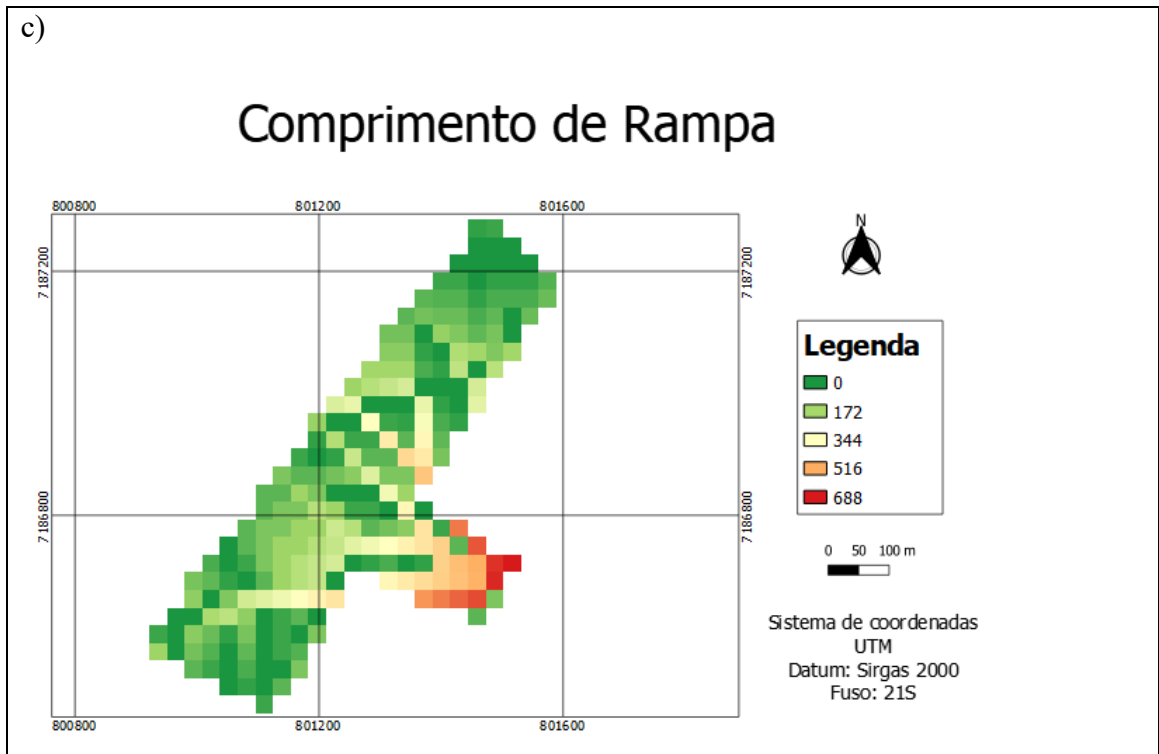
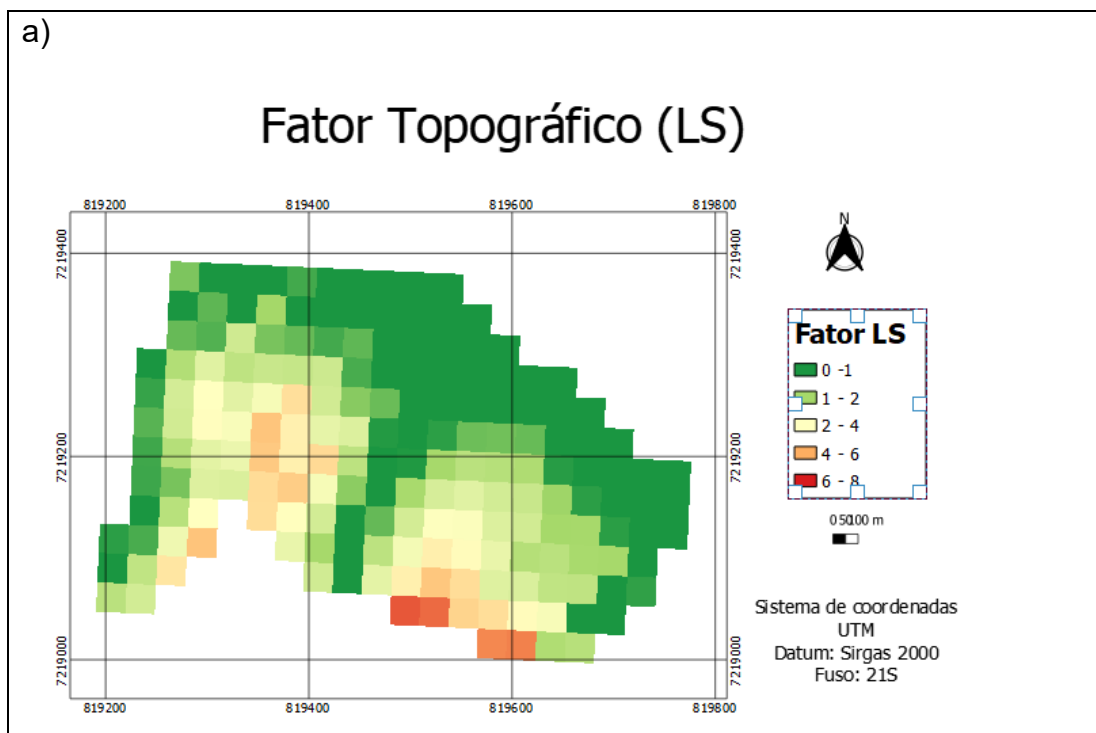


Figura 13: Comprimento de rampa das áreas de estudo

Fonte: Autoria própria.

Após obter os dados de declividade e comprimento de rampa foi realizado o cálculo do Fator LS na calculadora raster através da equação proposta por Bertoni e Lombardi Neto (2005). A Figura 14 apresenta os resultados obtidos.



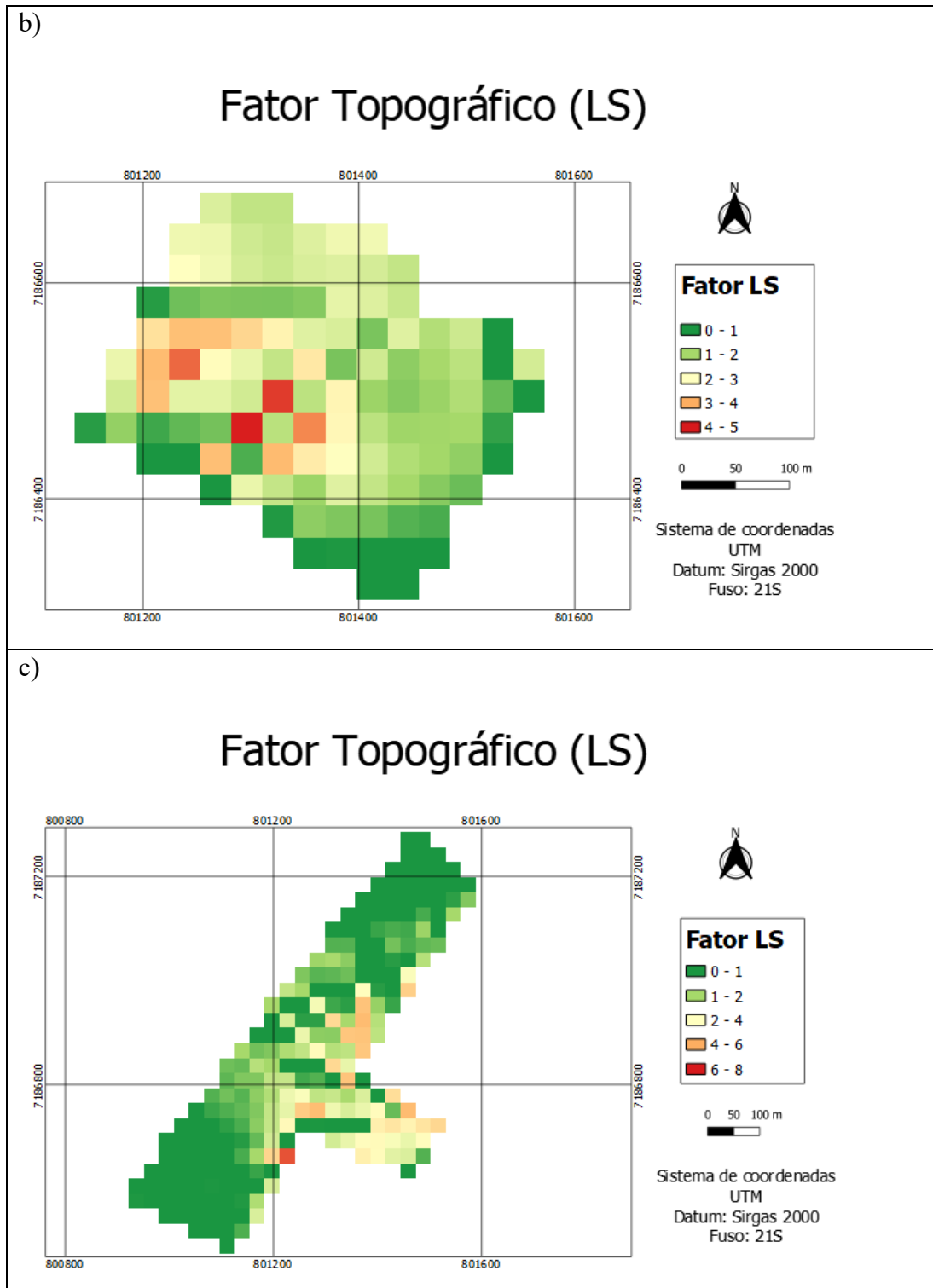


Figura 14: Fator Topográfico das áreas de estudo

Fonte: Autoria própria.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2005) o volume e a velocidade das enxurradas estão diretamente relacionados ao grau de declividade do terreno assim conforme observado as áreas com maior declividade apresentam Fator LS maior. Apesar disso observa-se que há predominância de valores entre 0 e 3, com maior representatividade de valores próximos a zero

indicando que grande parte da área de estudo tem menores taxas de escoamento superficial, o que desfavorece a erosão hídrica laminar.

Essa premissa concorda com a classificação de Fonelos e Neves (2006) que aponta valores de LS entre 0 e 1 como muito baixo, de 1 a 2 como baixo e de 2 a 5 como moderado.

4.3.4 Uso e manejo do solo

O fator de uso e manejo (C) foi obtido utilizando imagens coletadas com o VANT Phantom 4 Advanced acoplado com uma câmera parrot sequoia nas áreas A, B e C. O voo foi realizado próximo ao meio dia para melhor resultado das imagens e no período pós colheita para representar o período mais crítico de solo exposto conforme pode ser observado na Figura 15.

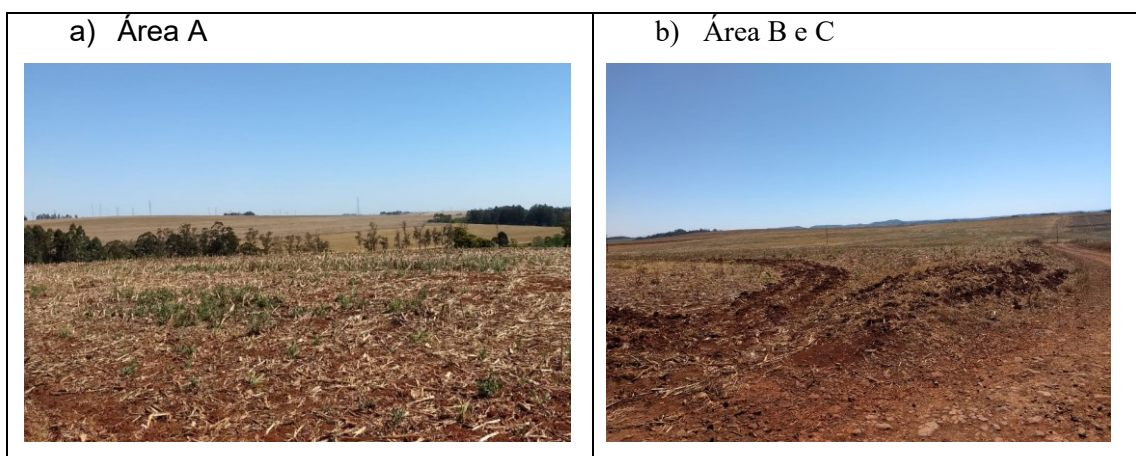


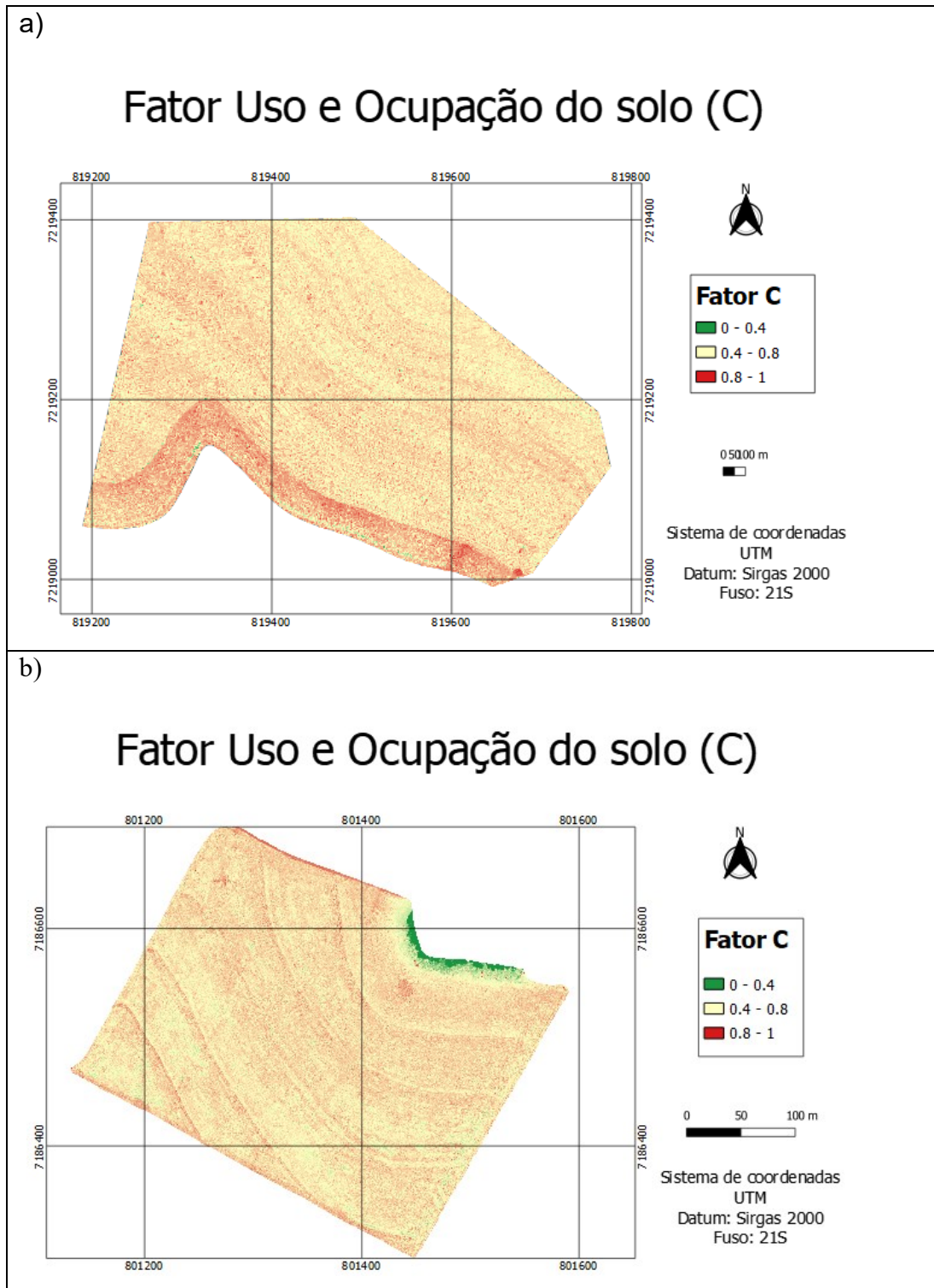
Figura 15: Fotografia das Áreas

Fonte: Autoria própria.

As imagens foram processadas com o programa pix4d mapper e pix4d fields e gerado mosaico formando-se a área total de cada campo experimental. Na área B observou-se a presença de um fragmento de mata que foi utilizado como base para o cálculo do Fator C. A partir do valor de NDVI dessa área (0,091) foi realizada uma correlação com o Fator C (0,001) atribuído por Bertoni e Lombardi Neto (1990). Da mesma forma atribui-se valor de NDVI da estrada (0.001) ao Fator C de solo exposto (1) e obteve-se a equação:

$$\text{Fator } C = -1,11\text{NDVI} + 1,01$$

A partir dessa equação utilizando a calculadora raster obteve-se o Fator de Uso e ocupação do solo (C) apresentado na Figura 16.



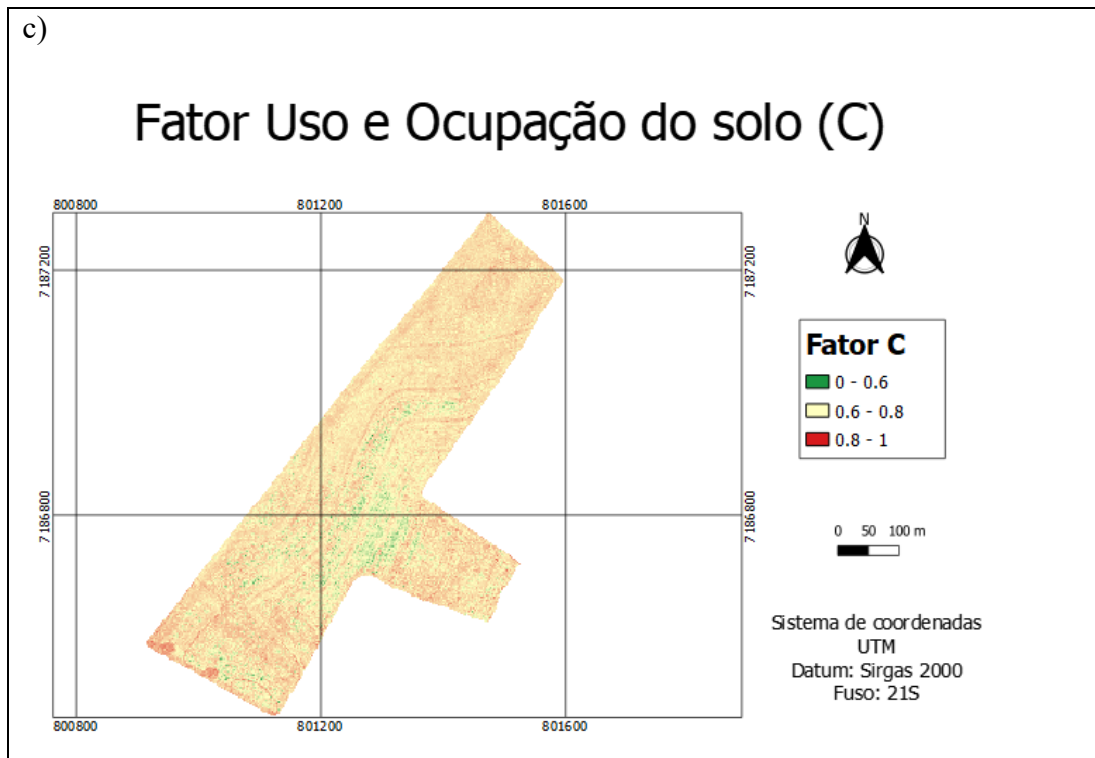


Figura 16: Mapa de uso e Ocupação do solo

Fonte: Autoria própria.

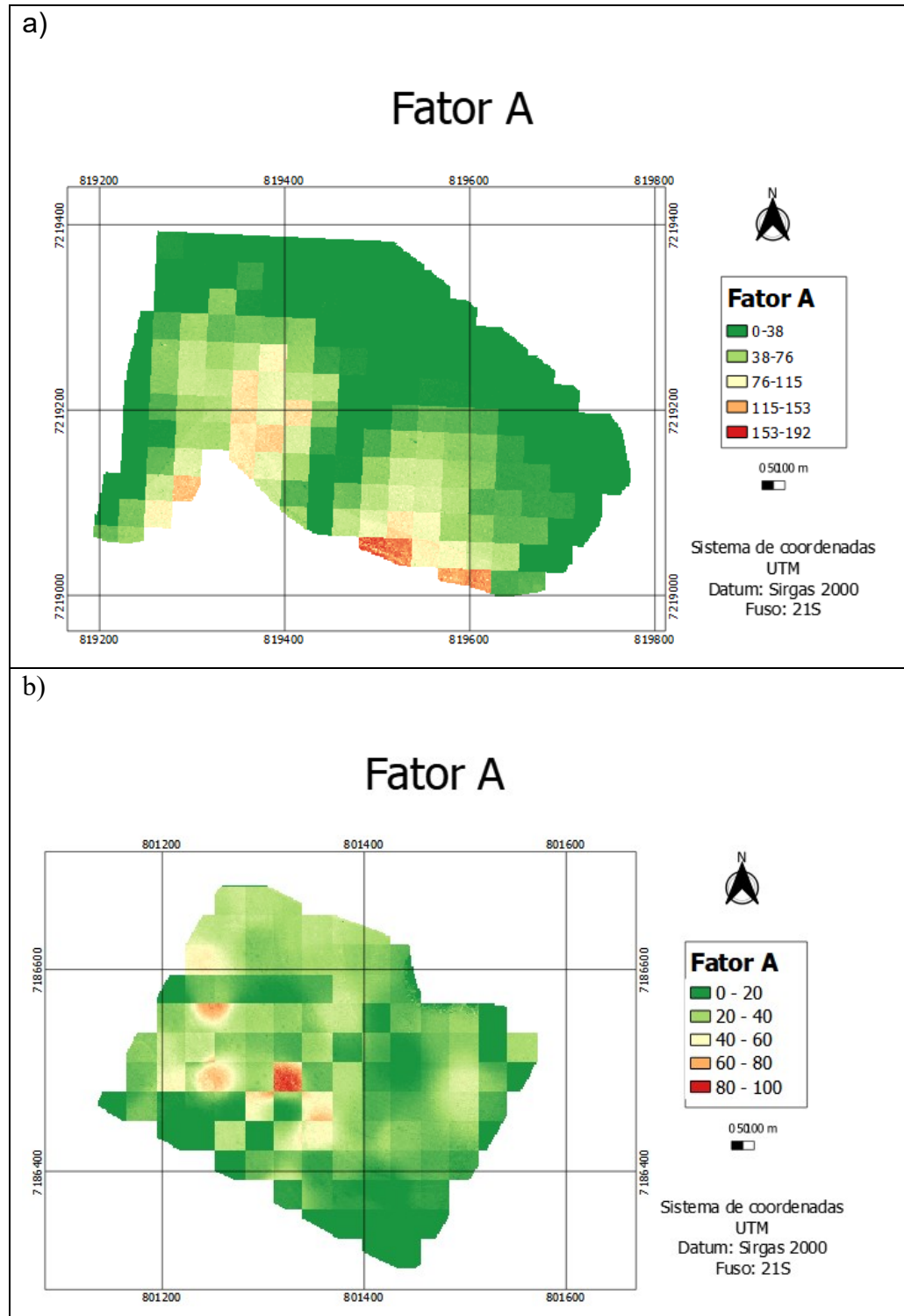
Conforme observado na Figura 16 os maiores valores estão associados a áreas que apresentam pouca ou nenhuma cobertura de solo representados pela cor vermelha. Já a cor amarela representa a presença de vegetação morta deixada pela pratica de plantio direto.

4.3.5 Praticas conservacionistas

Segundo Stein et al. (1987) os fatores C e P são trabalhados separadamente somente quando o objetivo do trabalho é definir formas mais adequadas de produção agrícola para a redução dos impactos gerados sobre o meio físico assim o mapa do Fator C foi multiplicado por meio da calculadora Raster pelo Fator P (0,5), conforme proposto por Bertoni e Lombardi Neto (1985) pela pratica de plantio direto.

4.4 ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO

Para obter a estimativa de perda de solo foram multiplicados todos os fatores calculados na etapa 4.3 gerando os mapas apresentados na Figura 17.



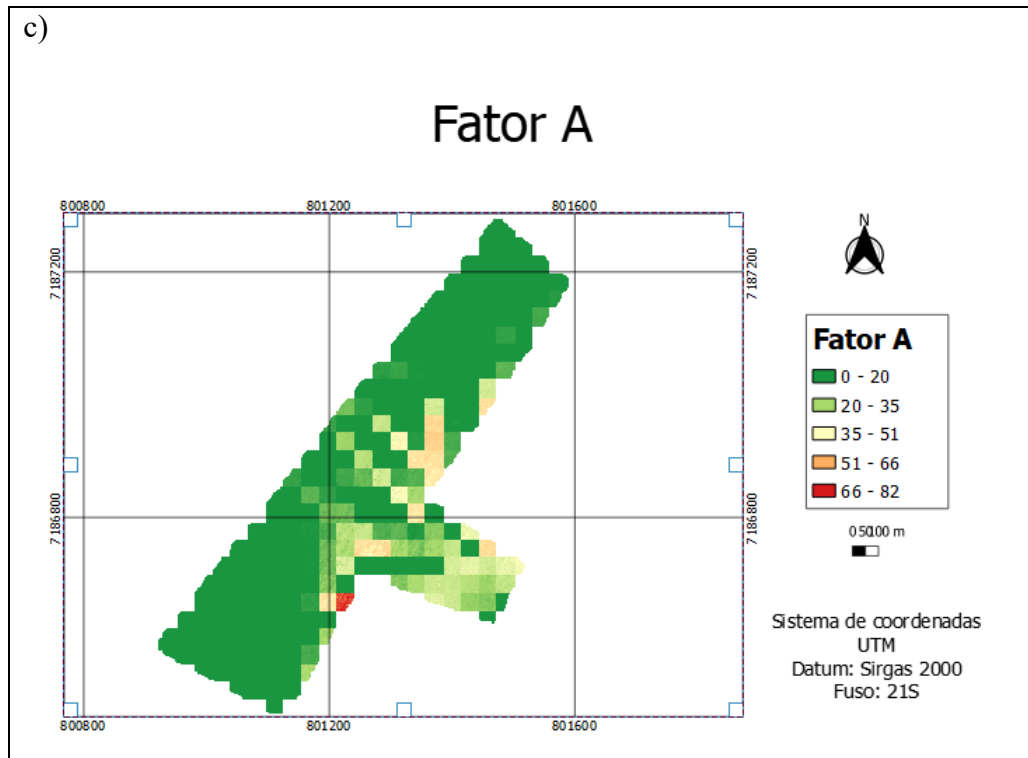


Figura 17: Estimativa de perda de solo

Fonte: Autoria própria.

Os valores estimados de perda de solo na área A variam de 0 a 192 t.ha⁻¹.ano⁻¹ enquanto na Áreas B e C os valores variam de 0 a 100 t.ha⁻¹.ano⁻¹ indicando uma perda de solo por erosão maior na área A. Analisando os mapas dos outros fatores da área A observa-se que os maiores valores encontram-se na região com maior declividade e quando comparado ao Fator LS os mapas são bastante semelhantes. Ainda comparando os mapas o Fator k também possui semelhança indicando que nesse caso além do Fator topográfico as características do solo contribuem para o carreamento de solo. Nas Áreas B e C como esperado os valores da estimativa de perda de solo são bastante próximos diferenciando-se pelo fator LS.

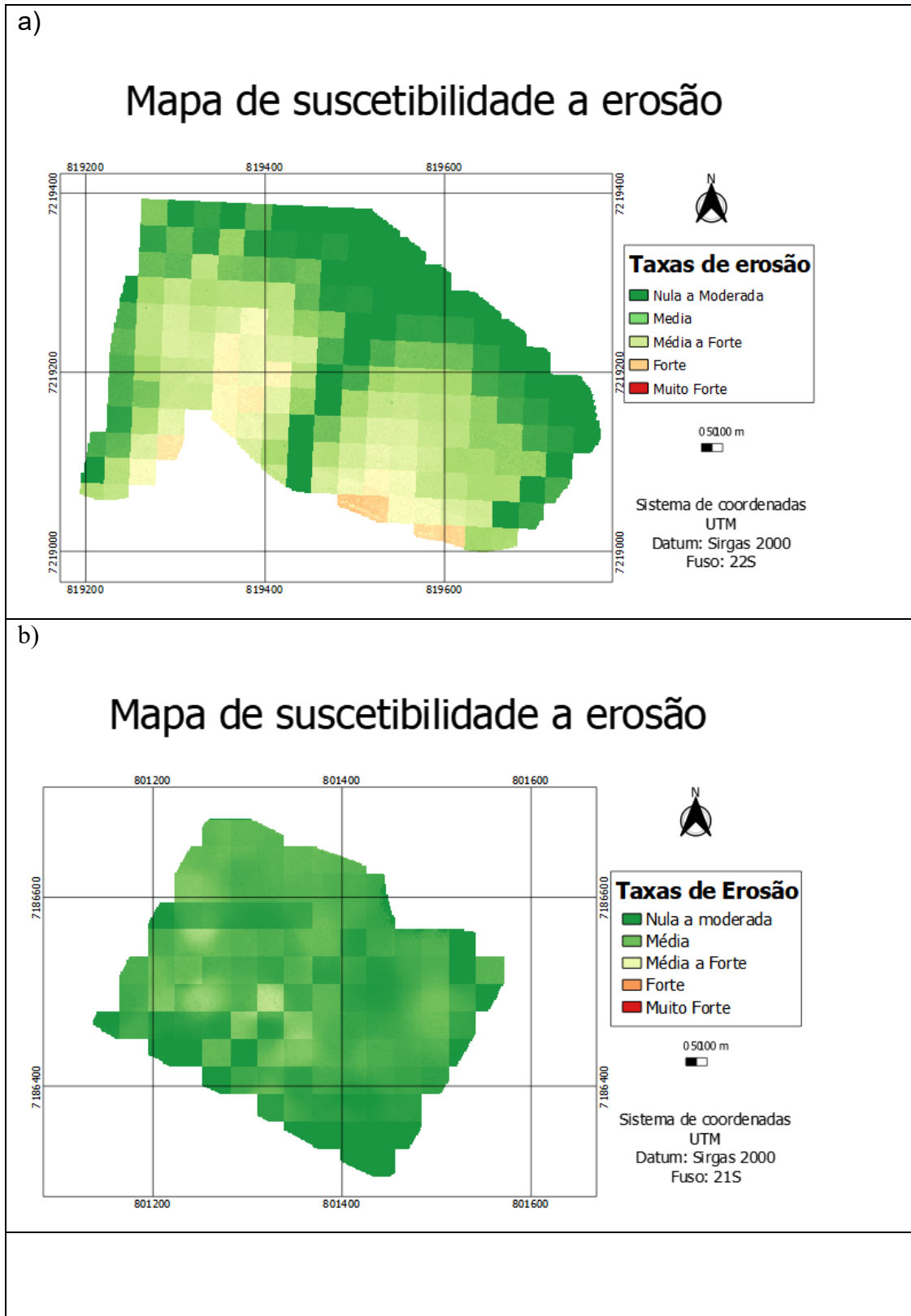
Após calcular a estimativa de perda de solo foi utilizada uma classificação proposta por Carvalho (2008) para classificar as taxas de erosão conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 : Classificação das taxas de erosão

Estimativa de perda de solo	Classes de erosão
<15	Nula a moderada
15 – 50	Média
50 – 120	Média a forte
120 – 200	Forte
>200	Muito forte

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

A fim de melhor visualizar a suscetibilidade a erosão nas áreas estudadas utilizou a tabela 8 para classificar o mapa da estimativa de perda de solo conforme apresentado na Figura 18.



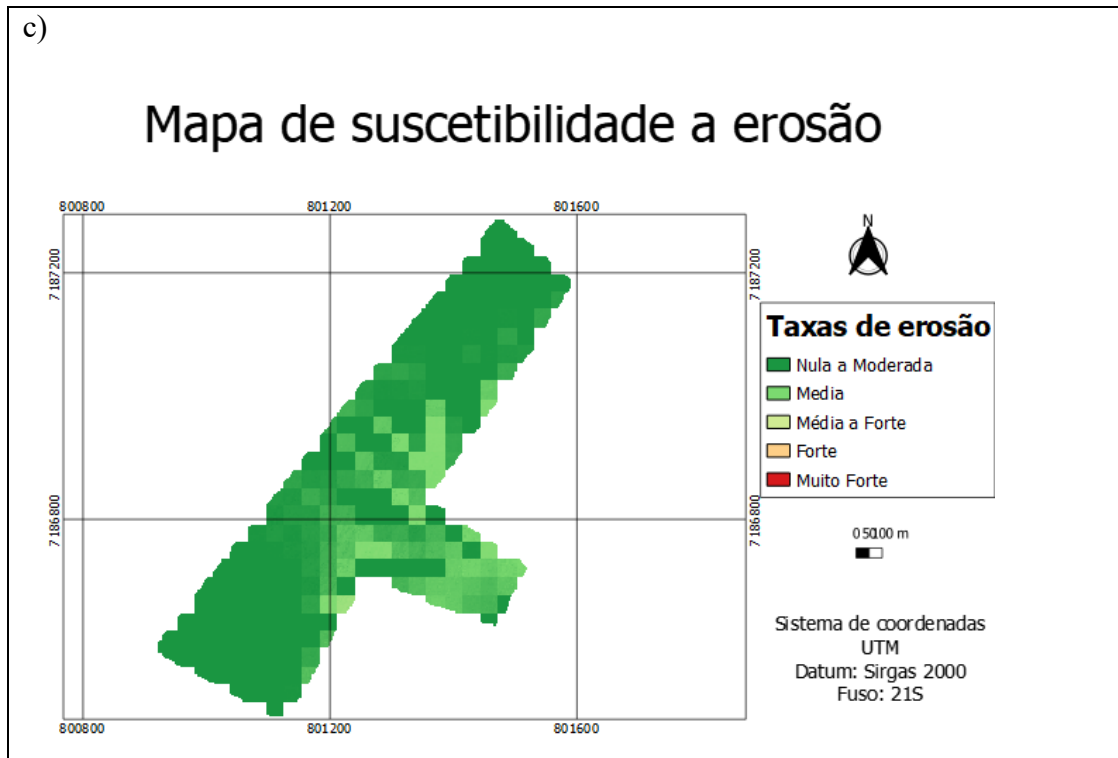


Figura 18: Mapa de suscetibilidade a erosão laminar

Fonte: Autoria própria.

Conforme já comentado a área A apresenta maior suscetibilidade a erosão que as áreas B e C, entretanto de maneira geral todas apresentam baixa suscetibilidade a erosão laminar. Tendo em vista que o fator de maior influência é a declividade é importante a utilização de algumas técnicas que minimizem o escoamento superficial.

De acordo com Zonta et al. (2012) as práticas conservacionistas dependem da localidade, das características de clima e solo da região, e do grau de degradação que o solo se encontra; entretanto, práticas corriqueiras, como a correção da fertilidade do solo e o plantio em curvas de nível, em solos com declividade, devem ser tidas como práticas obrigatórias.

5 CONCLUSÃO

A presente dissertação estimou a perda de solo por erosão laminar em áreas agrícolas da região oeste do Paraná a partir da utilização de geotecnologias e técnicas de AP e indicou que a maior parte da área estudada apresenta baixa estimativa de perda anual de solo.

O modelo utilizado para o cálculo foi a USLE e apesar dos resultados satisfatórios cabe destacar que o mesmo é recomendado para pequenas áreas, além disso seus parâmetros precisam ser aprimorados. No trabalho o fator erosividade não considera os processos de deposição de sedimentos e as perdas de solo em períodos chuvosos e secos não são ponderados em virtude da precipitação pluviométrica média utilizada nas equações, já o fator práticas conservacionistas se baseia em referências da literatura já que sofre influência de diversos elementos e é de difícil mensuração.

Por fim utilização da USLE, juntamente com o uso das geotecnologias e técnicas de AP, possibilitou identificar espacialmente os locais com maior e menor suscetibilidade a erosão, fornecendo assim subsídios para um planejamento conservacionista. Além disso através da análise das áreas mais suscetíveis observou-se que o fator com maior influência é o topográfico ressaltando a importância e a necessidade da adoção de técnicas conservacionistas a fim de minimizar as perdas de solo e reduzir impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, A.J. **Fator cobertura e manejo da Equação Universal de Perda de Solo para soja e trigo em um Cambissolo Húmico Alumínico submetido a diferentes sistemas de manejo.** Lages, 2006. 112 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) -Universidade do Estado de Santa Catarina, 2006.
- APARECIDO, L.E.O.; et al. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, 40, 405-417, Jul/Ago, 2016.
- ASCOUGH, J. C. et al. Soil Erosion Modeling and Conservation Planning. **Agronomy Monographs**, [s.l.], p.1-2, American Society of Agronomy and Crop Science Society of America, 2017.
- AUBERT, B. A.; SCHROEDER, A.; GRIMAUDDO, J. It as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. **Decision Support Systems**. [s.l.], p. 510-520. jul. 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923612001972?via=ihub>>. Acesso em: 28 jun. 2018.
- BERNARDI, A. C. C. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1, p.211-227, jan. 2015.
- BERTOLANI, F.C. & VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:987-995, 2001.
- BERRY, J.K., et al. Precision conservation for environmental sustainability. **Journal of Soil and Water Conservation**. v 58. n. 6. p. 332-339. nov. 2003.
- BERRY, J.K., et al. Applying spatial analysis for precision conservation across the landscape. **Journal of Soil and Water Conservation**. . v 60. n. 6. p. 363-370. 2005.
- BERTONI, J, et al. Equação de perdas de solo. **Boletim Técnico do Instituto Agronômico**, (21), 1975 25p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. Piracicaba. São Paulo, Livroceres. 392 p. 1985.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. São Paulo - SP: Ícone. 1990.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo, SP: Ícone, 2005.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8 ed. São Paulo, SP: Ícone, 2012.

BETZEK, N. M. **Módulos computacionais de análise geoestatística e retificação de zonas de manejo**. 2017. 101 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

BOUYOUCOS, G.J. The Clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 27, p. 738-741, 1935.

BRASIL. Divisão de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Topodata**: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. 2008. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

BRASIL. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento. **Agricultura de precisão: boletim técnico**. Brasília: MAPA/ACS, 2013. 31 p. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/boletim-tecnico-agricultura-de-precisao-2013.pdf>> Acesso em: 27-06-2018

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios Básicos em Geoprocessamento. In: ASSAD, E. D., SANO, E. E. Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura. 2. ed. Brasília, Embrapa-SPI; Embrapa-CPAC, 2003. p. 3-11.

CAMARGO, E. C. G; FUKS, S. D. (2001). Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G. **Geoprocessamento: teoria e aplicações**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>> Acesso em: jul. de 2004.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM – Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais, 600p. 2008.

CARVALHO, A. C. B.; RIBEIRO, C. B. M.; ROCHA, W. S. D. **Erosão potencial laminar hídrica sob três formas de cultivo**: Conceitos, modelos e aplicações. 2014.

CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Sistema plantio direto: evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. **Tópicos em Ciência do Solo**. 19. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 333-365. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/127938/1/SP-15419.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2019.

CASSOL, E. A.; ELTZ, F. L. F.; LEMOS, A. M. de; LIMA, V. S.; BUENO, A. C. Erosividade, Padrões Hidrológicos, Período de Retorno e Probabilidade de Ocorrência das Chuvas em São Borja, RS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n.3, p. 1239-1251, 2008.

CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. Reforço contra a erosão. *Cultivar Máquinas*, v. 35, p. 10-13, 2004.

CHECCHIA, T. **Avaliação de Perda de Solo por Erosão Hídrica e Estudo de Emergia na Bacia do Rio Caeté, Alfredo Wagner - Santa Catarina**. Dissertação Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2005.

CORADO NETO, F. C. et al. **Variabilidade Espacial da Resistência à Penetração em Neossolo Litólico Degradado**. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* [online]. 2015, vol.39, n.5, pp.1353-1361. ISSN 0100-0683.

CORRÊA, A. D. **Estudo da erodibilidade de uma unidade geotécnica no campo de instrução de santa maria como base para o seu planejamento ambiental**. 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CORRECHEL, Vladia. **Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica de análise da redistribuição do "Fallout" do Cs137**. 2003. 99 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciências, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

COSTA, F. H. S. **Modelagem espaço temporal do uso do solo e potencial de erosão no Vale do Ribeira**. 2008. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

DALMOLIN, R. S. D. et al. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, abr. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-

84782005000200042&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 21 Apr. 2020.
<https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000200042>.

DELGADO, J.A., BERRY, J.K. Advances in precision conservation. **Advances in Agronomy** p. 1-44. 2008.

DEMARCHI, J C; ZIMBACK, C R L. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do ribeirão das Perobas. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 29, n. 2, p. 102-114, abr. 2014.

DEMATTE, J. A. M.; et al. Precision agriculture for sugarcane management: a strategy applied for Brazilian conditions. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 36, n. 1, p. 111, 2014.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 113 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Erosão e práticas mecânicas e vegetativas de conservação do solo em sistema de plantio direto. In FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. (Org) **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. 2ª ed. Guarapuava: Fundação Agrária de pesquisa Agropecuária, 2009.

DIAS, C. **Estudo revela que 30% dos solos do mundo estão degradados**. EMBRAPA: 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/14343883/estudo-revela-que-30-dos-solos-do-mundo-estao-degradados>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

EDUARDO, E N. **Determinação da erodibilidade e do fator de cobertura e manejo do solo sob condições de chuva natural e simulada**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**, 2 ed., Rio de Janeiro, 212p. 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 306 p. 2006.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solo. Rio de Janeiro: CNPSO, 2013, 412 p.

FAO. **Healthy soils are the basis for healthy food production**. Roma: FAO, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/en/c/277682/>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

FENDRICH, R. Erosão Urbana. In: Drenagem e Controle da Erosão Urbana. Curitiba: Champagnot, 1997. 17-52p.

FERGUSON, R. B.; HERGERT, G. W. Soil Sampling for Precision Agriculture. **Precision Agriculture**, p. 1-4, 2009.

FERREIRA, A. O. et al. Influência da Declividade e de níveis de cobertura do solo no processo de erosão com chuva simulada. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.5, n.5, p.182-190, 2010.

FONELOS, L.F., NEVES, S.M.A.S. Uso de modelos digitais de elevação (MDE) gerados a partir de imagens de radar interferométrico (SRTM) na estimativa de perdas de solo. **Anais 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 182-191, 2016.

FRANZEN, D. W.; HOPKINS, D. H.; SWEENEY, M. D.; ULMER, M. K.; HALVORSON, A. D. of Site-Specific Nitrogen Management. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 381-389, 2002.

FRONZA, F. L. **Determinação do potencial erosivo do solo nas bacias dos rios São Francisco Falso e São Francisco Verdadeiro, região oeste do estado do Paraná**. 2019. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, UTFPR, Medianeira, 2019

GUEDES FILHO, O. et al. Saptial and temporal variability of crop yield and Rhodic Hapluodox properties underno-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 1-14, 2010.

GALDINO, S. et al. **Modelagem espacial da erosão do solo para diferentes usos da terra em áreas cultivadas com seringueiras em sub-bacias do noroeste do Estado de São Paulo**. Campinas: Embrapa Monitoramento Por Satélite, 2017.

GOULART, A. G. et al. Influência do relevo, cobertura vegetal e atributos do solo para a ocorrência de processos erosivos no município de São Francisco de Assis (RS). In: SINAGEO, 11. 2016, Maringá. **Anais**. Maringá: Sinageo, 2016. p. 11 - 12. Disponível em: <<http://www.sinageo.org.br/2016/index.html>>. Acesso em: 24 out. 2018.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. **Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão**. [s.i]: Embrapa, 2015.

GRILO, R. C.; ENAMI, L. Gestão de bacias hidrográficas com o uso de modelo preditivo de erosão dos solos e sistemas de informação geográfica. **Unar**, Araras, Sp, v. 2, n. 1, p.21-33, jan. 2008.

GUERRA, J.T. O Início do Processo Erosivo. In: GUERRA, J.T; SILVA, A.S; BOTELHO, R.G.M (org). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo in **Erosão e conservação dos solos**, p. 17-55. R. Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

GUIMARÃES, E.C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 77p.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. In: BERNARDI, Alberto Carlos de Campos et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. Cap. 1. p. 21-33. Disponível em: <file:///C:/Users/asusp/Downloads/Agricultura-de-precisao-2014 (3).pdf>. Acesso em: 27 jun. 2018.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Orientações para o combate á erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Peixe – Paranapanema**. Vol. 6. São Paulo, SP, 1986.

JENDRZIKOWSKI, R. D. **Técnicas de Agricultura de precisão na obtenção de dados altimétricos para planejamento conservacionista do solo e da água**. 2018. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agricultura de Precisão, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

KARABURUN, A. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. **Ozean Journal Of Applied Sciences**. **Buyukcekmece**, p. 77-85. mar. 2010. Disponível em: <https://www.academia.edu/408871/Estimation_of_C_Factor_for_Soil_Erosion_Modeling_Using_NDVI_In_Buyukcekmece_Watershed>. Acesso em: 10 abr. 2019.

KITCHEN, N. R., K. A. et al. Development of a conservation-oriented precision agriculture system: Crop production assessment and plan implementation. **Journal Soil and Water Conservation**. v. 60, n .6, p 421-430, nov. 2005.

KNOB, M. J. Aplicação de técnicas de agricultura de precisão em pequenas propriedades. 2006. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2006.

LIMA, E. R. V. **Erosão do solo: fatores condicionantes e modelagem matemática**. João Pessoa: Logepa, 2003.

LIMA, F. R V.et al . Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Rev. Caatinga**, Mossoró , v. 28, n. 4, p. 53-63, dez. 2015. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-21252015000400053&lng=pt&nrm=iso>. acesso em 30 nov. 2018.

LIMA, J. M. CURI, N; RESENDE, M.; SANTANA, D. P> Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.14, n.1, p.85-90, 1990.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. **Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP)**. In: Bragantia. v. 51 n. 2. Campinas – SP. 1992.

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, P.; MEDEIROS, L.R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002. Disponível em: <<http://edueojs.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2374/1787>>. Acesso em: 16 nov. 2018.

MACHADO, D. O. Erosividade da chuva para o bioma Pantanal. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 19, n. 2, p.195-201, jun. 2014.

MAFRA, N. M. C. **Erosão e planificação de uso do solo**. In GUERRA, J T.; SILVA, A. S. BOTELHO, R. G. M. Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. 6 ed. Rio de Janeiro: [s.n.] Cap.9, p. 301-322, 2010.

MAIATO, A. G. T. **O papel da Agricultura de conservação na luta contra a erosão do solo em particular em Angola**. 2016. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Agrônômica, Universidade de Évora, Évora, 2016. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/19167/1/Adelaide%20vers%C3%A3o%20FINAL%20final%20final2%20AdeMC_corrigeo.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2018.

MARASCA, I.; et al. Geoestatística aplicada na determinação da compactação do solo no cultivo da cana-de-açúcar. *Revista de Agricultura Neotropical*, Cassilândia-MS, v. 4, n. 2, p. 49-55, abr./jun. 2017.

MARQUES, J. F.; PEREIRA, L. C.; LOMBARDI NETO, F. Perdas de solo e valoração econômica. *Revista Científica Rural*, Bagé, v. 10, n. 1, p. 48-53, 2005.

MARTINS FILHO, M. V.; LICCIOTI, T. T.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J. SANCHEZ, R. B. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar, *Engenharia Agrícola*. Jaboticabal, v.29, n.1, p.8-18, jan./mar. 2009.

MARTINS, J. C.; FERNANDES, R.. **Processos de degradação do solo – medidas de prevenção.** Iniav, 2017. 3 p. Disponível em: <http://www.iniav.pt/fotos/editor2/processos_de_degradacao_do_solo.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2018.

MCCONNELL, M.; BURGER, L. W.. Precision conservation: A geospatial decision support tool for optimizing conservation and profitability in agricultural landscapes. *Journal Of Soil And Water Conservation*, [s.l.], v. 66, n. 6, p.347-354, 1 nov. 2011.

MENESES, P. R. e ALMEIDA T. de., **Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto.** Universidade de Brasília – UNB. Brasília. 2012.

MICHELON, G. K; BAZZI, C. L; UPADHYAYA, S; SOUZA, E. G. de; MAGALHÃES, P. S. G.; BORGES, L. F; SCHENATTO, K; SOBJAK, R.; GAVIOLI, A.; BETZEK, N. M. Software AgDataBox-Map to precision agriculture management. *Softwarex*, [s.l.], v. 10, p. 100320, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.softx.2019.100320>.

MIQUELONI, D. P., GIANELLO, E. M., BUENO, C. R. P., Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Tropical* [en línea] 2015, 45 (Enero-Marzo) : [Fecha de consulta: 18 de septiembre de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=253038430001>> ISSN 1517-6398

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Disponível em: <<http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Agricultura-de-precisao-DEG.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

NUNES, José Luis da Silva. **Agricultura de Precisão.** 2016. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao_361504.html>. Acesso em: 30 jun. 2018.

OLIVEIRA, F. F.; SANTOS, R. E. S.; ARAUJO, R. C. Processos erosivos: dinâmica, agentes causadores e fatores condicionantes. **Rev. Bras. de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 5, n. 3, p.60-83, abr. 2018.

OLIVEIRA, D. P. de. et al. Microrrelevo e a distribuição de frações granulométricas em Cambissolos de origem calcária. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 44, n. 4, p. 676-684, 2013.

PASQUATTO, M. C.; TOMAZONI, J. C. Estudo do processo erosivo laminar na bacia de captação do rio Barro Preto, em Coronel Vivida – PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 555-570, 2016.

PEREIRA, L. S.; SILVA, D. O.; PAMBOUKIAN, S. V. D. **Sensoriamento remoto aplicado à agricultura de precisão no cultivo de bambu** Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 8-33, 2016

PEREIRA, J. S. **Avaliação das perdas de solos por erosão laminar na área de influência da UHE Amador aguiar I**. 2014. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

PEREIRA, V. P.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. **Solos altamente susceptíveis à erosão. Jaboticabal**: FCAV-UNESP/SBCS, 1994.

QGIS. **Descubra o QGIS**. 2019. Disponível em: <https://www.qgis.org/pt_BR/site/about/index.html> Acesso em 13 mar 2019.

RESENDE, A. V.; et al. Agricultura de precisão no Brasil: avanços, dificuldades e impactos no manejo e conservação do solo, segurança alimentar e sustentabilidade. In: Reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água, 18., 2010, Teresina. **Novos caminhos para agricultura conservacionista no Brasil: anais**. Teresina: Embrapa, 2010. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/29842/1/Agricultura-precisao.pdf>> Acesso em: 01 jul 2018.

RIDENTE JUNIOR, J. L. **Metodologia de prevenção a erosão. Tópico: Erosão urbana**. Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos – ENES, 5. São Paulo, 2002.

ROSA, R. **Introdução ao geoprocessamento**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

RSTUDIO. Take control of your R code. 2019 Disponível em: <<https://www.rstudio.com/products/rstudio/>> Acesso em 10 mar 2019.

RUBIRA, F. G.; MELO, G. V.; OLIVEIRA, F. K. S.. Proposta de padronização dos conceitos de erosão em ambientes úmidos de encosta. **Revista de Geografia**, Recife, v. 33, n. 1, p.168-193, jun. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311972239_Proposta_de_padronizacao_dos_conceitos_de_erosao_em_ambientes_umidos_de_encosta>. Acesso em: 26 out. 2018.

SALOMÃO, F. X. T. **Controle e prevenção dos processos erosivos**. In: GUERRA, A. J.T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org) Erosão e conservação dos solos: temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

SAATH, K, C. O; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, Brasília , v. 56, n. 2, p. 195-212, June 2018 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032018000200195&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 13 mar. 2020. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>.

SCHULTZ, N. et al. O conhecimento dos solos. In: **Solos e Sociedade**. Boletim Informativo, n. 3, v. 39, 2014. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (SBCS), p. 26-51, 2014.

SCHUMACHER, J. A., KASPAR, T. C., RITCHIE, J. C., SCHUMACHER, T. E., KARLEN, D. L., VENTRIS, E. R., MCCARTY, G. M., COLVIN, T. S., JAYNES, D. B., LINDSTROM, M.J., FENTON, T. E. (2005). Identifying spatial patterns of erosion for use in precision conservation. **Soil Water Conseru.** 62, 355-362.

SENA, J. N. **O uso de sistema de informação geográfica na avaliação de diferentes alternativas de geração de cartas de suscetibilidade à erosão**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

SHIRATSUCHI, L. S. et al. Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão. In: BERNARDI, Alberto Carlos de Campos et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 58-73. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114687/1/Agricultura-de-precisao-cap.4.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2018

SILVA, L. F. S. et al. **Métodos indiretos de estimativa da erodibilidade de um Latossolo vermelho da região de Campinas, SP**. Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente, Campinas, v. 1, n. 1, p.1-8, jul. 2016

SILVA, W. S. A. et al. Análise espaço-temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para o município de Belém do São Francisco – PE. In: CONIDIS, 1., 2016, Campina Grande. **Anais**. Campina Grande: PB, 2016. p. 1-11.

SILVA JÚNIOR, J. F. **Simulação geostatística e classificação numérica para o delineamento de unidade de mapeamento de atributos e erosão do solo**. 2014. 111 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2014.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. *Bragantia*, Campinas, v. 67, n. 2, p. 693-699, 2008.

SOUZA, Z. M. et al. **Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho Amarelo eutroférico sob cultivo de cana de açúcar**. *Engenharia Agrícola*, v. 24, n. 02. p. 309-319, 2004.

STEIN, D. P.; DONZELLI, P. L.; GIMENEZ, F. A.; PONÇANO, E. L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de Erosão Laminar, Natural e Antrópica na Bacia do Peixe- Paranapanema. In: Simpósio nacional de controle de erosão, 4., 1987, Marília. **Anais...** Marília: ABGE/DAEE, 1987.

STURARO, J. R. **APOSTILA DE GEOESTATÍSTICA BÁSICA**. Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada - Igce, 2015.

TOMAZONI et al. **A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do rio Anta Gorda (PR)**. *Estudos Geográficos* 3, p. 01-21, 2005.

TORMENA, C. A.; BARBOZA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Revista Scientia Agricola**, São Paulo, v.59, n.4, p.795-801. 2002

TOMER, M. D. et al. Combining precision conservation technologies into a flexible framework to facilitate agricultural watershed planning. **Journal Of Soil And Water Conservation**, [s.l.], v. 68, n. 5, p.113-120, 23 ago. 2013.

TÔSTO, S. G.; PEREIRA, L. C.; TÔSTO, K. L. Zoneamento da erosão do solo como instrumento de planejamento ambiental. In: SEABRA, G. (Org.). **Terra: qualidade de vida, mobilidade e segurança nas cidades**. João Pessoa, PB: Editora da UFPB, 2013. p. 902-910.

TREVISAN, R. G.; MOLIN, J. P.. **Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para Agricultura de Precisão**. Piracicaba: Laboratório de Agricultura de Precisão, 2014.

TRINDADE, A. L. F. ET AL. **Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. Pesquisa agropecuária brasileira**, [S.L.], v. 51, n. 12, p.1918-1928, dez. 2016.

VALENTIN, E. F. D. **Modelagem dinâmica de perdas de solo: o caso do alto curso da bacia hidrográfica do rio descoberto - DF/GO**. 2008. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

WALTRICK, P. C., ET AL. **Erosividade de chuvas no estado do Paraná: atualização e Influência dos eventos “el niño” e “la niña”** Curitiba: DSEA, 2011. 20 p.

WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R.C.; BABATA, M. M; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 28, Supplement1, p. 256-265, 2012.

WIEGAND, M. C.; PIEDRA, J. I. G.; ARAUJO, J. C. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.415-424, jun. 2016.

WISCHMEIER, W.H. JOHNSON, C.B.; CROSS, B.W. A soil erodibility nomograph for farmland and constructions sites. **Journal of Soil and Water Conservation**. v.26, n.5, p.189-193, 1971

WISCHMEIER, W. H.; D. D. SMITH. **Predicting rainfall-erosion losses**: a guide to conservation planning. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 537. Estados Unidos da América (EUA), 1978.

WOLLENHAUPT. N. C.; WOLKOWSKI. R. P.; CLAYTON. M. K. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. **Journal of Production Agriculture**, v. 7, p. 441-448. 1994.

ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. (Tese de Livre-Docência). 114p. Botucatu, FCA/UNESP, 2001.

ZONTA, J. H. et al. Efeito da Aplicação Sucessiva de Precipitações pluviais com Diferentes Perfis na Taxa de Infiltração de Água no Solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 36:377-388, 2012.