

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

CIRILO DE FREITAS NETTO

**PROJEÇÕES DA PERDA DE SOLO NO ESTADO DO PARANÁ AO LONGO DO
SÉCULO XXI, POR MEIO DA SIMULAÇÃO DA EROSIVIDADE EM CENÁRIOS DE
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**PONTA GROSSA
2017**

CIRILO DE FREITAS NETTO

**PROJEÇÕES DA PERDA DE SOLO NO ESTADO DO PARANÁ AO LONGO DO
SÉCULO XXI, POR MEIO DA SIMULAÇÃO DA EROSIVIDADE EM CENÁRIOS DE
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de Concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens F.^o

PONTA GROSSA

2017

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

Netto, Cirilo de Freitas
N474 Projeções da perda de solo no Estado do Paraná ao longo do século XXI, por meio da simulação da erosividade em cenários de mudanças climáticas/ Cirilo de Freitas Netto. Ponta Grossa, 2017.
87f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho.

1.Erosão hídrica. 2.Erosividade.
3.Perda de solo. 4.Mudanças climáticas.
I.Virgens Filho, Jorim Sousa das. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. T.

CDD: 631.45



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: "Projeções da Perda de Solo no Estado do Paraná ao longo do Século XXI, por meio da Simulação da Erosividade em Cenários de Mudanças Climáticas"

Nome: **Cirilo de Freitas Netto**

Orientador: **Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Dr. Rodrigo Yoiti Tsukahara
Fundação ABC

Prof. Dr. Luiz Carlos Godoy
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Ponta Grossa, 31 de maio de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por conceder-me tamanha graça, e oportunidades de trilhar esta jornada, iluminando meu caminho todos os dias.

A minha família, meus pais Arlei e Lealiz que até hoje priorizam o amor, a educação e os valores morais para seus filhos; minha esposa Regina e minha filha Sophia, que com paciência e alegria me contagiam; minha irmã Juliana, que me ensinou a tolerância. Aos meus tios Jeferson e Aline que sempre apoiaram meus estudos e trabalhos na cidade de Ponta Grossa. Ao meu primo Jeferson, que sempre esteve ao meu lado motivando e apoiando.

Ao professor Jorim pela amizade de uma vida e forte apoio nos trabalhos, bem como ensinamentos e orientação em momentos críticos.

Ao Laboratório de Mecanização Agrícola – LAMA, em especial ao professor Pedro que sempre esteve à disposição para ajudar nas atividades e conceder espaço para os trabalhos.

À Gabriela e ao Bruno pela paciência, suporte e agilidade na efetivação dos trabalhos.

À Lorena que permitiu que seu trabalho fosse base para nossos estudos.

À engenheira Jocely Maria Thomazoni Loyola, que me orientou na busca por um novo desafio.

Ao diretor da Sanepar, Luciano Valério Bello Machado e ao diretor da Cohapar, Roberto Erzinger pelo apoio no desenvolvimento desta jornada.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, à CAPES e ao CNPQ que oportunizaram o curso de mestrado.

RESUMO

A perda de solo por erosão hídrica afeta o desenvolvimento regional significativamente, gerando prejuízos extensos no campo e na cidade. Sendo assim o objetivo deste trabalho foi estimar e projetar a erosividade nas mesoregiões do estado do Paraná até o ano de 2100, bem como simular a perda de solo em microbacias hidrográficas com usos distintos. Foram utilizados dados pluviométricos de 28 estações meteorológicas espalhadas pelo estado, o que possibilitou a simulação de precipitações diárias que, por sua vez, foram utilizadas no método pluviométrico de estimativa da erosividade pluvial até 2100, considerando dois cenários futuros condicionados ao aumento da temperatura global. A partir dos valores de erosividade foram estimados dados para perda de solo em duas sub-bacias com usos distintos, uma onde predomina a atividade agrícola e outra, ocupada na maior parte por mata nativa e reflorestamento. Verificou-se a grande variação na estimativa de erosividade da chuva nos diversos locais do estado, tanto no primeiro como no segundo cenário, apresentando respectivamente o mínimo de $6.157,15 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o município de Telêmaco Borba e valor máximo de $17.522,30 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no município de Francisco Beltrão, ao final do século XXI. Enquanto os valores médios para perda de solo nas sub-bacias onde predominam a agricultura e mata nativa foram, respectivamente, $1,17 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $51,06 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ para o cenário mais drástico, até 2100. A análise dos dados obtidos permitiu avaliar que a erosividade no estado do Paraná, atingirá um valor crítico na região sudoeste e tende à decrescer do oeste para o leste, sendo na planície costeira, limitada ao leste pelo oceano atlântico, o aumento da erosividade será significativo em consequência das condições climáticas localmente diferenciadas, além de um estudo local apontar a grande variação na perda de solo em microbacias da mesma região devido à complexidade dos fatores causais.

Palavras-chave: erosão hídrica – erosividade – perda de solo – mudanças climáticas.

ABSTRACT

Soil loss due to water erosion affects regional development significantly, resulting in extensive losses in the countryside and in the city. Therefore, the objective of this work to estimate and project erosivity in the various regions of the state of Paraná up to the year 2100, as well as to simulate the loss of soil in watersheds with different uses. Rainfall data from 28 meteorological stations scattered throughout the state were used, which allowed for the simulation of daily rainfall, which were used in the pluviometric method to estimate the rainfall erosivity up to 2100, considering two future scenarios conditioned to the global temperature increase. From the values of erosivity, the possibility of estimating and also designing data for soil loss in two watershed with different uses is opened, one where agricultural activity predominates and another, mostly occupied by native forest and reforestation. It was verified the great variation in rainfall erosivity estimation in the different sites of the state, both in the first and in the second scenario, presenting respectively the minimum of 6,157.15 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ for the weather station of Telemaco Borba and maximum value of 17,522.30 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ in the weather station of Francisco Beltrão, at the end of the 21st century. While the average values for soil loss in the sub-basins where agriculture and native forest predominate were, respectively, 1.17 t.ha⁻¹.ano⁻¹ and 51.06 t.ha⁻¹.ano⁻¹ for a more drastic scenario, until 2100. The analysis of the data allowed to evaluate that the erosivity in the state of Paraná will reach a critical value in the southwest region and tends to decrease from the west to the east, being in the coastal plain. The increase of erosivity will be significant as a consequence of the locally differentiated climatic conditions, besides a local study to point out the great variation in the loss of soil in microcatchments of the same region due to the complexity of the causal factors.

Keywords: erosion - erosivity - soil loss - climate change.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO I

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Esquema mostrando o processo de erosão pela gota de chuva | 19 |
| Figura 1.2 – Mapa climático do Paraná | 29 |
| Figura 1.3 – Mapa do estado do Paraná com a localização das estações pluviométricas onde os dados foram coletados | 29 |
| Figura 1.4 – Mapa da erosividade anual estimada para o estado do Paraná, no período de 1980 à 2009 | 36 |
| Figura 1.5 – Evolução da erosividade média estimada ao final dos períodos, para um cenário com aumento da temperatura global em 1,7°C | 41 |
| Figura 1.6 - Evolução da erosividade média estimada ao final dos períodos, para um cenário com aumento da temperatura global em 4,8°C | 42 |

CAPÍTULO II

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio São João | 56 |
| Figura 2.2 – Posição da sub-bacias constituintes da bacia hidrográfica do rio São João | 57 |
| Figura 2.3 - Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio São João, com destaque para as sub-bacias1 e 2 | 60 |
| Figura 2.4 – Mapa de declividade das sub-bacias 01 e 02 | 63 |
| Figura 2.5 - Mapa do fator topográfico da bacia hidrográfica do rio São João, com destaque para as sub-bacias1 e 2 | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.6 – Mapa de uso e ocupação do solo nas sub-bacias constituintes da bacia hidrográfica do rio São João, no ano de 2013 | 70 |
| Figura 2.7 – Mapa perda de solo atual nas sub-bacias 01 e 02 | 72 |
| Figura 2.8 – Variação da perda de solo para a sub-bacia 01, com aumento da temperatura global em 1,7°C até 2100 | 75 |
| Figura 2.9 – Variação da perda de solo para a sub-bacia 01, com aumento da temperatura global em 4,8°C até 2100 | 77 |
| Figura 2.10 – Variação da perda de solo para a sub-bacia 02, com aumento da temperatura global em 1,7°C até 2100 | 78 |
| Figura 2.11 – Variação da perda de solo para a sub-bacia 02, com aumento da temperatura global em 4,8°C até 2100 | 79 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

| | |
|---|----|
| Tabela 1.1 - Estimativa da erosividade da chuva nas diversas localidades do Paraná, para o período de 1980 à 2009 | 35 |
|---|----|

CAPÍTULO II

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 - Classificação do índice de erosividade da chuva | 59 |
| Tabela 2.2 - Classificação do índice de erodibilidade do solo | 61 |
| Tabela 2.3 – Classificação do fator LS de acordo com a fragilidade à do terreno e percentuais nas respectivas sub-bacias | 63 |
| Tabela 2.4 – Valores de C para as classes de uso do solo e ocorrência nas respectivas sub-bacias | 64 |
| Tabela 2.5 – Classes do fator topográfico e sua ocorrência nas sub-bacias 1 e 2 | 68 |
| Tabela 2.6 – Valores do para o fator de cobertura de solo e sua ocorrência nas sub-bacias 1 e 2 | 70 |
| Tabela 2.7 – Classes de perda de solo | 71 |
| Tabela 2.8 – Perda de solo atual estimada, para sub-bacias 01 e 02 | 71 |
| Tabela 2.9 – Perda de solo estimada até 2100, considerando os cenários com aumento de 1,7°C e 4,8°C para sub-bacias 01 | 73 |
| Tabela 2.10 – Perda de solo estimada até 2100, considerando os cenários com aumento de 1,7°C e 4,8°C para sub-bacias 02 | 73 |

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO I

| | |
|---|----|
| Quadro 1.1 – Equações de correlação utilizadas para cada município de origem dos dados considerados | 32 |
|---|----|

CAPÍTULO II

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1 - Valores de erodibilidade, em $t.ha^{-1}.h.mm^{-1}.ha.MJ^{-1}$, para os solos encontrados nas sub-bacias 01 e 02 | 61 |
|---|----|

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO I

| | |
|--|----|
| Gráfico 1.1 – Distribuição da erosividade da chuva no estado do Paraná, durante os meses do ano, no período de 1980 à 2009 | 37 |
| Gráfico 1.2 – Erosividade no final dos períodos para o município de Quedas do Iguaçu | 39 |
| Gráfico 1.3 – Erosividade no final dos períodos para o município de Londrina ... | 39 |
| Gráfico 1.4 – Erosividade no final dos períodos para o município de Cerro Azul... | 40 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|------------------|--|
| A | Perda de solo |
| C | Fator de cobertura de solo |
| COP | Conferência das Partes |
| USLE | Equação Universal da Perda de Solo |
| EI ₃₀ | Índice de erosividade |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IAPAR | Instituto Agrônômico do Paraná |
| Ipardes | Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social |
| IPCC | International Panel of Climate Change |
| K | Erodibilidade do solo |
| LS | Fator topográfico |
| OMM | Organização Meteorológica Mundial |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| P | Fator de medidas preservacionistas na bacia hidrográfica |
| PNUMA | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente |
| R | Erosividade da chuva |
| Rc | Coeficiente de chuva ou Coeficiente de Fournier |
| SIG | Sistema de Informações Georreferenciadas |
| UE | União Europeia |
| UEPG | Universidade Estadual de Ponta Grossa |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| INTRODUÇÃO | 14 |
| CAPÍTULO 1 - ANÁLISE DE EROSIVIDADE NO ESTADO DO PARANÁ AO LONGO DO SÉCULO XXI | 16 |
| 1 Introdução | 16 |
| 1.1 Equação Universal da Perda de Solo – USLE | 17 |
| 1.2 Erosividade da chuva | 18 |
| 1.3 Trabalhos internacionais sobre a erosividade da chuva | 20 |
| 1.4 Estudos de erosividade no estado do Paraná | 22 |
| 1.5 Mudanças climáticas | 23 |
| 2 Materiais e métodos | 26 |
| 2.1 Caracterização da área de estudo | 26 |
| 2.2 Estimativa da erosividade | 27 |
| 2.3 Base de dados | 28 |
| 2.4 Simulação de dados até 2100 | 30 |
| 3 Resultados e discussão | 33 |
| 4 Conclusão | 43 |
| 5 Referências bibliográficas | 44 |
| CAPÍTULO 2 – PROJEÇÕES DE PERDA DE SOLO EM SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS COM USOS DISTINTOS | 49 |
| 1 Introdução | 49 |
| 2 Materiais e métodos | 56 |
| 2.1 Caracterização da área de estudo | 56 |
| 2.2 Erosividade da chuva (R) | 58 |
| 2.3 Erodibilidade do solo (K) | 59 |
| 2.4 Fator topográfico (LS) | 61 |
| 2.5 Uso do solo (C) | 64 |
| 2.6 Medidas conservacionistas (P) | 64 |
| 2.7 Perda de solo (A) | 65 |
| 2.7.1 Projeções de perda de solo até 2100 | 65 |
| 3 Resultados e discussão | 66 |
| 3.1 Erosividade da chuva (R) | 66 |
| 3.2 Erodibilidade do solo (K) | 66 |

| | |
|---|----|
| 3.3 Fator topográfico (LS) | 67 |
| 3.4 Uso do solo (C) | 69 |
| 3.5 Perda de solo (A) | 70 |
| 3.5.1 Projeções de perda de solo até 2100 | 72 |
| 4 Conclusão | 81 |
| 5 Referências bibliográficas | 82 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 87 |

INTRODUÇÃO

No contexto global, a erosão do solo tem prejudicado, em grande escala, o desenvolvimento humano, degradando áreas de solos férteis, assoreando corpos hídricos e devastando áreas povoadas, tanto nas áreas urbanas como em áreas rurais, modificando paisagens até mesmo de florestas e locais remotos como desertos e montanhas.

Os processos erosivos, que ocorrem naturalmente, tem se agravado devido à ação das condições climáticas atuais seja pela ocorrência de eventos extremos (vendavais, tempestades, granizo, etc...) ou ainda pelo prolongamento (ou diminuição) de períodos chuvosos e de estiagem.

Ao avaliar muitos trabalhos sobre a perda de solo e conhecer estudos de caso é possível observar que os referidos processos ocorrem em função logarítmica. Se não houver uma intervenção rápida, a cada dia a degradação se torna maior e as medidas corretivas mais onerosas. Ainda dentro deste contexto, observa-se um ciclo onde as mudanças climáticas aceleram processos erosivos e as alterações do ambiente aceleram mudanças climáticas (BAZZANO et al.,2010).

A região sul do Brasil se caracteriza por vastas áreas de plantio, sendo responsável por 37,6 % da produção agrícola de cereais, leguminosas e oleaginosas do país, conforme (IBGE, 2015). Outro dado importante, segundo Ipardes (2015), é que o estado do Paraná é o maior produtor nacional de grãos e em 2014 produziu mais de 87,3 milhões de toneladas entre as culturas de cana-de-açúcar, mandioca, batata inglesa, milho, soja e trigo.

Assim a perda do solo, por processos erosivos, em áreas favoráveis ao plantio, conseqüentemente poderia reduzir a produção agrícola e aumentar os custos de produção para um estado com a vasta área de 199.880 Km², nesta totalidade contemplando cidades, campos e florestas. Atualmente, com uma população aproximada de 11,17 milhões de habitantes, segundo dados do IBGE (2015), o Paraná apresenta diferenças climáticas marcantes que vai do subtropical úmido, no norte ao temperado úmido, no sul.

Como as condições do solo estão intimamente relacionadas às características climáticas da região torna-se importante avaliar o histórico de dados meteorológicos, características das chuvas e dos solos, e simular cenários temporais. Então ao questionar-se, qual a necessidade de um estudo com esta proposta, a

resposta seria visualizar ou almejar visualizar as situações que podem ocorrer à longo prazo, a 20, 30, 50, 80 anos, e a partir disto, planejar ações e direcionar esforços.

Ao abordar o tema da erosão hídrica do solo, são encontrados fatores de grande influência na questão da perda de solo, como a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, índices pluviométricos, intensidade e duração da chuva, declividade de encostas, variação de temperatura, tipos de chuvas, energia da gota de chuva, evaporação, entre outros (AMARAL, 2014).

Quantificar e avaliar variáveis tão complexas, relacionadas ao clima e solo, em áreas extensas requer distribuição espacial dos dados para facilitar tanto a execução do trabalho como para entendimento do mesmo. Assim destaca-se a importância de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para espacializar as condições regionais em função do tempo (SCOPEL, 1988).

Ao observar atentamente um mapa temático torna-se possível avaliar de maneira abrangente o estado em que se encontra a área, assim determinando pontos críticos e focando nas possíveis soluções. O suporte da ferramenta SIG neste estudo seria mostrar regiões mais ou menos suscetível à erosão hídrica.

O estudo proposto resultará em dois artigos, apresentados aqui na forma de capítulos. Sendo o primeiro capítulo com objetivo de simular a erosividade das chuvas no estado do Paraná até 2100, conforme alterações climáticas previstas pela comunidade científica no Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC-2013). O segundo artigo tem como objetivo estimar a perda de solo atual e projetada até o final do século XXI, em microbacias hidrográficas com diferentes usos na região dos Campos Gerais, a partir das variáveis da Equação Universal de Perda de Solo – USLE, demonstrando áreas mais suscetíveis à erosão hídrica.

CAPÍTULO I

ANÁLISE DE EROSIVIDADE NO ESTADO DO PARANÁ AO LONGO DO SÉCULO XXI

1. INTRODUÇÃO

A erosão pode ser definida e caracterizada como um processo de degradação do meio, que ocorre naturalmente em maior ou menor escala, dependendo de vários fatores, cujos agentes causadores principais são as condições climáticas e as características próprias do ambiente, que são fatores fundamentais no processo e que se desenvolve basicamente, em três fases: desagregação, transporte e deposição.

Segundo Scopel (1988), o desenvolvimento e a aplicação de técnicas conservacionistas no uso do solo, têm contribuído para controlar a erosão em áreas agrícolas, florestais, pastoris, de preservação e de mineração. Contudo, a erosão e a sedimentação constituem ainda grandes problemas em muitas regiões eminentemente agrícolas, bem como dentro de grandes aglomerados urbanos no Brasil e também em áreas localizadas em outros países considerados desenvolvidos. Isto decorre em parte, devido à relutância em adotar iniciativas técnicas de uso e manejo do solo indicadas, como práticas de controle de erosão.

De acordo com Valvassori e Back (2014), a crescente demanda por alimentos e energia gera, como um dos efeitos, a ampliação e a intensificação do uso do solo, que associados às práticas inadequadas de manejo e conservação, inviabilizam inúmeros sistemas de produção agropecuária. Neste contexto, a erosão do solo poder ser considerada um dos grandes problemas ambientais da atualidade, ocorrendo em escala global e ocasionando prejuízos nas esferas sócioeconômica e ambiental.

Scopel (1988), já apontava para o mesmo sentido na questão do uso do solo, citando a intensificação do uso do solo com culturas anuais, substituindo florestas e pastagens, não permitidos atualmente, a desatualizada queima dos restos de culturas, o uso de máquinas cada vez maiores e com mais frequência no preparo do solo, que por sua vez se apresentam em condições inadequadas de umidade, aumentando o risco de erosão e tornando algumas práticas de controle de

erosão, que antes eram consideradas efetivas, mas que atualmente estão um tanto ultrapassadas.

A erosão hídrica é fundamentalmente causada pela água proveniente de chuva em uma determinada região. No campo é comum observar a desagregação do solo após uma chuva intensa, principalmente onde existe solo descoberto. Já nas áreas urbanas, devido às mudanças abruptas do ambiente resultantes das atividades antrópicas, a erosão hídrica pode ser observada em certos pontos de descarte de águas pluviais, resultantes da impermeabilização de grandes áreas.

Conforme Lombardi Neto e Pastana (1972), existe uma tendência de aumentar a perda de solo à medida que aumentam as quantidades de chuvas totais em uma região, porém a falta de regularidade nesta relação indica que fatores associados às chuvas influem no seu poder erosivo. Assim a intensidade, duração e a distribuição da chuva influenciam o volume de solo perdido.

1.1 Equação Universal da Perda de Solo - USLE

A Universal Soil Loss Equation - USLE, proposta por Wischmeier (1959), objetivou simular as perdas de solo integrando os fatores macros que provocam a mesma, sendo que estes são consequência de inúmeros outros fatores secundários e suas interações. Segundo o autor são eles: a característica da chuva, denominada de erosividade da chuva (R), a características do solo, dada pela Erodibilidade (K) do mesmo, fatores topográficos que contemplam o comprimento da encosta (L) e a inclinação (S) da mesma, a cobertura e manejo do solo (C) e as medidas preservacionistas que visam diminuir o transporte de solo (P). Segundo Scopel (1988), a USLE tem sido modificada para possibilitar diversos usos, como por exemplo, na avaliação do risco de erosão em grandes áreas. Abaixo segue a USLE contemplando as variáveis citadas acima:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1.1)$$

Sendo:

A: Perda do solo;

R: Erosividade da chuva;

K: Erodibilidade do solo;

L: Comprimento da encosta;

S: Inclinação da encosta;

C: Cobertura e manejo do solo;

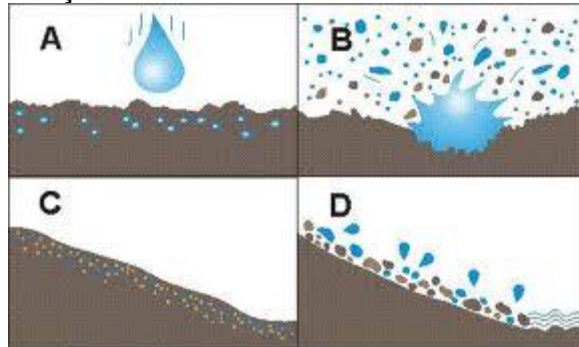
P: Medidas preservacionistas tomadas.

Conforme Wischmeier (1959), a USLE foi testada com dados de vários anos, em 189 locais espalhados pelos Estados Unidos da América. A estimativa de perda de solo de cada parcela foi comparada com a obtida em campo. Como resultado, em média foi perdido $27,9 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, com um erro médio de $3,4 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ em 159 estimativas. Oitenta e quatro por cento das estimativas possuíam erro menor que $4,9 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e 2/3 das estimativas que excederam $2,5 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ foram com comparações com registros de perda de solo de menos de 10 anos, tencionados, provavelmente, pelos efeitos cíclicos da chuva.

1.2 Erosividade da chuva

A energia decorrente das chuvas é a desencadeadora para os chamados movimentos de massas, tais como deslizamentos de encostas, rastejos em áreas declivosas, tombamentos ou rolamentos de blocos rochosos. Cada gota de chuva ao se formar, tem energia potencial gravitacional. À medida que a gota cai em direção ao solo a energia potencial vai se transformando em energia cinética, ou seja, energia de movimento. A Figura 1.1 mostra que ao atingir o solo esta energia dissipa-se, ao mesmo tempo em que ocorre a desagregação do maciço do solo. As partículas resultantes são espalhadas pela superfície e ficam suscetíveis ao escoamento superficial da água. Diante disto, pode-se imaginar bilhões de gotas de chuva impactando o solo a cada minuto, desagregando a superfície e formando canais sobre a terra.

Figura 1.1 – Esquema mostrando o processo de erosão pela gota de chuva – A: gota de chuva com velocidade no momento anterior ao atingir o solo; B – impacto da partícula de água desagregando o solo; C: partículas de solo soltas na superfície do terreno; D: transporte de sedimentos através do escoamento superficial da chuva após a saturação do maciço



Fonte: Derpsch et al.,1991.

Wischmeier (1959) observa que a potencialidade erosiva das chuvas é função de características individuais de cada evento. Sendo assim, para cada chuva específica o seu valor é o produto da sua energia cinética por sua intensidade máxima em 30 minutos. Este fator é denominado fator “R” ou índice de erosividade EI_{30} , que representa numericamente a força erosiva, em $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ como unidade de medida, e é obtido pelo produto da energia cinética (E_c) com que uma chuva atinge o solo, pela máxima intensidade verificada em 30 minutos, conforme abaixo na equação 1.2:

$$EI_{30} = E_c \times I_{30 \text{ min}} \quad (1.2)$$

Segundo Schick et al. (2014), o conhecimento do índice de erosividade tem importância significativa tanto do ponto de vista de aplicação prática quanto científico. Na aplicação prática, o conhecimento do índice de erosividade da chuva, especialmente a sua distribuição acumulada ao longo do tempo, permite identificar os períodos do ano com maior risco ou potencial de erosão hídrica. Assim, o técnico de campo pode planejar mais eficientemente as medidas de controle da erosão hídrica do solo. Para tanto, é importante que o técnico leve em consideração, que o solo deve estar suficientemente protegido nos períodos em que as chuvas proporcionam os maiores valores do índice de erosividade. Cientificamente permite que os conceitos sejam extrapolados em outros trabalhos e possibilite estudo de regiões próximas ou com características semelhantes atualmente, bem como simulações diversas.

1.3 Trabalhos internacionais sobre a erosividade da chuva

Na Europa, Panagos et al. (2015), analisaram dados de diversos países com o intuito de elaborar um mapa das características da chuva no solo. Os autores avaliaram a erosividade das chuvas de acordo com o fator R da USLE, com base nos melhores conjuntos de dados disponíveis com relação à confiabilidade na coleta e processamento. Esses dados foram coletados a partir de 1541 estações de precipitação pluviométricas em toda a União Europeia (UE) e Suíça. As séries temporais de precipitação variaram de 05 à 40 anos e, além de mapear as precipitações e os seus potenciais erosivos na Europa, os autores também elaboraram um mapa de incertezas de acordo com a escassez e a qualidade dos dados adquiridos. Neste aspecto apontaram como causa das incertezas, o pequeno número de estações pluviométricas e a elevada diversidade de características ambientais, no norte da Escócia, Finlândia e Suécia.

Tempestades seguidas de inundações e torrentes de detritos ocorridas na Ilha da Madeira, em 2010, motivaram estudos para análise do acontecimento. Coutinho e Antunes (2013) descrevem o fato com precipitações entre 150 e 300 mm, no decorrer de 20 horas de duração e estimativa de 1,2 milhão de metros cúbicos de sedimentos transportados. Neste trabalho a questão da erosividade é enfatizada e a relação entre a erosividade e valor mensal do índice de Fournier modificado, é significativamente melhor que outras relações testadas considerando a importância da extrapolação aos locais em que não existam registros mais detalhados.

Olivares et al. (2011), para avaliar a perda de solo em região metropolitana à aproximadamente 120 km de Santiago-Chile, partiram da estimativa do fator R (erosividade da chuva) da USLE através de dois métodos. O primeiro utilizando a aproximação de Arnoldus (1980), com o índice de Fournier modificado para as condições chilenas, o segundo utilizando a equação proposta por Valenzuela e Morales (2011), a partir de médias de precipitação.

Um estudo realizado sobre a erosividade da chuva na Grécia, por Panagos et al. (2016), com dados obtidos por 80 estações meteorológicas, distribuiu espacialmente não apenas a precipitação no território grego mas os índices de erosividade mensais e sazonais. Conforme os próprios autores, mapas espaço-temporais de erosividade são úteis (considerando as incertezas propostas) aos agrônomos para identificar os locais e períodos em maior risco de perda de solo e permite a tomada de medidas para conservação do solo, como o plantio direto e de

resíduos vegetais .

Xiao et al. (2015) utilizou o índice de erosividade para quantificar o potencial de degradação da chuva analisando registros de 1988 a 2013, na província de Jiangxi, China. A distribuição de tal índice na área estudada possibilitou a determinação das zonas I e II, respectivamente com maior e menor erosividade anual, e a proposta de conversão do uso do solo nas diferentes zonas, foi a primeira medida para a conservação do solo, apesar de eficiência com variabilidade significativa para cada zona.

Observa-se tal importância sobre a perda de solos cultiváveis e, conseqüentemente, a erosão ocasionada pela chuva em diversos trabalhos sobre a erosividade da chuva, abordados amplamente mundo afora.

O continente africano tem estudos direcionados como o trabalho de Roux et al. (2008) que distribuíram espacialmente a condição da erosão da chuva e também a potencialidade de risco para a África do Sul. Já Vrieling et al. (2010), trabalhando sobre as condições em toda a África, estimaram a erosividade com dados de satélite sobre a precipitação, calculando a erosividade anual média através de relações intensidade erosividade, posteriormente comparando com o índice de Fournier modificado.

O Brasil, como um país de dimensões continentais, tem uma variabilidade muito grande de climas e solos, dificultando não só a coleta dos dados climáticos, mas também a padronização de processos. Oliveira et al. (2012) analisaram várias pesquisas sobre erosividade realizados no Brasil, para verificar a qualidade e a representatividade dos resultados gerados e estabelecer uma melhor compreensão da erosividade das chuvas no Brasil, utilizando o fator R da USLE. Dos 35 trabalhos avaliados, abrangendo 80 municípios brasileiros, a grande maioria é referente às regiões Sul e Sudeste, com alguns poucos estudos em outras regiões. Segundo os autores, a erosividade anual no Brasil tem grande amplitude, variando de 1.672 a 22.452 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹, onde os menores valores estão na região Nordeste e, os maiores valores são encontrados nas regiões norte e sudeste. Ainda, conforme os autores, a erosividade da chuva tende a aumentar de leste a oeste, especialmente na parte norte do país devido onde as condições de umidade e temperatura são propícias à evaporação

Mello et al.(2013) objetivando desenvolver modelos para estimar médias de erosividade anual, para regiões brasileiras, baseada numa metodologia que

empregava regressão linear múltipla, utilizando latitude, longitude e altitude como preditores para os mesmos, elaboraram um mapa de erosividade da chuva para o Brasil.

Na região sul, muitas pesquisas foram elaboradas sobre a temática da erosividade da chuva, nos últimos anos. Esta demanda é proveniente da forte atividade agrícola voltada para exportação, conforme diversos boletins agrônômicos dos estados do sul. Dentre os estudos publicados, pode-se destacar Valvassori e Back (2014), avaliaram o valor médio anual do índice EI_{30} , permitindo classificar as chuvas da região de Urussanga-SC, no período de 1980 à 2012, como de potencial erosivo de médio a forte; Schick et al. (2014), que concluíram que o período de setembro a fevereiro foi o mais crítico em relação ao potencial erosivo das chuvas em Lages-SC, concentrando 66 % da erosividade anual e Eltz et al. (2013), que analisando o município de São Gabriel-RS, a partir da série de dados de 1963 à 1993, determinaram o fator “R” nesta região do extremo sul do país, considerando as chuvas como médio potencial erosivo.

1.4 Estudos de erosividade no estado do Paraná

No estado do Paraná, estudos sobre o tema foram iniciados já na década de oitenta por pesquisadores do IAPAR. Waltrick et al. (2015) fizeram um histórico dos trabalhos relevantes para o Estado e observaram que a primeira modelagem matemática foi realizada por Castro Filho et al. (1982), desenvolvendo uma equação geral de determinação do EI_{30} a partir do método de Wilkinson(1975), com dados pluviométricos de 5 localidades. A segunda estimativa de erosividade para o estado foi elaborada por Rufino (1986), utilizando a equação geral da primeira modelagem, ampliando dados pluviográficos para 31 locais e com séries históricas maiores. Com um maior número de locais em relação ao primeiro trabalho, teve como resultado um mapa de erosividade mais preciso. Tanto a primeira quanto a segunda estimativa de erosividade para o Paraná se basearam no método-padrão de determinação do EI_{30} , ou seja, o método pluviográfico, com análise de pluviogramas diários para determinado período de tempo.

Numa terceira estimativa realizada por Rufino et al. (1993), o Estado foi separado em 8 regiões e para cada uma delas foi determinada uma equação de regressão entre EI_{30} (definido pelo método pluviográfico) e o coeficiente de relação da chuva (R_c), obtido a partir da precipitação média mensal e precipitação média

anual. Com essas oito equações de regressão, foi possível incorporar ao mapa de linhas isoerodentes do estado, mais 144 locais que dispunham somente de dados de pluviômetro no período de 1972 à 1989, e com isso foi possível estimar com melhor precisão a erosividade nas diferentes regiões, sendo as linhas isoerodentes, linhas que delimitam em uma carta, regiões de mesmo potencial erosivo da chuva.

Extrapolando as condições edafoclimáticas com dados históricos, Waltrick (2010) iniciaram estudos sobre a característica da chuva no estado do Paraná, através de caracterização e simulações do clima para cenários futuros. Recentemente, Waltrick et al. (2015) propuseram a revisão das equações obtidas em 1993 e atualizaram o mapa de linhas isoerodentes para o estado.

De acordo com Neves (2015), o aumento das temperaturas do ar, o derretimento das calotas polares, o aumento do nível dos oceanos e demais consequências dos eventos climáticos tem sido o foco de vários pesquisadores. Assim, o aquecimento global e as mudanças climáticas se tornaram assunto de preocupação geral, uma vez que existem muitas dúvidas sobre as causas e suas consequências.

1.5 Mudanças climáticas

O IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas), estabelecido, em 1988, pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), foi criado para avaliar a variabilidade do clima e seus possíveis riscos a sociedade, e fornecer informações técnicas e socioeconômicas sobre as mudanças climáticas. Este grupo de trabalho sugere algumas projeções de alterações nas variáveis climáticas que são consideradas na simulação dos cenários climáticos globais. Assim publicou em 2013 o seu 5º relatório (IPCC, 2013), que aborda cenários climáticos denominados RCps, onde a melhor situação projetou um aumento na temperatura global entre de 0,3 a 1,7°C e, a pior situação, um incremento entre 2,6 e 4,8°C.

A alteração da temperatura global tem sido observada com maior frequência e avaliada no intuito de se descobrir os motivos causadores. Num primeiro momento, parecia ser óbvio afirmar que a queima de combustíveis fósseis, a industrialização, ou seja, a interferência das atividades antrópicas na natureza contribuía para tal efeito. Porém, independente do grau de interferência humana, a

questão fundamental é qual a situação que o homem vai ter que enfrentar nos próximos anos e quais os impactos no desenvolvimento da humanidade.

Convém pontuar que qualquer alteração climática vai inferir nos regimes pluviométricos regionais e, conseqüentemente, impor situações extremas tanto às pequenas comunidades como em grandes centros urbanos. Como se pode observar recentemente (entre 2014 e 2015), o rebaixamento em níveis nunca vistos, dos reservatórios de água que abastecem a cidade de São Paulo e sua região metropolitana, causou grande impacto na população urbana. Neste mesmo período inundações no Rio Grande do Sul, deixaram milhares de pessoas desabrigadas, numa situação semelhante que ocorreu no vale do rio Itajaí-açu em 2011. No Paraná, devido a ocorrências de grandes chuvas, quantidades imensas de grãos são perdidas, ainda antes da colheita, devido ao apodrecimento das plantas e consequência de umidade excessiva.

Neves (2015), relacionou as mudanças climáticas à disponibilidade hídrica regional, por meio do seguinte raciocínio: maior a temperatura, maior evapotranspiração do ecossistema e, conseqüentemente, maior pluviosidade, aumentando o escoamento superficial e diminuindo a água no subsolo.

Motivado pelas mudanças climáticas globais, a 21ª Conferência das Partes (COP-21) realizada em Paris, na França, em dezembro de 2015, reuniu mais de 90 países, envolvendo diversos setores desde a participação de líderes governamentais, grandes corporações, técnicos e até ONGs para discutir, avaliar e promover iniciativas mitigadoras relacionadas às mudanças climáticas. Após muitos debates, polêmicas e manifestações, foi ratificado o denominado “Acordo de Paris”, onde um dos objetivos é manter o aquecimento global “muito abaixo de 2°C”, buscando ainda “esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais”. O texto determina, no que diz respeito ao financiamento climático, que os países desenvolvidos deverão investir 100 bilhões de dólares por ano em medidas de combate à mudança do clima e adaptação em países em desenvolvimento (ONU, 2015).

Dentro deste contexto e, de acordo com Bastola et al.(2014), modelos climáticos globais são ferramentas amplamente utilizadas na obtenção de cenários climáticos futuros. Estes cenários climáticos ou reanálises globais contribuem na representação em larga escala das características de circulação atmosférica, porém não reproduzem satisfatoriamente, as variáveis de superfície em uma escala

adequada para aplicações hidrológicas. Neste momento, torna-se de fundamental importância a aplicação dos chamados geradores de dados climáticos, que segundo Semenov (2008), são modelos capazes de gerar padrões meteorológicos diários estatisticamente semelhante aos padrões dos dados históricos.

Esses geradores são usualmente utilizados como ferramentas eficientes na simulação de cenários climáticos futuros para avaliação de modelos agronômicos ou hidrológicos, pois permitem mudar os cenários com base na saída de modelos climáticos globais, tendo em vista as possíveis mudanças climáticas (NEVES, 2015). Virgens Filho et al. (2010), no intuito de simular cenários climáticos baseados em possíveis alterações climáticas para a região dos Campos Gerais, perceberam que os geradores de dados climáticos promovem uma interação de natureza probabilística com componentes de outros sistemas de natureza agronômica e hidrológica fornecendo uma metodologia para medir o risco de incerteza climática.

Diante desta prerrogativa, vários pesquisadores têm proposto geradores estocásticos de séries climáticas, o CLIGEN (NICKS; HARP, 1980), o WGEN (RICHARDSON; WRIGHT, 1984), o LARS-WG (SEMENOV; BARROW, 1997), sendo que no Brasil destacam-se o GEPAC (VIRGENS FILHO, 1997), o SEDAC_R (VIRGENS FILHO, 2001), o CLIMABR (OLIVEIRA; ZANETTI; PRUSKI, 2005) e mais recentemente o PGECLIMA_R (VIRGENS FILHO et al., 2013), para aplicação em problemas de natureza hidrológica e/ou agronômica.

Sendo assim, com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre a característica da chuva no estado do Paraná, e sua relação com os processos erosivos, esta pesquisa tem como objetivo estimar a projeção da erosividade de origem pluvial no estado do Paraná até o final do século XXI, levando em consideração, as possíveis alterações climáticas previstas no 5º relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC-2013), e utilizar para tanto uma metodologia baseada em simulação computacional de dados climáticos, realizada por meio do modelo PGECLIMA_R.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

O estado do Paraná está localizado na região sul do Brasil, limitado pelas seguintes coordenadas:

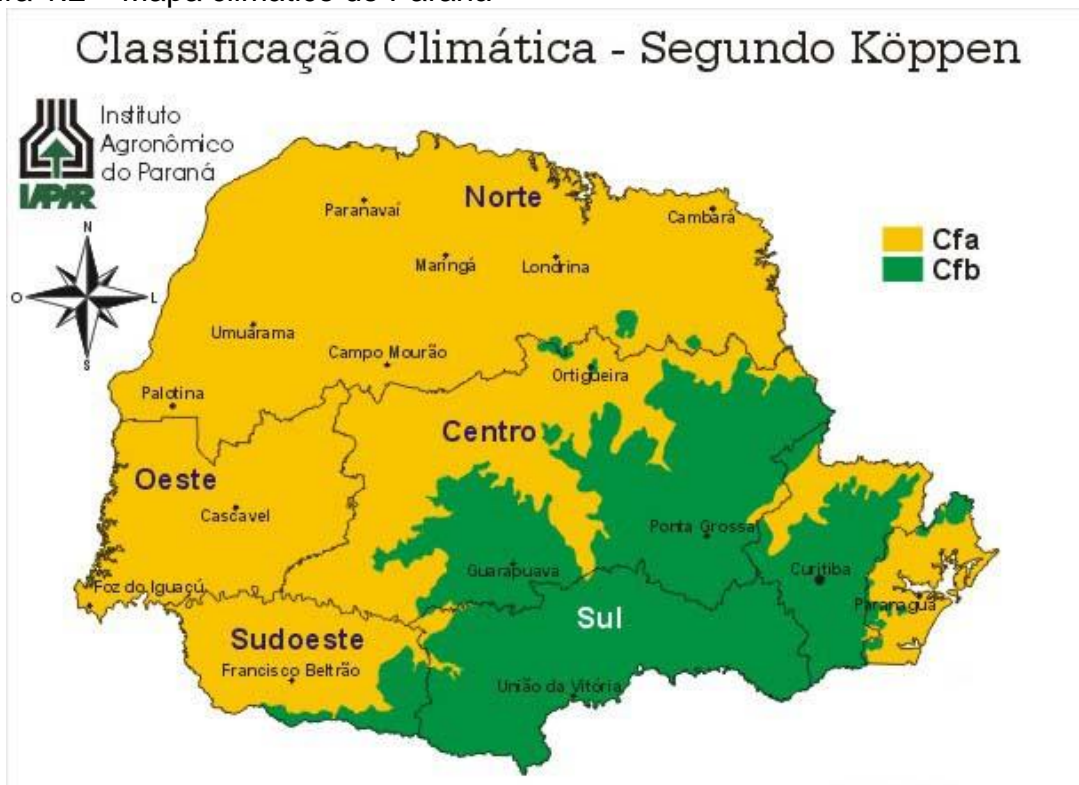
| | |
|-------|--|
| Norte | 22°31'05" |
| Sul | 26°43'03" |
| Leste | 48°01'24" (limitado pelo oceano atlântico) |
| Oeste | 54°35'37" |

Sendo o clima regional classificado segundo Köppen como:

Cfa – Clima Subtropical com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C (Mesotérmico) e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração de chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida;

Cfb – Clima temperado propriamente dito; temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (Mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida.
(IAPAR, 2015).

Figura 1.2 – Mapa climático do Paraná



Fonte: IAPAR, 2015.

2.2 Estimativa da erosividade

Erosividade da chuva é apresentada pelo índice EI_{30} , que é definido como sendo igual ao produto da energia cinética da gota de chuva (E_c) pela máxima intensidade verificada em 30 minutos ($I_{30 \text{ min}}$), segundo (SCOPEL, 1988).

Como segue abaixo, na equação 1.3, a erosividade numa região é dada matematicamente pela somatória destes produtos das chuvas ocorridas em determinado período, ou seja, temos a erosividade da chuva no ano ou apenas em um mês.

$$R = \sum_{j=1}^n EI_{30} \quad (1.3)$$

onde, “**n**” é o número de chuvas (WISCHMEIER, 1959).

Com relação aos dados para a estimativa da erosividade, Lombardi Neto (1992), frisou o fato que os registros pluviográficos são escassos, quando não inexistentes em países pouco desenvolvidos, dificultando estudos e trabalhos relativos às características regionais das chuvas. Além da análise de diagramas dos pluviógrafos para fins de cálculo da energia cinética ser extremamente morosa e trabalhosa, diversos autores tentaram correlacionar o índice de erosão com fatores climáticos de mais fácil medida, ou seja, a pluviometria, e que não requerem registro de intensidade da chuva.

Lombardi Neto e Pastana (1972), concluíram em seu trabalho experimental sobre a relação chuva perda de solo que a capacidade da chuva erodir um solo depende, sobretudo da intensidade envolvida durante a chuva, da sua quantidade e das condições de superfície do solo. Assim, chuvas de longa duração e baixa intensidade pode ocasionar perda de água com pouco risco de erosão devido à diminuição do escoamento superficial, enquanto a chuva com alta intensidade e curta duração pode condicionar maior risco, saturando o solo rapidamente e proporcionando fluxo da água pluvial.

Nem toda precipitação é considerada erosiva, pois não possui intensidade, duração ou ocorre em intervalos superiores ao estabelecidos (WISCHMEIER, 1959). Cabeda (1976), estabeleceu para as condições do estado do Rio Grande do Sul a quantidade de 10 mm para que a chuva seja considerada

erosiva ou de 6 mm no caso de ocorrer dentro de quinze minutos. Wischmeier (1959), ainda observa que o índice EI_{30} representa um termo de interação que mede o efeito de como a erosão por impacto, o salpico e a turbulência se combinam com o escoamento superficial para transportar partículas de solo desprendidas. Sendo uma estimativa e não pretende chegar à números absolutos.

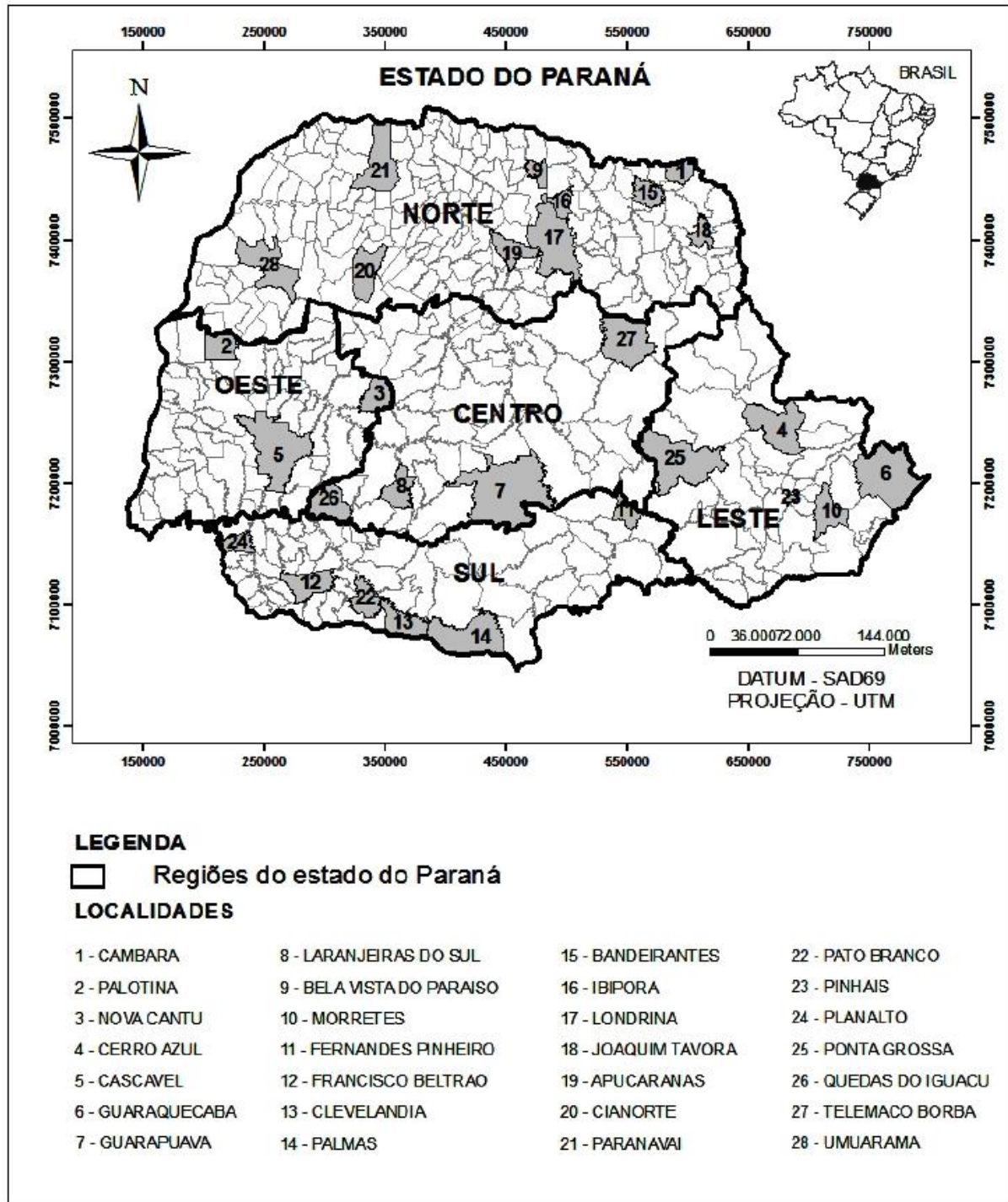
De acordo com Schick et al. (2014), o índice de erosividade mensal é obtido pelo somatório dos valores dos índices das chuvas individuais e ao acumular os valores mensais, obtém-se o índice de erosividade anual. Os valores mensais dos índices de erosividade são a média dos valores dos meses dos anos para a localidade. Assim, o valor médio anual do índice de erosividade é a média dos valores dos anos do período estudado, sendo esse valor considerado como o fator "R" na USLE (Wischmeier & Smith, 1978).

As projeções das precipitações médias mensal (p) e anual (P) serão utilizadas para a obtenção do Coeficiente de Fournier (R_c) e posteriormente, com as equações que Rufino propôs em 1993, revisadas por Waltrick et al. (2015), é possível obter a erosividade para cada local ano a ano, até 2100.

2.3 Base de dados

Os dados de precipitação diários, em milímetros, que possibilitaram a referida pesquisa foram coletados em 28 estações agrometeorológicas espalhadas por todo o estado com séries históricas diárias compreendidas nos períodos de 1980 à 2009, fornecidos pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), conforme locação na figura 1.3.

Figura 1.3 – Mapa do estado do Paraná com a locação das estações pluviométricas onde os dados foram coletados



Fonte: Neves, 2015.

Para cada localidade os dados foram acumulados mensalmente e anualmente, possibilitando assim a obtenção das médias de precipitação para cada mês do ano (p) e também a média anual nas séries históricas (P). A partir destas médias chega-se ao Coeficiente de Chuva (R_c) através da equação 1.4.

$$Rc = p^2/P \quad (1.4)$$

Onde,

Rc: Coeficiente de chuva;

p: média da precipitação mensal no período;

P: média da precipitação anual no período.

As localidades foram agrupadas em 08 regiões que obedecem às equações lineares, do tipo $EI = a + b \times Rc$, propostas por Rufino et al. (1993) e revalidadas por Waltrick et al. (2015). Assim que o valor do Rc calculado e os coeficientes linear e angular de cada equação são definidos, estima-se o índice de erosão para o período de 1980 à 2009.

2.4 Simulação de dados até 2100

O histórico de precipitação diária por 30 anos, em 28 localidades do estado do Paraná, fundamenta as simulações realizadas através do programa de modelagem PGECLIMA_R, no laboratório de Estatística Computacional e Aplicada da UEPG. Foram simulados dados de precipitação diários até 2100, contemplando dois cenários. O objetivo do primeiro cenário: um aumento da temperatura global em 1,7° C e do segundo cenário, um aumento da temperatura global em 4,8° C, ambos até o final do século 21.

Para cada cenário serão efetuadas três simulações. Outro ponto importante a ser observado é que tanto no primeiro quanto no segundo cenário, as precipitações serão separadas em 3 períodos: de 2010 à 2039, de 2040 à 2069 e de 2070 à 2099.

Novamente com as médias mensais de precipitação (p) e as médias anuais de precipitação (P), calcula-se o coeficiente de chuva Rc e na sequência, utilizando as equações propostas para cada região, obteve-se o índice de chuva (EI_{30}) para cada período em dois cenários distintos. Cabe ressaltar que o EI_{30} obtido em de cada período de 30 anos representam a erosividade média estimada no respectivo período.

Para avaliar a erosividade ao final de cada série de 30 anos, como o coeficiente de chuva é obtido pelas médias mensal e anual de um período estudado, foram considerados os três últimos anos de cada período para cada um dos cenários, ou seja, para estimativa do EI_{30} em 2039, foram utilizados os dados de

2037, 2038 e 2039. Assim seguiu-se para 2069 e 2099.

Para os dois cenários climáticos futuros a elaboração de mapas georreferenciados, interpolando os níveis de erosividade da chuva para todo o Paraná tornarão o trabalho visivelmente compreensível.

Com o avanço da tecnologia na última década, o uso de equipamentos para sensoriamento remoto se expandiu abruptamente, em parte devido à diminuição de custos de aquisição e também pela facilidade que estas ferramentas proporcionaram nas tomadas de decisão, nos setores público e privado. Trabalhos elaborados em meados da década de 80 se utilizavam de fotos aéreas e estereoscópios para avaliar uma região.

A apresentação de mapas temáticos de áreas de estudo permite ao observador melhor compreender a situação e possibilita visualizar a evolução de um atributo no decorrer do tempo, caracterizando uma animação.

Nas equações apresentadas no quadro 1.1, a variável dependente corresponde ao índice de erosividade (EI_{30}) e a variável independente corresponde ao coeficiente de chuva (Rc), assim representando-se as equações da seguinte maneira:

$$EI_{30} = a + b \times Rc \quad (1.5)$$

Onde,

EI_{30} : Índice de erosividade;

Rc : Coeficiente de Chuva;

a : Coeficiente linear;

b : Coeficiente angular.

Quadro 1.1 – Equações de regressão utilizadas para cada município de origem dos dados considerados

| Região | Localidade | Equação |
|---------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | Cascavel | Y=182,86+56,21X |
| | Cianorte | |
| | Nova Cantu | |
| | Palotina | |
| | Planalto | |
| | Quedas do Iguaçu | |
| | Umuarama | |
| 2 | Francisco Beltrão | Y=146,86+55,20X |
| | Pato Branco | |
| 3 | Bela Vista do Paraíso | Y=216,31+41,30X |
| | Ibiporã | |
| 4 | Apucarana | Y=164,12+39,44X |
| | Bandeirantes | |
| | Cambará | |
| | Londrina | |
| | Paranavaí | |
| 5 | ----- | Y=191,79+48,40X |
| 6 | Clevelândia | Y=107,52+46,89X |
| | Laranjeiras do Sul | |
| | Palmas | |
| 7 | Fernandes Pinheiro | Y=93,29+41,20X |
| | Guarapuava | |
| | Joaquim Távora | |
| | Ponta Grossa | |
| | Telêmaco Borba | |
| 8 | Cerro Azul | Y=33,26+40,71X |
| | Guaraqueçaba | |
| | Morretes | |
| | Pinhais | |

Fonte: Waltrick et al., 2015.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados pluviométricos diários de diversas estações agrometeorológicas do estado do Paraná permitiram a estimativa da erosividade média no período de 1980 à 2009, separadamente para cada localidade. Os maiores valores foram encontrados nos municípios de Quedas do Iguaçu com 12.339,65 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, Cascavel com 12.124,37 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e Nova Cantú com 12.006,83 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, todos da região oeste do Paraná. Já os menores valores foram verificados em Cerro Azul 5.728,75 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e Pinhais 5.765,15 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, à leste. A totalidade dos valores de erosividade mensal e anual, para cada localidade está apresentada na Tabela 1.1.

Valvassori e Back (2014) analisaram a erosividade da chuva em Urussanga, localizada no estado de Santa Catarina que faz divisa com sul do Paraná, no período de 1980 à 2012, e estimaram a erosividade média anual em 5.665 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, valor que difere do encontrado no sul do Paraná, no município de Palmas, onde a erosividade média anual, no período de 1980 à 2009 foi estimada em 9.756 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Sendo que estes municípios distam aproximadamente 450 km, Urussanga faz parte da planície costeira com altitude de 49 m e Palmas se localiza no terceiro planalto paranaense com altitude de 1.115 m, é compreensível tal diferença entre as estimativa de erosividade, pois as localidades tem características geográficas distintas.

Já no Rio Grande do Sul, a erosividade foi analisada por Eltz et al. (2011) na localidade de Encruzilhada do Sul, região centro-sul deste estado, com erosividade média de 5.534 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, no período de 1958 à 1988. Em São Gabriel, novamente Eltz et al. (2013) analisaram a erosividade média do período entre 1963 à 1993. Este município distante, aproximadamente, 250 km a oeste de Encruzilhada do Sul apresentou a valor médio de 6.432 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Ao comparar como os valores obtidos no Paraná observa-se similaridade na tendência de decréscimo da erosividade do oeste para o leste, mas em escala menor. Como observado no estado do Paraná, a diferença em pouco mais de uma centena de quilômetros pode alterar as estimativa de erosividade em 1000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, facilmente.

Em Teodoro Sampaio, município do estado de São Paulo, próximo da divisa com o norte do Paraná, Colodro et al. (2002) ao avaliarem a erosividade

média anual entre 1976 e 1996 obteve o valor de $7.172 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, valor este próximo do obtido à localidade de Paranaíba ($7.323,64 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) distante aproximadamente 70 km ao sul da primeira.

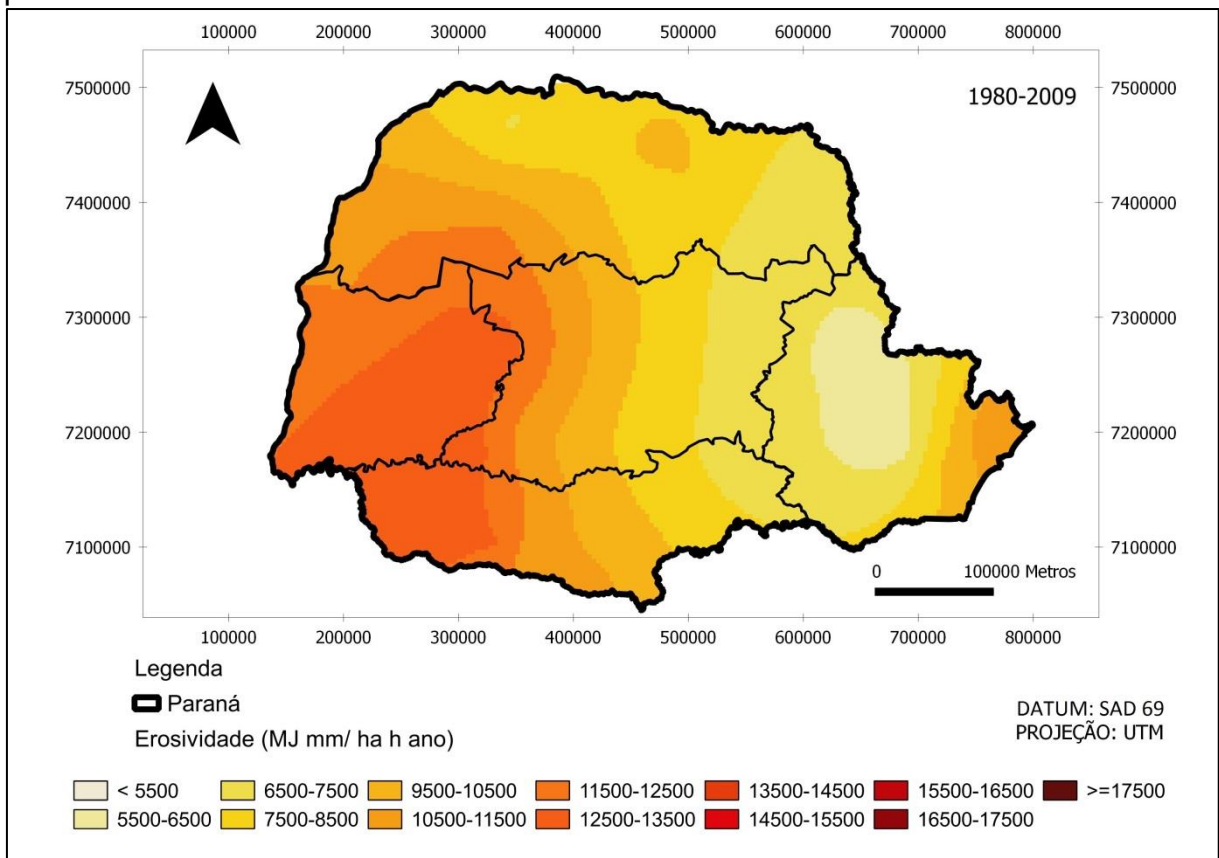
Tabela 1.1 - Estimativa da erosividade da chuva nas diversas localidades do Paraná, para o período de 1980 à 2009

| Reg. | Município | El30 <i>jan</i> | El30 <i>fev</i> | El30 <i>mar</i> | El30 <i>abr</i> | El30 <i>mai</i> | El30 <i>jun</i> | El30 <i>jul</i> | El30 <i>ago</i> | El30 <i>set</i> | El30 <i>out</i> | El30 <i>nov</i> | El30 <i>dez</i> | El30 <i>anual</i> |
|------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | Cascavel | 1198,96 | 1095,66 | 735,33 | 1007,23 | 1300,00 | 670,60 | 618,42 | 494,84 | 958,18 | 1635,10 | 1062,65 | 1347,40 | 12124,37 |
| 1 | Cianorte | 1549,13 | 1076,38 | 845,44 | 722,42 | 836,27 | 668,71 | 291,49 | 360,77 | 812,72 | 1224,48 | 799,17 | 1547,90 | 10734,87 |
| 1 | Nova Cantu | 1343,03 | 1178,04 | 855,09 | 999,90 | 1155,11 | 732,06 | 551,14 | 375,13 | 965,52 | 1509,39 | 974,53 | 1367,91 | 12006,83 |
| 1 | Palotina | 1216,50 | 1050,31 | 569,99 | 870,14 | 1091,91 | 582,05 | 413,12 | 361,58 | 848,71 | 1326,76 | 1102,42 | 1080,13 | 10513,62 |
| 1 | Planalto | 1109,09 | 971,35 | 589,35 | 996,97 | 1288,47 | 854,98 | 557,61 | 540,53 | 957,78 | 1963,53 | 1039,61 | 969,13 | 11838,41 |
| 1 | Quedas do Iguaçu | 1063,25 | 1273,10 | 744,10 | 1024,14 | 1105,51 | 932,56 | 622,86 | 490,36 | 1080,12 | 1814,49 | 1119,42 | 1069,72 | 12339,65 |
| 1 | Umuarama | 1255,86 | 986,30 | 660,50 | 744,70 | 1070,30 | 603,10 | 332,25 | 348,37 | 854,16 | 1305,06 | 1048,61 | 1236,49 | 10445,68 |
| 2 | Francisco Beltrão | 1137,92 | 992,88 | 634,93 | 995,57 | 1205,19 | 927,94 | 648,26 | 444,43 | 929,82 | 1925,58 | 1027,01 | 849,12 | 11718,64 |
| 2 | Pato Branco | 1082,59 | 915,15 | 568,36 | 994,69 | 1146,33 | 877,07 | 691,17 | 493,57 | 951,58 | 1786,93 | 1089,04 | 1091,44 | 11687,91 |
| 3 | Bela Vista do Paraíso | 1815,58 | 952,48 | 673,56 | 515,32 | 556,80 | 410,55 | 298,88 | 269,69 | 554,98 | 744,90 | 840,56 | 1121,42 | 8754,71 |
| 3 | Ibiporã | 1660,36 | 1087,30 | 693,95 | 504,46 | 569,66 | 402,68 | 307,49 | 274,96 | 531,13 | 645,15 | 840,15 | 1098,03 | 8615,32 |
| 4 | Apucarana | 1275,84 | 871,16 | 607,37 | 479,66 | 712,24 | 489,46 | 254,55 | 246,73 | 662,85 | 720,38 | 754,57 | 970,61 | 8045,44 |
| 4 | Bandeirantes | 1397,32 | 985,78 | 579,73 | 418,77 | 455,72 | 313,00 | 247,77 | 211,06 | 480,59 | 612,98 | 677,92 | 1175,04 | 7555,69 |
| 4 | Cambará | 1349,88 | 1050,80 | 777,90 | 422,49 | 376,97 | 300,96 | 237,68 | 209,75 | 377,98 | 628,32 | 779,64 | 962,36 | 7474,73 |
| 4 | Londrina | 1358,96 | 1096,95 | 628,18 | 465,18 | 510,65 | 369,83 | 270,08 | 227,76 | 504,87 | 619,56 | 826,63 | 1166,30 | 8044,97 |
| 4 | Paranavaí | 1171,43 | 860,55 | 635,70 | 431,93 | 525,61 | 398,48 | 257,12 | 247,30 | 600,98 | 768,76 | 600,45 | 825,39 | 7323,69 |
| 6 | Clevelândia | 870,05 | 745,16 | 477,87 | 862,19 | 848,50 | 739,15 | 558,63 | 454,32 | 774,39 | 1418,65 | 918,11 | 888,52 | 9555,54 |
| 6 | Laranjeiras do Sul | 973,48 | 998,39 | 503,83 | 730,11 | 904,69 | 669,61 | 550,50 | 321,89 | 755,97 | 1515,25 | 722,85 | 1065,76 | 9712,33 |
| 6 | Palmas | 874,24 | 799,27 | 496,24 | 781,70 | 895,71 | 751,89 | 643,43 | 469,70 | 876,95 | 1588,77 | 755,42 | 822,61 | 9755,93 |
| 7 | Fernandes Pinheiro | 1043,90 | 582,49 | 468,27 | 371,53 | 587,27 | 429,81 | 466,18 | 233,80 | 739,98 | 833,98 | 511,24 | 710,11 | 6978,55 |
| 7 | Guarapuava | 1001,90 | 674,30 | 502,80 | 595,58 | 722,39 | 510,15 | 450,49 | 260,07 | 774,38 | 1072,60 | 719,70 | 835,83 | 8120,20 |
| 7 | Joaquim Távora | 1609,60 | 806,22 | 538,77 | 377,89 | 450,22 | 258,79 | 200,19 | 162,63 | 402,77 | 553,87 | 508,75 | 1003,72 | 6873,41 |
| 7 | Ponta Grossa | 976,38 | 760,89 | 566,63 | 373,74 | 618,57 | 499,07 | 376,40 | 232,78 | 671,95 | 793,70 | 456,44 | 683,38 | 7009,92 |
| 7 | Telêmaco Borba | 1196,75 | 788,34 | 453,35 | 360,24 | 551,63 | 379,60 | 307,83 | 217,82 | 680,67 | 751,17 | 608,30 | 805,17 | 7100,86 |
| 8 | Cerro Azul | 1160,27 | 676,09 | 548,06 | 251,11 | 440,97 | 244,00 | 196,07 | 141,94 | 446,74 | 419,51 | 376,76 | 827,21 | 5728,75 |
| 8 | Guaraqueçaba | 2769,66 | 2045,91 | 1520,53 | 505,14 | 285,58 | 211,17 | 272,04 | 140,73 | 483,85 | 541,30 | 634,04 | 1141,46 | 10551,40 |
| 8 | Morretes | 2013,22 | 1469,17 | 988,30 | 294,90 | 274,94 | 208,17 | 319,17 | 152,17 | 535,86 | 523,35 | 606,32 | 969,98 | 8355,55 |
| 8 | Pinhais | 1093,06 | 683,28 | 457,29 | 259,84 | 310,51 | 272,91 | 318,32 | 179,25 | 464,91 | 438,56 | 463,62 | 823,59 | 5765,15 |
| | Média | 1306,01 | 981,20 | 654,34 | 619,91 | 742,77 | 525,30 | 402,11 | 305,85 | 702,87 | 1060,07 | 780,85 | 1016,28 | 9097,58 |
| | Máximo | 2.769,66 | 2.045,91 | 1.520,53 | 1.024,14 | 1.300,00 | 932,56 | 691,17 | 540,53 | 1.080,12 | 1.963,53 | 1.119,42 | 1.547,90 | 12.339,65 |
| | Mínimo | 870,05 | 582,49 | 453,35 | 251,11 | 274,94 | 208,17 | 196,07 | 140,73 | 377,98 | 419,51 | 376,76 | 683,38 | 5.728,75 |

Fonte: O autor.

Os locais sujeitos às chuvas mais erosivas são da região oeste e sudoeste do Paraná, onde ocorrem extensas áreas de cultivo e pertencem às bacias do rio Paraná e, principalmente, do rio Iguaçu, conforme mapa da erosividade anual, apresentado na Figura 1.4. Já na porção leste do estado, os índices de erosividade obtidos se mostraram pequenos, na região próxima à cidade de Curitiba, onde ocorre clima temperado. No extremo leste do estado, mais precisamente na planície costeira, o nível de erosividade volta a subir a valores medianos, onde o clima se torna mais quente e úmido, devido à proximidade com o oceano e à densa área coberta por mata atlântica. Não se pode descartar a possibilidade dos altos índices de erosividade no oeste do estado do Paraná ter relação com o grande volume de água superficial nesta área, pois além dos rios Paraná e Iguaçu, de grande expressão a nível continental, cortarem esta região, a existência de grandes reservatórios como Itaipu, com aproximadamente 1.350 Km² de área alagada, Salto Caxias e Salto Osório.

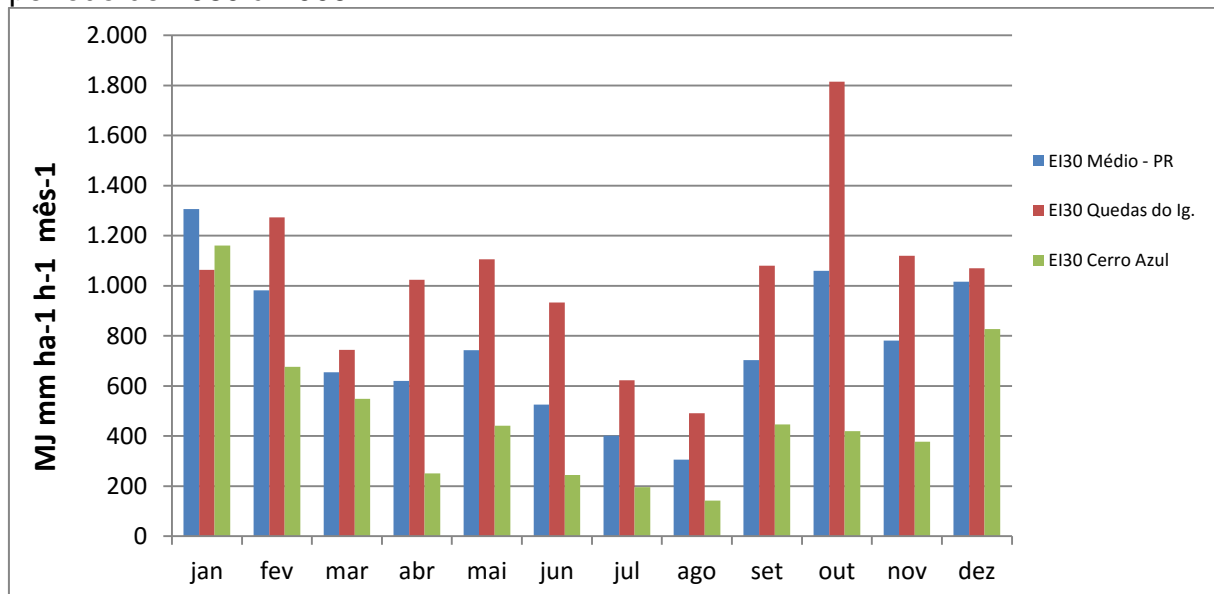
Figura 1.4 – Mapa da erosividade anual estimada para o estado do Paraná, no período de 1980 à 2009.



Fonte: O autor.

A distribuição da erosividade nos meses do ano durante a série histórica de 1980 a 2009, tem uma variabilidade muito grande dependendo da localização do município dentro do estado como se pode verificar na Gráfico 1.1, abaixo:

Gráfico 1.1 – Distribuição da erosividade média da chuva no estado do Paraná e nas localidades de Quedas do Iguaçu e Cerro Azul, durante os meses do ano, no período de 1980 à 2009



Fonte: O autor.

Apesar da média de erosividade para o estado do Paraná como um todo ser elevada nos meses outubro a janeiro e atingir níveis mínimos de março a agosto, deve-se considerar que a distribuição de erosividade ao longo do ano, tem uma variabilidade muito grande para cada localidade especificada no Gráfico 1.1. Como exemplo, na localidade de Quedas do Iguaçu verifica-se que a erosividade da chuva é extremamente elevada em pelo menos 06 meses no ano, superando $1.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$, principalmente de setembro à fevereiro. Já para o município de Cerro Azul nos meses de verão a erosividade mensal ultrapassa $600 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$, e no período de março à novembro a erosividade fica aquém desta marca, chegando ao menor valor no mês de agosto com $141,94 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$.

Apesar da ampla variação da erosividade mensal durante o ano ao observar a distribuição elaborada por Eltz et al. (2011) em Encruzilhada do Sul-RS, e Colodro et al. (2002) em Teodoro Sampaio-SP, constata-se a ocorrência do pico de erosividade nos meses de verão enquanto a erosividade nos meses de inverno se mostra fraca. Assim ocorre na maioria das localidades do Paraná, em contradição aos municípios do oeste: Cascavel, Palotina, Planalto, Nova Cantú, Umuarama,

Francisco Beltrão e Pato Branco, onde a erosividade é forte nos meses abril, maio e outubro.

Nas simulações de erosividade observa-se intensificação da erosividade na totalidade do estado. Nas projeções, tanto no primeiro cenário quanto no segundo, o período de 2070 à 2099, últimos 30 anos do século XXI apresentou valores significativamente superiores ao histórico em todas as regiões.

Estes resultados estão em consonância aos que foram obtidos por Waltrick (2010), onde constatou que as estimativas para erosividade anual das chuvas com os cenários (A2 – aumento de 2,4°C / B2 – aumento de 3,4°C) propostos pelo relatório do IPCC em 2007, tendem a aumentar até 2100. E também o cenário de maior aumento da temperatura (A2) projeta resultados maiores em relação ao cenário B2. Lembrando que a estimativa da erosividade realizada por Waltrick (2010) é de aumento de temperatura de 2,4°C (B2) e 3,4°C (A2) e no presente trabalho é de 1,7°C e 4,8°C, ou seja, o IPCC em 2013 reduziu 30% a temperatura para o melhor cenário e aumentou 41% a temperatura no pior cenário de aquecimento global.

Para fins de comparação da erosividade simulada até 2099, as localidades de Quedas do Iguaçu, localizada na região sudoeste, Londrina que se localiza no extremo norte e Cerro Azul, na região leste, tiveram suas erosividades ao final de cada período, colocadas nos gráficos 1.2, 1.3 e 1.4, que demonstram a evolução nos dois cenários considerados, respectivamente com o aumento da temperatura global em 1,7°C e 4,8°C.

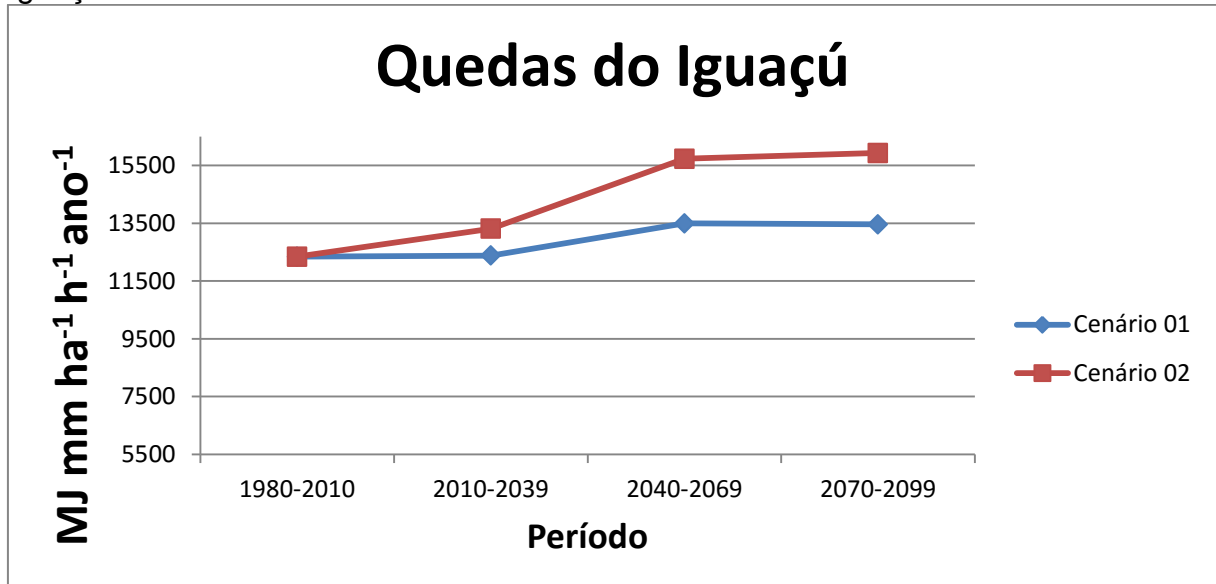
A variação entre os cenários de erosividade em Quedas do Iguaçu, ao final do século XXI chega a 18,37%, região onde a erosividade é mais agressiva no estado do Paraná, conforme Gráfico 1.2. Os resultados para a localidade de Londrina, no primeiro cenário, apontam um montante de 8.309,75 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ no final do século enquanto o segundo cenário remete ao valor de 9.770,78 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, como mostra o Gráfico 1.3.

A localidade de Cerro Azul apresentou, para o final do século XXI, a menor taxa de erosividade com 6.270,14 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ no cenário 01, e 7.330,26 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ no cenário 02. Variação de acima de 1.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. A evolução nesta localidade foi a que apresentou maior regularidade proporcionando uma curva com crescimento suave, conforme o Gráfico 1.4.

Para visualizar a variação da erosividade média ao longo do tempo, nos

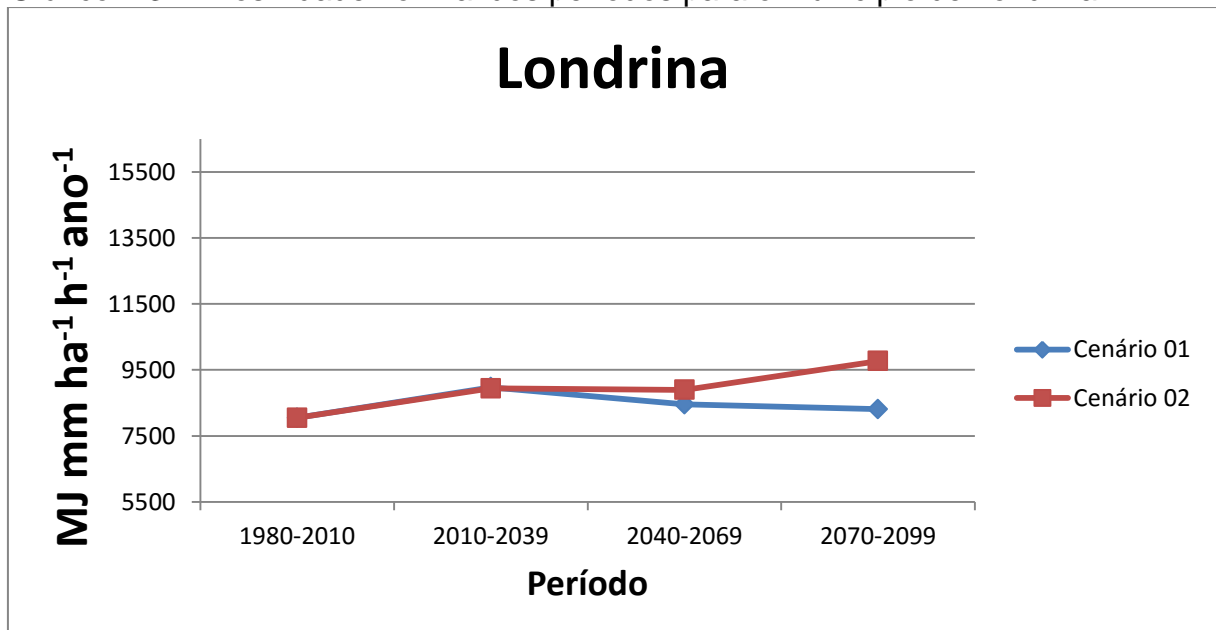
municípios de Quedas do Iguaçu, Londrina e Cerro Azul, os Gráficos 1.2, 1.3 e 1.4, apresentam os índices de chuva projetados em períodos de 30 anos, até o final do século XXI.

Gráfico 1.2 – Erosividade no final dos períodos para o município de Quedas do Iguaçu



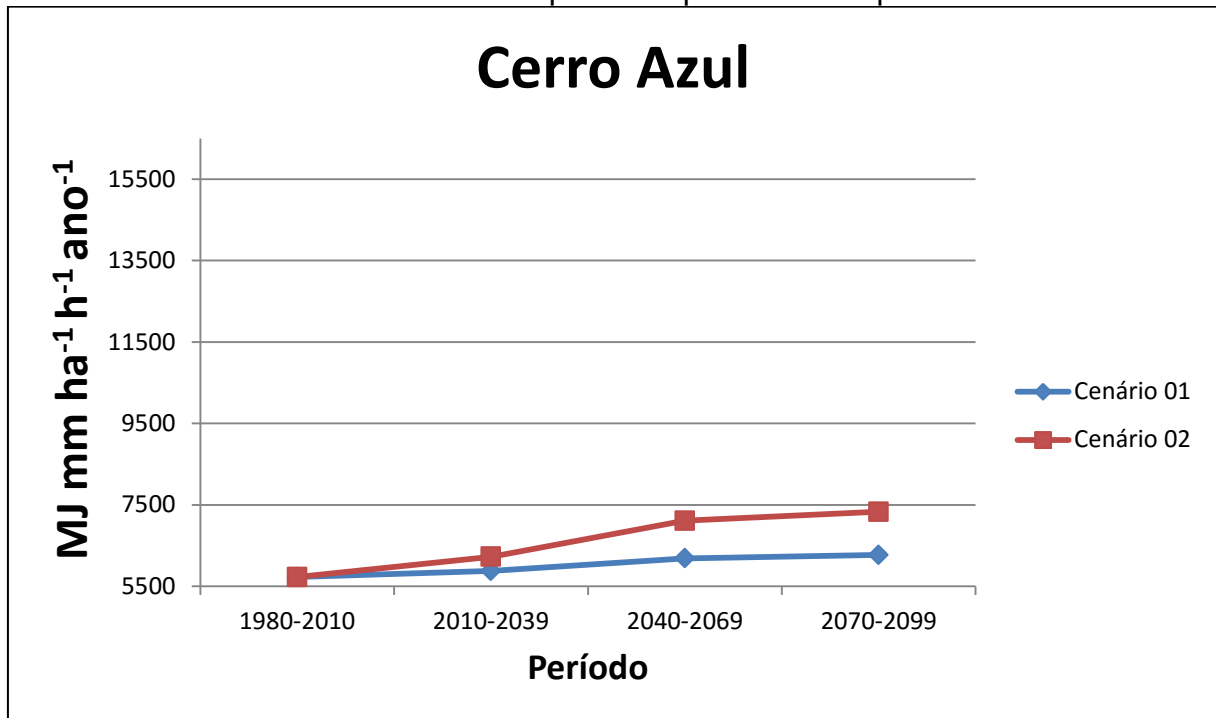
Fonte: O autor.

Gráfico 1.3 – Erosividade no final dos períodos para o município de Londrina



Fonte: O autor.

Gráfico 1.4 – Erosividade no final dos períodos para o município de Cerro Azul



Fonte: O autor.

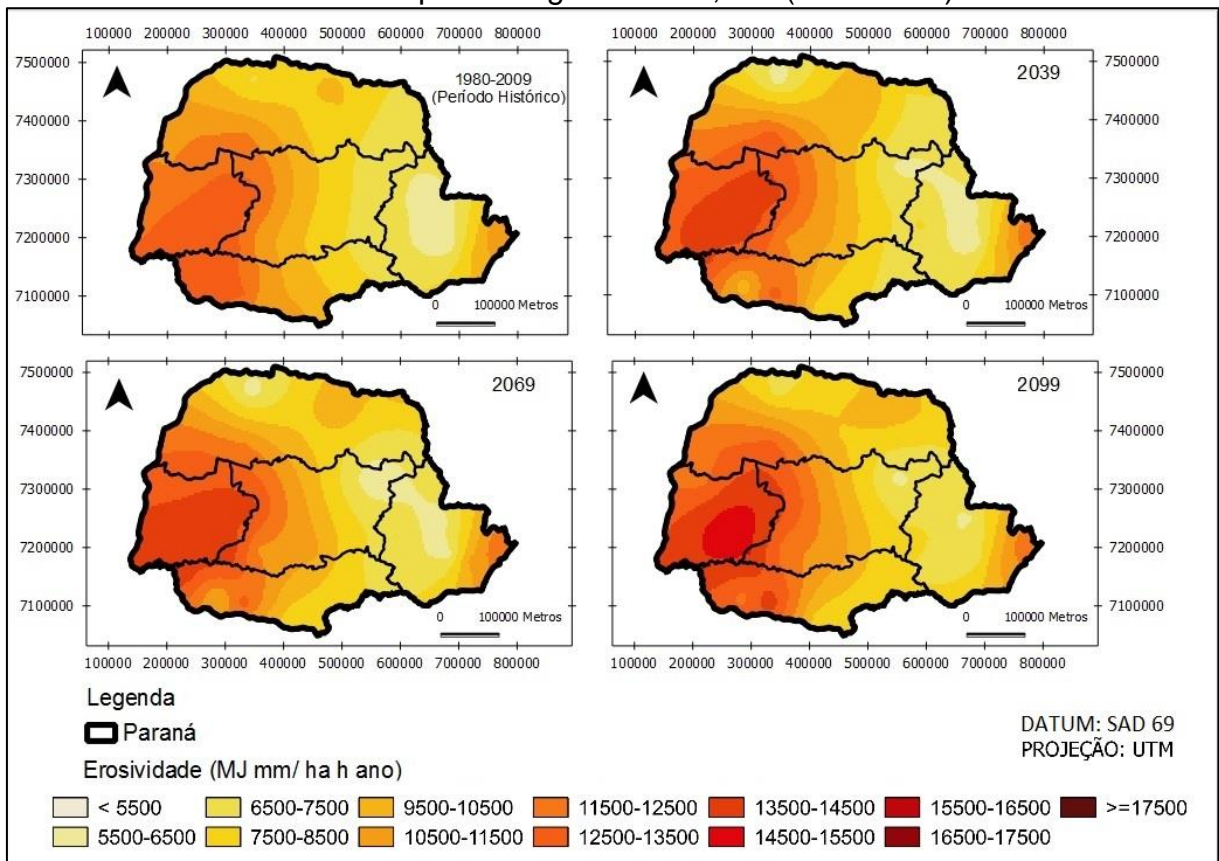
Waltrick (2010), observou que de maneira geral a erosividade anual tem valores elevados, para 2100, nas regiões oeste e sudoeste do estado, onde os valores estimados chegam à 13.400 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e 15.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, respectivamente para os cenários B2 e A2. Enquanto que nas simulações deste trabalho chegou-se à estimativa de 13.216 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e 14.472 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, respectivamente para o cenário 01 e cenário 02, com valores elevados principalmente nos municípios de Quedas do Iguaçu 14.472 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, Francisco Beltrão 14.464,87 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, Cascavel 14.195 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e Nova Cantú 14.028 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹.

Ao avaliar a erosividade em Quedas do Iguaçu, no primeiro cenário, considerando um aumento de temperatura de 1,7°C, partindo da erosividade estimada pelo histórico de precipitação, em 12.339,65 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ até 2100, a erosividade atingirá valores próximos à 13.456,83 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, caracterizando um aumento de 8,7%, conforme Figura 1.5. No segundo cenário, agora considerando um aumento da temperatura de 4,8°C, o valor foi para 15.929,36 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, aumento de 28,68% na erosividade atual, conforme Figura 1.6. As curvas de evolução apresentaram um salto entre o período de 2039 à 2069 com variação de 8,99% e 27,08% respectivamente para o primeiro e segundo cenário, conforme Figura 1.5.

Outra comparação que pode ser realizada conforme relatado por Waltrick (2010) foi a diminuição da erosividade a partir do mês de janeiro, apesar da atual simulação ter apontado valores altos de erosividade nos meses de abril e maio exclusivamente para as localidades da região oeste, em ambos cenários. E agosto foi o mês que apresentou menor estimativa nas duas simulações, diferentes da simulação de erosividade por Waltrick em 2010, apresentando julho como o mês de menor erosividade.

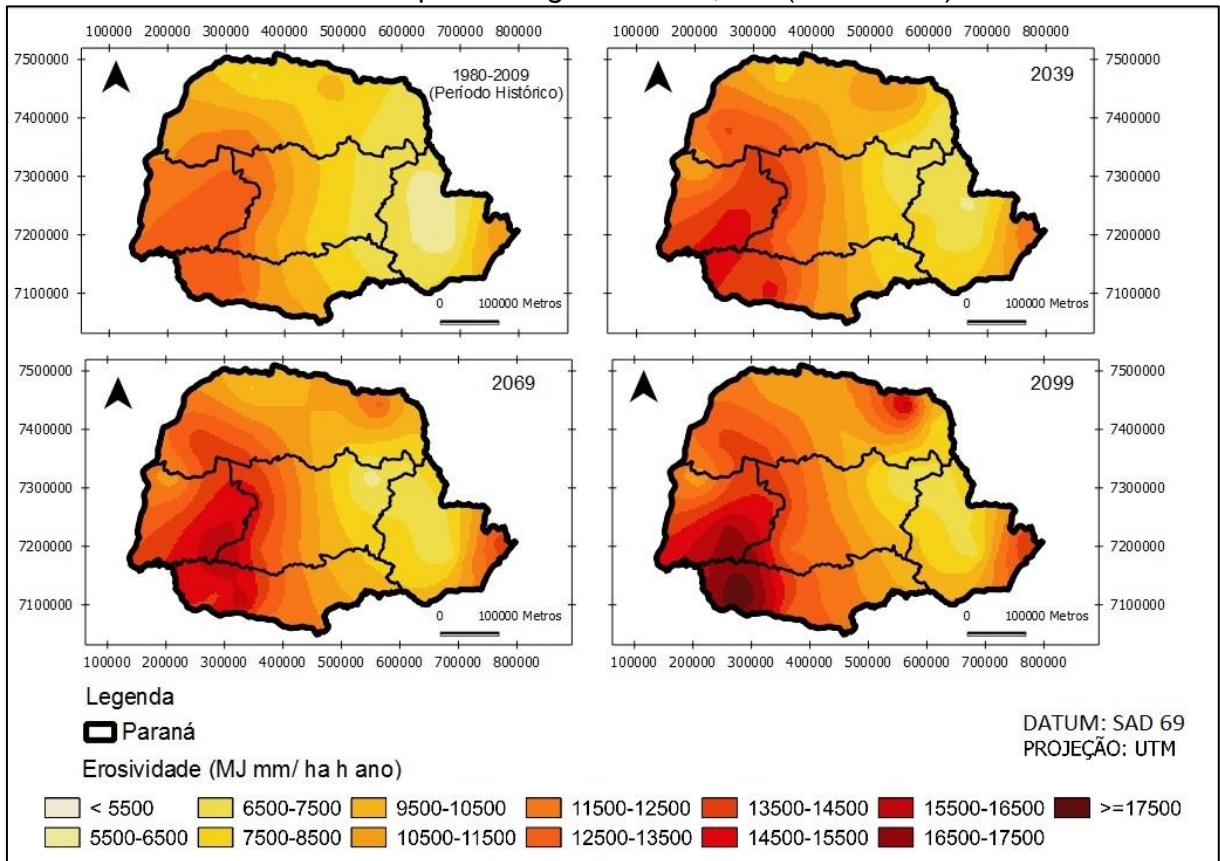
Em ambos os cenários avaliados, as simulações apresentaram avanços relevantes quando comparados ao exercício de 30 anos. Os resultados obtidos no primeiro cenário alcançaram valores superiores à $14.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em Cascavel. Enquanto no segundo cenário chegou-se ao valor extremo de $17.522 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em Francisco Beltrão, no sudoeste conforme Figura 1.8. Waltrick (2010) informa que eventos extremos com chuvas acima e abaixo da média são mais frequentes e intensas com o decorrer do século, assim podendo elevar valores de erosividade.

Figura 1.5 - Evolução da erosividade média estimada ao final dos períodos, para um cenário com aumento da temperatura global em $1,7^\circ\text{C}$ (cenário 01)



Fonte: O autor.

Figura 1.6 - Evolução da erosividade média estimada ao final dos períodos, para um cenário com aumento da temperatura global em 4,8°C (cenário 02)



Fonte: O autor.

4. CONCLUSÕES

Ocorre grande variação da erosividade da chuva nas diversas regiões do estado do Paraná, sendo que o maior valor encontrado é de 12.339,65 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, na região de Quedas do Iguaçu e o menor é de 5.728,75 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, em Cerro Azul (Tabela 1.1), nas proximidades da capital do estado, em consequência de uma área extensa que contempla várias condições edafoclimáticas.

A distribuição da erosividade da chuva durante o ano ocorre de maneira diferenciada para as localidades, com a região sudoeste apresentando erosividade alta em pelo menos 8 meses do ano, com valores próximos à 1.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹ enquanto à leste a erosividade atinge valores altos nos meses de verão, declinando até atingir seu menor valor, próximo de 150 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹, no mês de agosto.

A erosividade no estado do Paraná decresce no sentido de oeste para leste onde os índices de erosividade se apresentaram menores, na região próxima à cidade de Curitiba, onde o clima se torna temperado. No litoral a erosividade volta a subir á valores medianos, devido ao clima mais quente e úmido.

As simulações de erosividade para o final do século XXI evoluíram positivamente nos dois cenários considerados, mas os valores extremos foram alcançados no segundo cenário, atingido o máximo na região sudoeste de 17.522 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, B. S. D. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geográfica Física**, v. 7, n. 4, p. 691-701, 2014.
- ARNOLDUS, H. M. J. Uma aproximação do fator de chuvas no sistema da equação universal da perda de solo. In: DE BOOD T M.; GABRIELS, D.(Eds.). **Avaliação da erosão do solo**. Chichester, Gran Bretaña: John Wiley and Sons, 1980. p. 127-132.
- BASTOLA, S.; MISRA, V. Evaluation of dynamically downscaled reanalysis precipitation data for hydrological application. **Hydrological Process**, n. 28, p. 1989-2002, 2014.
- BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. Erosividade, coeficiente de chuva, padrões e período de retorno das chuvas em Quaraí – RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1205-1217, 2010.
- CABEDA, M. S. V. Computation of storm EI values. West Lafayette. Purdue University. 1976. 6p.
- CASTRO FILHO, C.; CATANEO, A.; BISCAIA, R. C. M. Utilização da metodologia de Wilkinson, para cálculo do potencial erosivo das chuvas em cinco localidades no Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, p. 236-239, 1982.
- COLODRO, G.; CARVALHO, M. P.; ROQUE, C. G.; PRADO, R. M. Erosividade da Chuva: Distribuição e correlação com a precipitação pluviométrica de Teodoro Sampaio (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p.809-818, 2002.
- COUTINHO, M. A.; ANTUNES, C. R. Rainfall erosivity in Madeira Island: Analysis of the 20 February 2010 catastrophe. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 36, n. 4, p. 417-425, 2013.
- DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KOPKE, U. Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura de solo, plantio direto e prepare conservacionista do solo. **Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)**, 1991. 272p.
- ELTZ, F.; CASSOL, E. A.; PASCOTINI, P. B. Potencial erosivo e característica das chuvas de Encruzilhada do Sul – RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 15, n. 4, p. 331-337, 2011.
- ELTZ, F. L. F.; CASSOL, A.; PASCOTINI, P. B.; AMORIM, R. S. S. Potencial erosivo e característica das chuvas de São Gabriel – RS, de 1963 à 1993. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 17, n. 6, 2013.
- FOURNIER, F. **Climat et erosion**. Paris: Presses Universitaires de France, 1960. 201p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, 2013.1535 p.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. **Cartas Climáticas do Paraná. Classificação climática.** Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>>. Acesso em: 27 jul. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Estatística da Produção Agrícola. Junho 2015.** 2015. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Fasciculo_Indicadores_IBGE/estProdAgr_201506.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2015.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL-IPARDES. **Paraná em números.** Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/index.php?pg_conteudo=1&cod_conteudo=2>. Acesso em: 16 jul. 2015.

LOMBARDI NETO, F.; PASTANA, F. I. Relação chuva-perda por erosão. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo de São Paulo**, São Paulo. v. 31, n. 19, p. 228-234, 1972.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com a perda de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, n. 51, v. 2, p. 189-196, 1992.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; BESCOW, S.; NORTON, L. D. Modelos multivariados para a erosividade anual no Brasil. **Geoderma**, v. 202-203, p. 88-102, 2013.

NEVES, G. L. Impacto das mudanças climáticas globais na disponibilidade hídrica do solo no estado do Paraná. 2014. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, 2015.

NICKS, A. D.; HARP, J. F. Stochastics generation of temperature and solar radiation data. **Journal of Hydrology**, v. 48, p. 1-17, 1980.

OLIVEIRA, V. P. S.; ZANETTI, S.; PRUSKI, F. Parte I: Modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 348-355, 2005.

OLIVEIRA, P. T. S. WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Journal of Soil Science**, v. 100, p.139-147, 2012.

OLIVARES, B.; VERBIST, K.; LOBO, D.; VARGAS, R.; SILVA, O. Evaluation of the USLE model to estimative water erosion in an alfisol. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 11, n. 2, p. 71-85, 2011.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Conferência das nações unidas sobre mudança climática**. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/cop21/>. Acesso em: 15 dez. 2015.

PANAGOS, P.; BALLABIO, C; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K. Rainfall erosivity in Europe. **Science Total Environment**, v. 532, p. 853-857, 2015.

PANAGOS, P.; BALLABIO, C; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; KLIK, A.; ROUSSEVA, S.; TADIC, M. P.; MICHAELIDES, S.; HRABALIKOVA, M.; OLSEN, P.; AALTO, J.; LAKATOS, M.; RYMSZEWICZ, A.; DUMITRESCU, A.; BEGUERIA, S.; ALEWELL, C. Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece. **Journal of Soil Science**, v. 137, p. 161-172, 2015.

RICHARDSON, C. W.; WRIGHT, D. A. WGEN: A model for generating daily weather variables. **USDA-ARS ARS-8**, 1984. 80p.

ROUX, J. J.; MORGENTHAU, T. L.; MALHERBE, J.; PRETORIUS, D. J.; SUMNER, P. D. Water erosion prediction at a national scale for South Africa. **Water SA**, v. 34, n. 3, p. 305-314, 2008.

RUFINO, R. L. Avaliação do potencial erosivo da chuva para o estado do Paraná: segunda aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campo Grande, v. 10, p. 279-281, 1986.

RUFINO, R. L.; BISCAIA, R. C. M.; MERTEN, G. H. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná, através de pluviometria: terceira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 437- 444, 1993.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erosividade das chuvas de Lages, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, 2014.

SCOPEL, I. **Avaliação da erosão com auxílio de técnicas de sensoriamento remoto e equação universal de perdas de solo à nordeste de Cornélio Procópio (PR)**. 1988. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 1988.

SEMENOV, M. A.; BARROW, E. M. Use of a stochastic weather generator in the development of climate changes scenarios. **Climatic Changes**, Amsterdam, v. 35, p.397-414. 1997.

SEMENOV, M. A. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. **Climate Research**, v. 35, p. 203-212. 2008.

VALENZUELA, B.; MORALES, L. S. Estimación del factor de erosividad de las precipitaciones en la región de Coquimbo. **Jornal of soil science and plant nutrition**, v. 11, n. 2, p. 71-85, 2011.

VALVASSORI, M. L.; BACK, A. J. Avaliação do potencial erosivo das chuvas em Urussanga, Santa Catarina, Brasil, no período de 1980 à 2012. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, Viçosa, 2014.

VIRGENS FILHO, J. S. **Modelo computacional para simulação de dados climáticos**. 1997. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, São Paulo, 1997.

VIRGENS FILHO, J. S. **Ferramenta computacional para simulação de séries climáticas diárias, baseada na parametrização dinâmica das distribuições de probabilidade**. 2001. 92f. Tese (Doutorado em Energia e Agricultura) –Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, São Paulo, 2001.

VIRGENS FILHO, J. S.; LEITE, M. L. Simulation of climate scenarios for the region of Campos Gerais, State of Paraná, Brazil. In: IUFRO Landscape Ecology Working Group International Conference, 2010, Bragança-Portugal. **Anais**.Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, 2010. p. 364-369.

VIRGENS FILHO, J. S.; OLIVEIRA, R. B.; LEITE, M. L.; TSUKAHARA, R. Y. Desempenho dos modelos CLIGEN, LARS-WG e PGECLIMA_R na simulação de séries diárias de temperatura máxima do ar para localidades do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 3, p. 538-547, 2013.

VRIELING, A.; STERC, G.; JONG, S. M. Satellite-based estimation of rainfall erosivity for Africa. **Journal of Hydrology**, v. 395, p. 235-241, 2010.

WALTRICK, P. C. Erosividade de chuvas no Paraná: atualização, influência do “El nino” e “La nina” e estimativa para cenários climáticos futuros. 2010. 94 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciência do Solo) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2010.

WALTRICK, P. C.; MACHADO, M. A. M.; DIECKOW, J.; OLIVEIRA, D. Estimativa da erosividade de chuvas no estado do Paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 à 2008. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 256-267, 2015.

WILKINSON, G. E. Rainfall characteristics and soil erosion in the rain forest area western Nigéria. **Exp. Agr.**, Great Britain, n. 2, p. 247-255, 1975.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. A rainfall energy its relation ship to soil loss. **Transaction American Geophysical Union**, Washington, v. 39, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 3, p. 246-249, 1959.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning .United States Department of Agriculture, 1978. 58p.

XIAO, L.; YANG, X.; CHEN, S.; CAI, H. An assessment of erosivity distribution and its influence on the effectiveness of land use conversion of reducing soil erosion in Jiangxi - China. **Journal of Soil Science**, v. 125, p. 50-60. 2015.

CAPÍTULO II

PERDA DE SOLO EM SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS COM USOS DISTINTOS NOS CAMPOS GERAIS DO PARANÁ: PROJEÇÕES ATÉ O ANO DE 2100

1. INTRODUÇÃO

Há mais de cinco mil anos, o simples plantio de pequenas áreas possibilitou ao homem fixar-se em uma determinada região, e assim dedicar mais tempo no desenvolvimento de outras atividades. Então a atividade agrícola deu forma ao mundo atual, proporcionando evolução em diversas áreas do conhecimento.

No cotidiano urbano as pessoas podem não saber ou não lembrar, de onde vem a maioria dos alimentos que consomem, mas a importância da atividade agrícola é fundamental para sustentação das cidades. O alto desempenho da produção de grãos, legumes, hortaliças e frutas é que permite o crescimento populacional.

O termo agricultura nos remete diretamente à palavra solo. Pois sem o solo fértil não existe a agricultura. Sendo assim a perda de solo por erosão diminui os níveis de produção vegetal e conseqüentemente a qualidade dos corpos hídricos, causando assoreamento e eutrofização.

Antes de mencionar a degradação ambiental por perda do solo é importante destacar que, conforme Lemos (2010), a formação do solo se dá por meio da decomposição e alteração dos substratos rochosos pelas intempéries, resultando em camadas superficiais de horizontes minerais e matéria orgânica de espessuras particulares. Ainda neste contexto Scopel (1988), afirma que a intensificação do uso da terra através de culturas consecutivas, ano após ano, substituindo florestas e pastagens, o uso de máquinas cada vez maiores e com mais frequência, aumentam o risco de erosão. O autor enfatiza que o aumento da produtividade agrícola, que prevalece até os dias atuais, mascara os problemas causados pela erosão no campo, no que se refere à perda da fertilidade natural do solo juntamente com a perda de qualidade da água da respectiva bacia hidrográfica.

Grande parte da pesquisa sobre a erosão hídrica do solo tem como diretriz mensurar a influência de cada macrofator determinante do processo erosivo

para estimar a perda do solo. Assim verificada a situação é possível definir as ações mais adequadas no cultivo e manejo (EDUARDO et al., 2013).

Devido à complexidade de processos que se relacionam à erosão, diversas propostas foram adotadas visando encontrar uma modelagem adequada com objetivo de gerar descrição física e matemática das perdas por erosão hídrica. Movimento este iniciado na década de 1940, culminou na década de 1950 com o surgimento da Equação Universal da Perda de Solo - USLE (COUTINHO et al., 2014).

Ao analisar a questão da erosão do solo, é impossível não abordar a equação universal de perda de solo (USLE) proposta por Wischmeier em 1959, que resulta da multiplicação dos fatores: erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), comprimento da rampa (L), inclinação da encosta (S), cobertura vegetal (C) e técnicas de conservação aplicadas (P), os quais tem papel fundamental na ocorrência do processo de degradação ambiental e independentemente podem alterar a severidade do fenômeno, conforme equação 2.1, abaixo:

$$A = R . K . L . S . C . P \quad (2.1)$$

Onde:

A: Perda de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$);

R: Erosividade da chuva ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$);

K: Erodibilidade do solo ($t.ha^{-1}.h.mm^{-1}.ha.MJ^{-1}$)

L: Comprimento da rampa (adimensional);

S: Declividade da encosta (adimensional);

C: Cobertura vegetal (adimensional);

P: Medidas preservacionistas (adimensional).

Dentre as características locais elencadas para a perda de solo, o homem somente pode controlar o uso e ocupação do terreno, assim determinando a cobertura vegetal e medidas de preservação da área, no caso de utilização agropecuária. Bertoni e Lombardi Neto (1990) afirmam que a forma natural de defesa do solo é a cobertura vegetal que atenua o impacto da chuva, dissipando e evaporando a água antes que atinja o solo.

Wischmeier e Smith (1978) afirmam que as equações de perda de solo foram desenvolvidas para permitir planos de conservação com objetivo de limitar a

erosão do solo em vários locais e condições. Neste contexto a EUPS é um modelo desenvolvido para previsão média de fuga de solo, tendo como parcela o fator K (erodibilidade do solo). Tornando esta equação ferramenta importante para trabalhos de conservação de solo fornecendo subsídio para planejamento e uso do solo (ALVARES E SILVA, 2005). Pois o problema de perda de solo é atual, e apesar das práticas adotadas no campo, a degradação do meio ambiente por erosão vem aumentando.

A perda de solo por erosão foi o foco do trabalho de Petan et al. (2010), realizado na área de 187 Km² que compreende a Bacia Hidrográfica do rio Leça, Portugal. De acordo com os autores, os impactos da produção de sedimentos nesta região se mostram preocupantes, pois a bacia deságua no porto de Leixões, estrutura fundamentalmente estratégica para o desenvolvimento econômico.

Ayer et al. (2015) ao estudar a erosão hídrica em latossolo vermelho, no sul do estado de Minas Gerais, verificaram que as maiores taxas de perda de solo são em áreas com plantio de eucalipto e batatas, onde a simulação com práticas conservacionistas reduziria drasticamente a perda média.

Como a erosão hídrica é fundamentalmente causada pela água proveniente de precipitações pluviais em uma determinada região, torna-se primordial para entender o fenômeno, o conhecimento das características da chuva.

Assim a erosividade da chuva é representada pelo índice EI_{30} , que é definido como sendo igual ao produto da energia cinética da gota de chuva (E) pela máxima intensidade verificada em 30 minutos (I_{30}) (SCOPEL, 1988).

Lombardi Neto, 1977, reforça o fato de que os registros pluviográficos são escassos, quando não inexistentes em países pouco desenvolvidos. Além da análise de diagramas dos pluviógrafos para fins de cálculo da energia cinética ser extremamente moroso e trabalhoso. Diversos autores tentaram correlacionar o índice de erosão com fatores climáticos de mais fácil medida e que não requerem registro de intensidade da chuva, como a pluviometria.

Wischmeier (1959), ainda observa que o índice EI_{30} representa um termo de interação que mede o efeito de como a erosão por impacto, o salpico e a turbulência se combinam com o escoamento superficial para transportar partículas de solo desprendidas. Sendo uma estimativa e não pretende chegar a números absolutos.

Com o cálculo do Coeficiente de Fournier (R_c) através das médias de

precipitações mensal (p) e anual (P) possibilitou estimar o EI_{30} , com o auxílio de equações próprias para cada localidade.

Wischmeier e Smith (1978), demonstraram didaticamente o fator erodibilidade do solo como a diferença de suscetibilidade entre solos à erosão quando estes são expostos às mesmas condições. Um solo será mais ou menos erodido dependendo de suas propriedades, sendo difícil quantificar esta característica de resistência á erosão somente com observações de campo. Silva (2000) resumiu a erodibilidade como sendo a predisposição do solo ser erodido, determinada por atributos intrínsecos deste. Bertoni e Lombardi Neto (1990) relataram que as propriedades do solo que condicionam a velocidade de infiltração da água, a permeabilidade e absorção influenciam no padrão de erodibilidade do mesmo.

Nas últimas duas décadas vários trabalhos sobre a perda de solo tem sido elaborados no Brasil, sendo que a maioria tem foco na erosividade da chuva em diversas regiões. Não menos importante, a erodibilidade do solo exige tempo de observação e experimentos bem executados.

A erodibilidade não pode ser avaliada apenas em simples observações de campo, mas através de métodos diretos ou indiretos. Nos métodos diretos as condições de campo são consideradas e quantificadas. Estes métodos consomem muito tempo e são muito onerosos. Já os métodos indiretos segundo Silva (2000) são baseados em regressões múltiplas com variáveis independentes morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas do solo. Conforme Correchel (2003), dentre estes métodos se destacam os de Wischmeier et al. (1971), Lima et al. (1990), Denardin (1990), Roloff e Denardin (1994).

De acordo com Lima et al. (2007) é possível determinar a erodibilidade de um solo por características de mais simples obtenção, porém não existe um método indireto melhor ou pior. Então estudos como o referido acima se prestam a testar vários métodos e comparar com dados medidos em campo. Importante lembrar que Silva (2000), ao avaliar vários métodos para latossolos brasileiros recomendou o desenvolvimento de modelos específicos para este tipo de solo.

Por meio de análises físicas e químicas de diversos tipos de solo, Denardin (1990) determinou o fator de erodibilidade para 31 solos brasileiros e 46 solos norte americanos, por meio de um modelo que leva em consideração parâmetros granulométricos, de permeabilidade, diâmetro médio ponderado das

partículas menores que 2 mm e relação entre o teor de matéria orgânica e teor da areia pelo método da pipeta, tendo chegado à valores extremos de 0,003 e 0,041 $t \cdot ha^{-1} \cdot h \cdot mm^{-1} \cdot ha \cdot MJ^{-1}$. Ainda, conforme Wischmeier e Smith (1978), verificou-se um aumento da resistência à desagregação e transporte quando amostras apresentam uma diminuição do teor de silte, independente do aumento de argila ou areia. Lombardi Neto e Bertoni (1975), concluíram que os latossolos, geralmente são mais resistentes à erosão do que os solos podzólicos, e para estes, a medida que aumenta o gradiente textural entre os horizontes A e B, a erodibilidade também aumenta.

O trabalho de Lima et al. (2007) considerou, o método que melhor estimaram a erodibilidade na bacia hidrográfica do alto rio jardim, Distrito Federal, foi o de Denardin (1990), apesar deste método indireto não apresentar o fator K com similaridade estatística ao valor de referência obtido por métodos diretos.

Neves et al. (2011) tendo o sudoeste do estado do Mato Grosso como área de estudo, estimou a perda de solo na bacia hidrográfica do rio Jauru, parte da bacia do hidrográfica do alto rio Paraguai, totalizando 11.705 km² de superfície, onde aproximadamente 81% da bacia, é solo de alta erodibilidade, porém o grau da perda de solo foi de nulo à ligeiro, com perda média de 3,26 $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$.

Também no estado do Paraná, Biscaia et al. (1981), apresentaram valores de erodibilidade para dois solo muito utilizados na agricultura do estado: o latossolo vermelho-escuro hálico encontrado na região dos Campos Gerais e o latossolo roxo distrófico encontrado na região norte do Paraná, próximo ao município de Londrina. O referido experimento permitiram aos autores calcular de quatro formas diferentes o valor do fator K e apontarem o que teve melhor representatividade estatística. Trabalho pioneiro no estado.

Em um trabalho para analisar a perda de solo na bacia hidrográfica do rio Mourão, afluente do rio Ivaí no estado do Paraná, Graça et al. (2015) mapearam os tipos de solos encontrados e atribuíram taxas de erodibilidade tomando como referência estudos realizados em solo semelhantes no estado de São Paulo, por diferentes pesquisadores.

Para o uso do solo, Bertoni e Lombardi Neto (1990), consideraram as características morfológicas do terreno como de maior importância, como por exemplo: a declividade quando muito acentuada torna-se inviável para o plantio de culturas como a soja ou milho. O comprimento e grau do declive de uma sub-bacia

são fatores pesquisados separadamente, mas sua aplicação na Equação Universal de Perda de solo, são considerados conjuntamente como sendo o chamado fator topográfico, ou fator LS.

O fator topográfico é calculado com base nas equações de Bertoni (1959), que, por sua vez, resultaram na Equação 2.2, abaixo:

$$LS = 0,00984 \cdot C^{0,63} \cdot D^{1,18} \quad (2.2)$$

Onde:

LS: Fator topográfico;

C: Comprimento da rampa em metros;

D: Grau do declive em porcentagem.

Sendo o fator topográfico de difícil obtenção para grandes áreas e relevos diversificados, Coutinho et al. (2014) especializaram o fator LS para a bacia hidrográfica da Prata, em Castelo – ES, a partir do processamento de dados cartográficos em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas - SIG, utilizando a equação desenvolvida por Bertoni e Lombardi Neto (1990), abrangendo uma área de 132,3 Km². No referido trabalho bem como em grande parte dos trabalhos de perda de solo, o fator topográfico é estimado a partir da equação 2.2 e com o apoio de um SIG.

De acordo com Lemos (2010), a cobertura do solo é o fator determinante para a proteção deste e redução de suas perdas. Assim o fator C é determinado pelo tipo de cobertura da superfície do terreno. Conforme Ross (2012), o uso diversificado do solo propicia graus diferenciados de vulnerabilidade à erosão, em função da cobertura vegetal existente e do manejo. Neste contexto, conforme Ribeiro et al. (2016), as áreas de pastagem foram consideradas de alta vulnerabilidade enquanto florestas foram qualificadas de média e posteriormente baixa vulnerabilidade.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1990) numa área mantida com solo descoberto, a perda de solo pode ser estimada pela USLE. Contudo se a área estiver cultivada, as perdas serão reduzidas, pois a cultura oferece certa proteção ao solo, redução esta que depende da combinação de cobertura vegetal, sequência de cultivos e estágio do desenvolvimento da cultura no período de chuva, uma vez que o fator C é a relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em

dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido descoberto.

Ainda segundo os autores, Bertoni e Lombardi Neto (1990), o fator P da USLE, pode ser definido como a relação entre a intensidade de perda de solo esperada com determinada prática conservacionista e aquela onde a cultura esta plantada em declive, representado na equação 2.3.

$$P = PSC / PSD \quad (2.3)$$

Onde:

PSC: Perda de solo com práticas conservacionistas;

PSD: Perda de solo da cultura em declive.

Oliveira et al. (2014) descrevem que o factor P varia de 0 a 1 e expressa como as práticas de gestão de superfície são capazes de reduzir a erosão. A maioria das bacias hidrográficas não apresenta efetivas práticas de controle de erosão, com exceção de grandes propriedades rurais onde a atuação de um profissional técnico é constante, fazendo com que o fator P, possa ser considerado um.

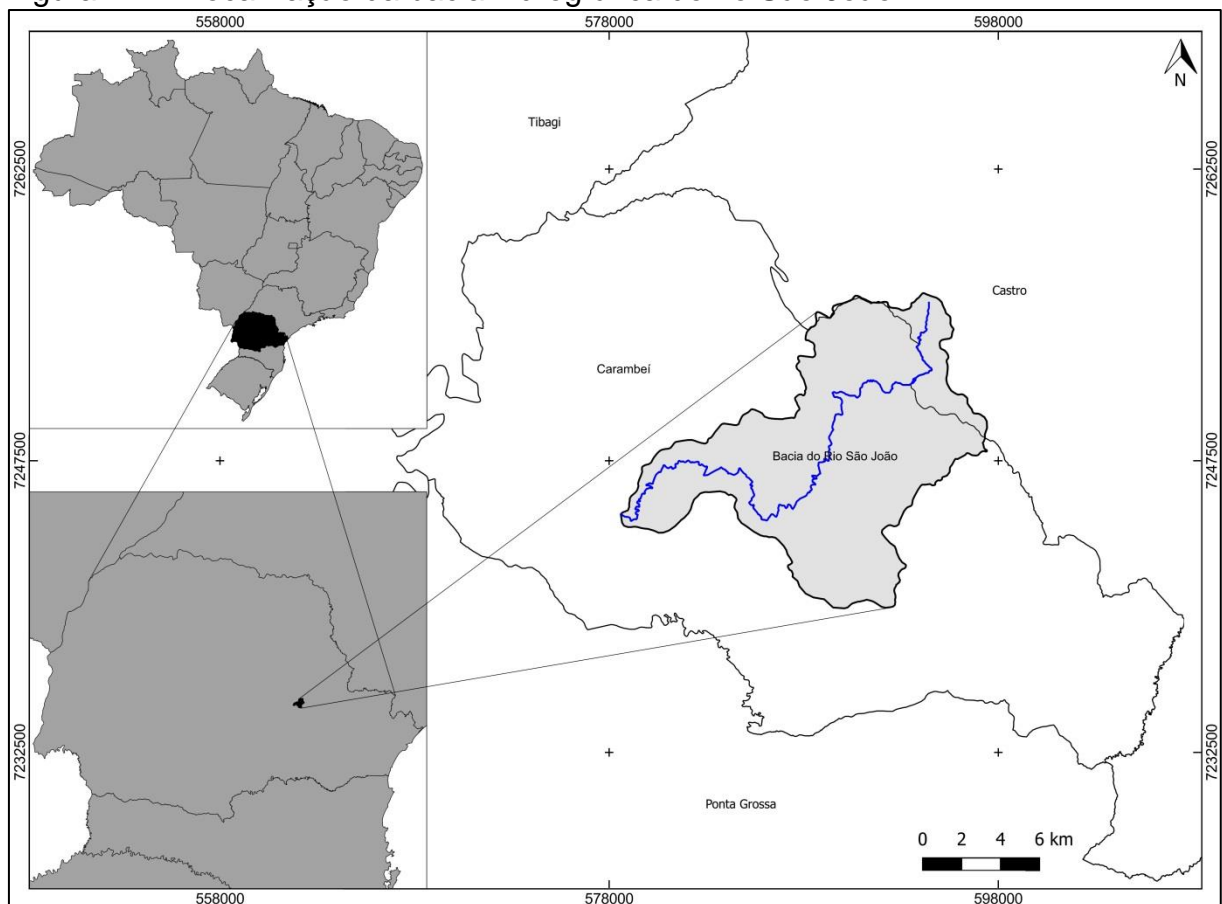
Tendo em vista que a perda do solo em bacias hidrográficas contribui para a ocorrência da degradação ambiental regional, este trabalho objetivou a projeção da perda de solo até 2100, na região dos Campos Gerais por meio da simulação de cenários climáticos, utilizando o software PGECLIMA_R (2013), baseada nas alterações previstas no 5º relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC-2013), que impactará mais efetivamente na erosividade da chuva, a qual representa o fator R da USLE.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

O rio São João está localizado no estado do Paraná, no segundo planalto paranaense, região dos Campos Gerais. Apesar da maior parte da bacia hidrográfica pertencer ao município de Carambeí, este corpo hídrico tem início no município de Castro, sendo afluente da margem direita do rio Pitangui, tendo sua localização geográfica apresentada na Figura 2.1, abaixo:

Figura 2.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio São João



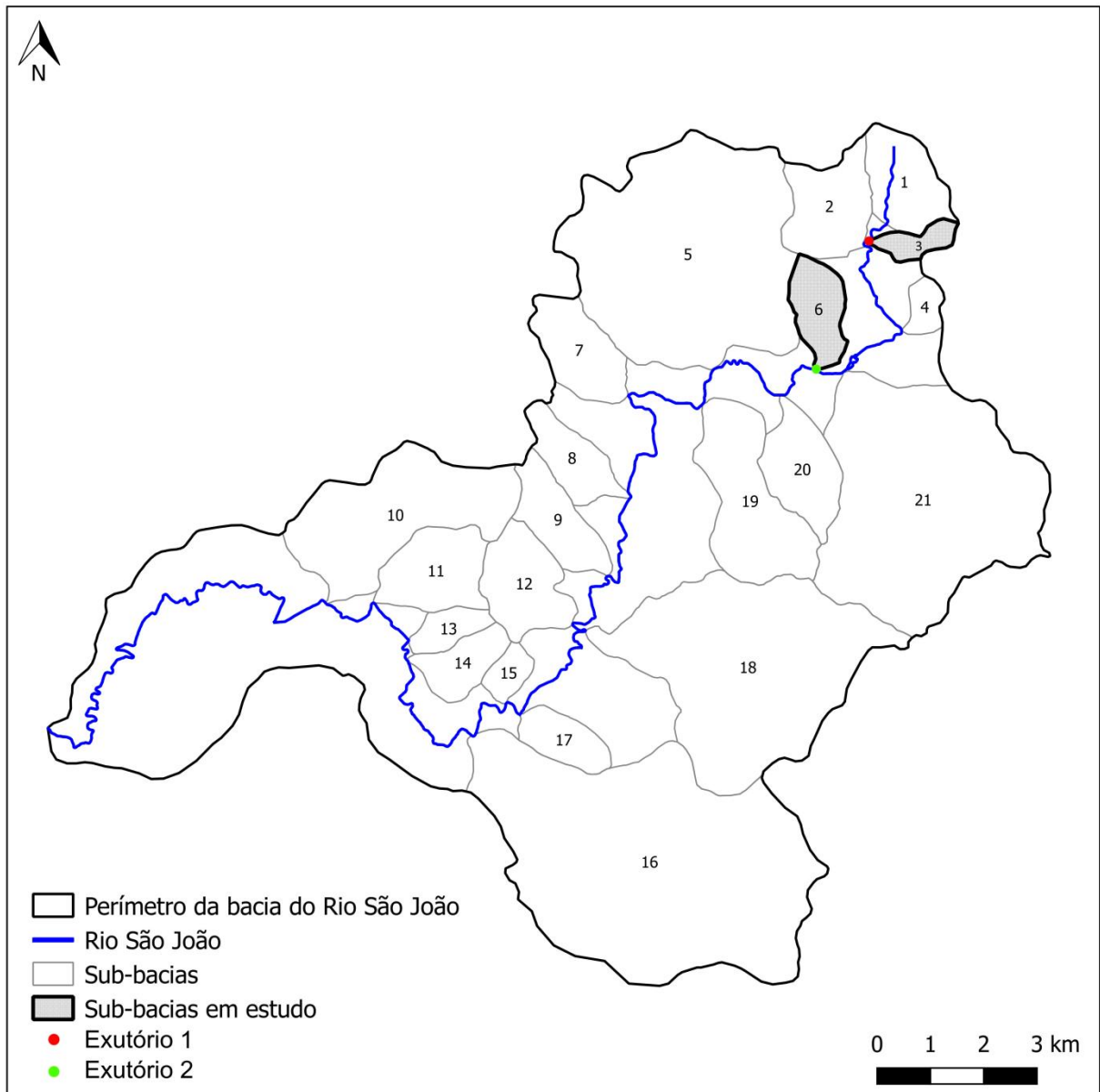
Fonte: FREITAS, 2016

A bacia hidrográfica do rio São João pertence à uma região climática classificada como Cfb – Clima Mesotérmico (temperado), úmido – sem estação seca definida, com verões amenos, segundo a classificação de Kopen (Fundação ABC, 2016). Conforme FREITAS (2016) esta bacia, com área de 145 km², faz parte da Bacia hidrográfica do rio Tibagi, que tem papel fundamental no desenvolvimento do estado do Paraná.

Na bacia hidrográfica do rio São João, Freitas (2016) delimitou 21 sub-

bacias, das quais optou por escolher duas destas com a maior representatividade de uso do solo na região para estudar a qualidade da água. As sub-bacias selecionadas por Freitas (2016) foram as sub-bacia 03 com uso predominante de agricultura e sub-bacia 06, ocupada predominantemente por vegetação nativa, apresentadas na Figura 2.2. Da mesma forma que Freitas (2016), neste trabalho a sub-bacia 06 será renomeada sub-bacia 1 e a sub-bacia 03 será renomeada sub-bacia 2.

Figura 2.2: Posição da sub-bacias constituintes da bacia hidrográfica do rio São João



Fonte: Adaptado de Freitas, 2016.

2.2 Erosividade da chuva (R)

A erosividade de uma chuva é a característica que esta tem de erodir mais ou menos o solo sem proteção. Conforme Bertoni e Lombardi Neto (1990) o valor numérico que representa a erosividade da chuva é dado pelo índice EI_{30} , o qual é produto da energia cinética com que as gotas atingem o solo, por sua intensidade máxima de 30 minutos. Devido à dificuldade de conseguir dados pluviográficos para determinação do índice de chuva EI_{30} , o método de Fournier foi criado para a estimativa deste índice por meio do Coeficiente de Chuva (R_c), que por sua vez é calculado por meio das médias mensais e anuais dos dados pluviométricos, como mostrado na equação 2.4, abaixo:

$$R_c = p^2 / P \quad (2.4)$$

Onde:

R_c : Coeficiente de chuva

p : Precipitação média mensal (mm)

P : Precipitação média anual (mm)

Rufino et al. (1993) propôs equações de regressão entre o índice EI_{30} e o coeficiente de chuva R_c , dividindo o estado do Paraná em oito regiões. Estas equações foram revisadas por Waltrick et al. (2015) e continuam válidas. Assim o índice EI_{30} na região de Ponta Grossa pode ser obtido pela equação 2.5, abaixo:

$$EI_{30} = 93,29 + 41,20 \cdot R_c \quad (2.5)$$

Onde:

EI_{30} : Índice de erosividade ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ano^{-1}$)

R_c : Coeficiente de chuva (adimensional)

O histórico de precipitação diária registrado na estação meteorológica do IAPAR, na região de Ponta Grossa, no período de 1980 à 2009, foi fundamental para a estimativa mais precisa da erosividade da chuva na região.

A projeção das precipitações diárias até o final do século XXI, através do simulador computacional estocástico PGECLIMA_R, permitiu estimar valores de erosividade, na bacia do rio São João. Foram utilizadas as projeções de erosividade da chuva para todo o estado do Paraná, efetuadas no capítulo anterior, para os dois

cenários extremos apresentados no quinto relatório do IPCC – 2013, o primeiro cenário prevendo um acréscimo da temperatura global em 1,7°C e o segundo com acréscimo de 4,8°C, apresentando mapas de linhas isoerodentes que abrangem a totalidade do estado, com a evolução das mesmas a cada período de 30 anos até 2100.

Para análise dos valores de erosividade, a classificação de Carvalho (2008), na Tabela 2.1, parametriza os resultados a serem obtidos.

Tabela 2.1: Classificação do índice de erosividade da chuva

| Erosividade - MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ | Classe de erosividade |
|--|------------------------------|
| R ≤ 2452 | Erosividade fraca |
| 2452 < R ≤ 4905 | Erosividade Moderada |
| 4905 < R ≤ 7357 | Erosividade Moderada a forte |
| 7357 < R ≤ 9810 | Erosividade forte |
| R > 9810 | Erosividade muito forte |

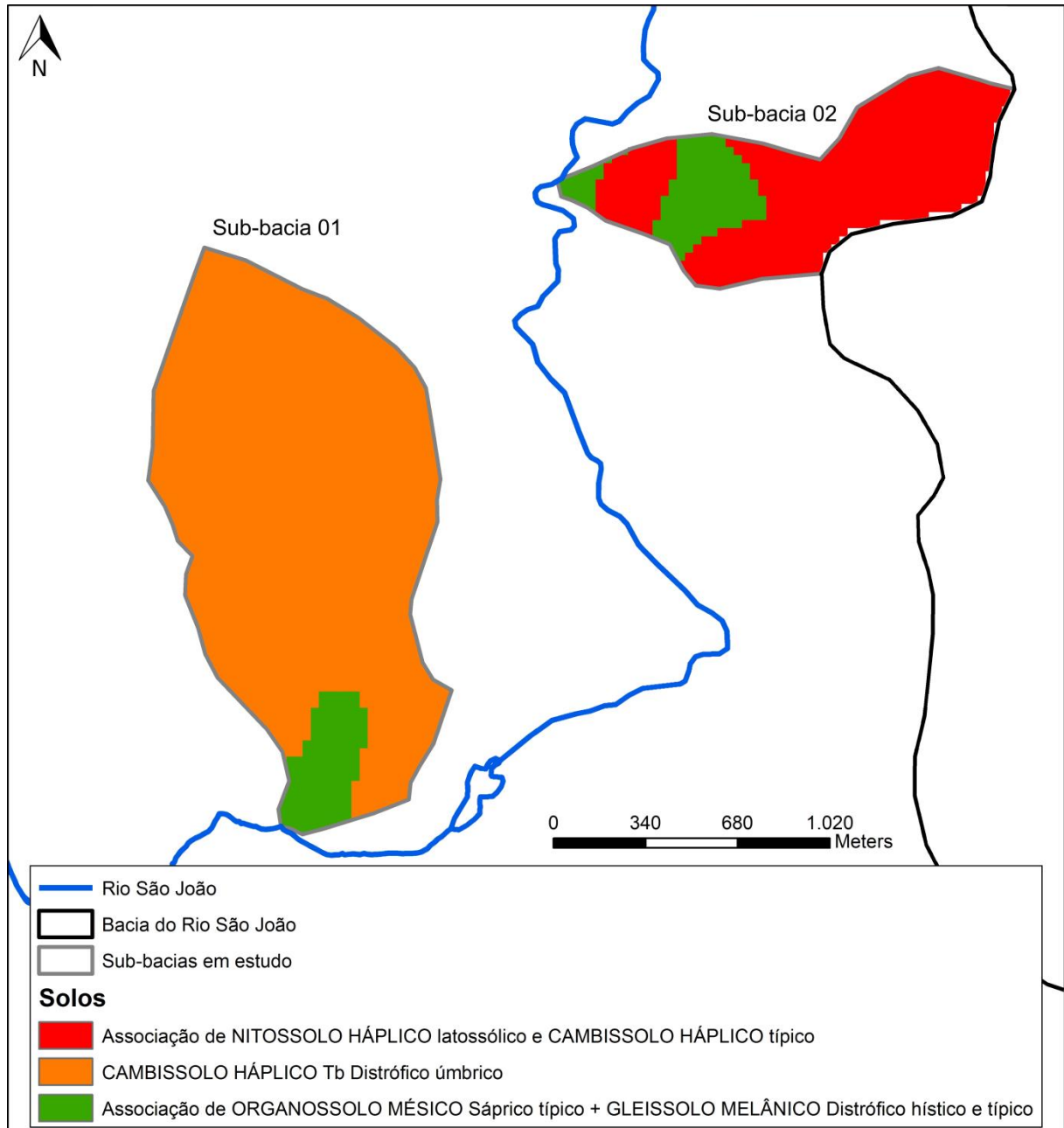
Fonte: Carvalho, 2008.

2.3 Erodibilidade do solo (K)

As propriedades do solo que influenciam na erodibilidade são as que afetam a velocidade de infiltração, a permeabilidade, a capacidade de armazenamento de água e que oferecem resistência às formas de dispersão, salpico, abrasão, transporte e escoamento pelas chuvas (LARIOS, 2003).

Com o auxílio do levantamento do solo do estado do Paraná realizado em 2007, pela Embrapa Florestas, em conjunto com o Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR, foi possível verificar a ocorrência dos diversos tipos de solo em cada região. Também foram utilizados diversos trabalhos sobre a perda de solo, que possibilitou adotar valores para erodibilidade do solo existente na área de estudo. Na Figura 2.3 observa-se a disposição dos tipos de solo encontrados nas sub-bacias de estudo, com valores especializados, inerentes a cada tipo de solo.

Figura 2.3: Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio São João, com destaque para as sub-bacias 1 e 2



Fonte: Adaptado de Rocha, 2014.

Como cada tipo de solo tem uma resistência característica própria à erosão, os valores adotados para perda de solo foram provenientes do trabalho de Lemos (2010), onde foram amostrados diversos solos da bacia do Alto Pitangui que, por sua vez reuniu e utilizou valores encontrados anteriormente por ensaios da Embrapa. Concordando com a autora, optou-se por adotar os valores médios de K, para cada tipo de solo.

No Quadro 2.1 são apresentados os tipos de solo e os respectivos valores de erodibilidade existentes nas sub-bacias 01 e 02:

Quadro 2.1: Valores de erodibilidade (K), em $t.ha^{-1}.h.mm^{-1}.ha.MJ^{-1}$, para os solos encontrados nas sub-bacias 01 e 02

| Local | Solo | Sigla | K médio | Citação |
|--------------|---|--------|---------------|-------------|
| Sub-bacia 01 | CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico úmbrico, textura argilosa, álico, fase florestal subtropical perenifólia, relevo suave ondulado, substratos migmatitos (Bheringet al.,2008). | CXbd 1 | 0,0231 | Lemos, 2010 |
| | Associação de ORGANOSSOLO MÉSICO Sáprico típico + GLEISSOLO MELÂNICO Distrófico hístico e típico, epieutrófico, ambos fase campo e floresta subtropical de várzea, relevo plano (Fasolo et al.,2002) | OYs2 | 0,0196 | Lemos, 2010 |
| Sub-bacia 02 | Associação de NITOSSOLO HÁPLICO latossólico, relevo ondulado + CAMBISSOLO HÁPLICO típico, Tb, relevo forte ondulado, ambos Distróficos, textura argilosa, fase floresta subtropical (Fasolo et al.,2002). | NXd | 0,0234 | Lemos, 2010 |
| | Associação de ORGANOSSOLO MÉSICO Sáprico típico + GLEISSOLO MELÂNICO Distrófico hístico e típico, epieutrófico, ambos fase campo e floresta subtropical de várzea, relevo plano (Fasolo et al.,2002) | OYs2 | 0,0196 | Lemos, 2010 |

Fonte: Adaptado de Lemos, 2010.

Para a avaliação dos valores de erodibilidade, quanto à intensidade, a classificação de Carvalho (2008), na Tabela 2.2, foi utilizada para parametrizar os resultados a serem obtidos:

Tabela 2.2: Classificação do índice de erodibilidade do solo

| Erodibilidade - $Mg ha^{-1} h mm^{-1} ha MJ^{-1}$ | Classes de erodibilidade |
|---|--------------------------|
| $K \leq 0,015$ | Erodibilidade baixa |
| $0,015 < K \leq 0,030$ | Erodibilidade média |
| $K > 0,030$ | Erodibilidade alta |

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008)

Os dados referentes ao fator K, foram “rasterizados” a partir do arquivo vetorial referente aos solos da área analisada.

2.4 Fator topográfico (LS)

Os fatores comprimento da encosta (L) e declividade do terreno (S) serão representados em conjunto, denominado fator topográfico, conforme a equação 2.6,

proposta por Bertoni (1959).

$$LS = 0,00984 \cdot C^{0,63} \cdot D^{1,18} \quad (2.6)$$

Onde:

LS: Fator topográfico;

C: Comprimento da rampa em metros;

D: Grau do declive em porcentagem.

Para determinação do comprimento da rampa (C) em ambiente SIG, utilizou-se a função proposta por Mendonça et al. (2014), representada na equação 2.7:

$$L = \sqrt{P^2 + \left(\frac{D}{100} * P\right)^2} \quad (2.7)$$

Onde:

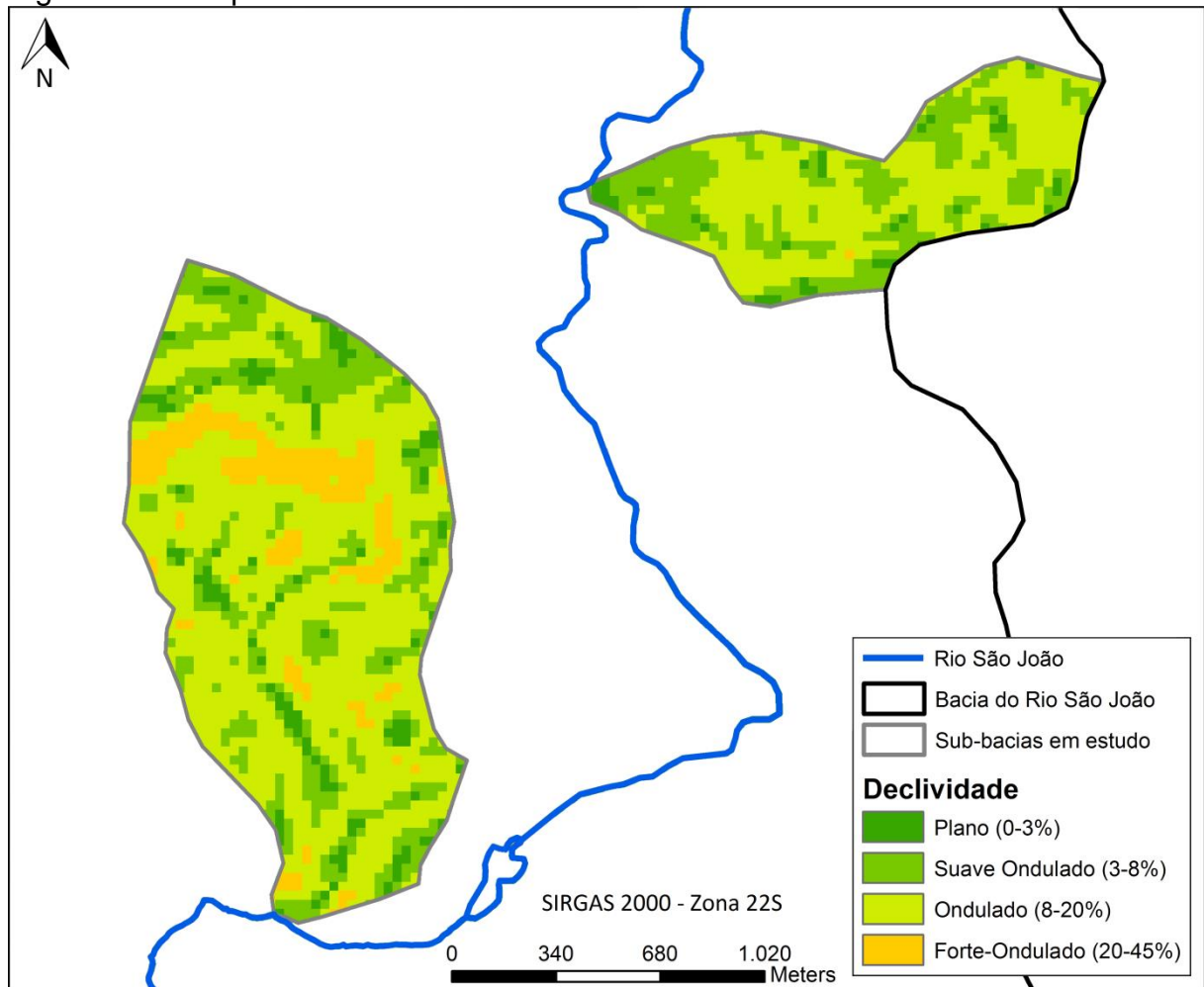
L: Comprimento da rampa;

P: Tamanho do Pixel adotado;

D: Grau do declive em porcentagem.

As declividades das áreas estudadas podem ser comparadas entre si na Figura 2.4, onde são observados os pontos mais inclinados existentes em cada área. Sendo que de maneira geral, são mínimas as áreas planas ou fortemente onduladas, prevalecendo terrenos com inclinação entre 3 à 20 %.

Figura 2.4 – Mapa de declividade das sub-bacias 01 e 02



Fonte: Adaptado de Freitas (2016).

No Tabela 2.3, observa-se a classe de fragilidade do solo em função do fator topográfico, obtido por Campos et al. (2006). Destaca-se que o comprimento da encosta tem significativa influência na perda de solo, diferindo na espacialização da declividade.

Tabela 2.3 – Classificação do fator LS de acordo com a fragilidade à do terreno e percentuais nas respectivas sub-bacias

| Fator LS | Classe de Fragilidade | SUB-BACIA 01 Ocorrência (%) | SUB-BACIA 02 Ocorrência (%) |
|-----------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0 - 1,5 | Muito Baixa | 23,24 | 30,96 |
| 1,5 - 2,5 | Baixa | 20,46 | 35,92 |
| 2,5 - 3,5 | Média | 17,62 | 18,47 |
| 3,5 - 4,5 | Alta | 14,89 | 11,46 |
| > 4,5 | Muito Alta | 23,79 | 3,18 |

Fonte: Adaptado Campos et al. (2006).

2.5 Uso do solo (C)

Ressalta-se que a cobertura do solo é a proteção à perda do mesmo e, conseqüentemente, à degradação ambiental. Assim, toma-se como base que quanto maior a quantidade de biomassa vegetal que estiver aderida à superfície, menores serão os danos causados pelas intempéries.

Os valores para o fator de cobertura vegetal foram adotados a partir de busca de fatores já tabelados na literatura. A diversidade de valores encontrados por autores diferentes permitirá a avaliação das considerações individuais, porém é interessante analisar trabalhos anteriores que tenham áreas de estudo em condições semelhantes às da bacia do rio São João. Na tabela 2.4, constam os fatores C adotados para os usos do solo nas sub-bacias 01 e 02, e as respectivas citações bibliográficas.

Tabela 2.4– Valores de C para as classes de uso do solo e ocorrência nas respectivas sub-bacias

| Cobertura do solo | Fator C | Citação |
|----------------------|---------|--|
| Floresta nativa | 0,0010 | Thompson et al., 2013 (Costa et al., 2005) |
| Reflorestamento | 0,0030 | Lemos, 2010 (Walker, 2004) |
| Cultura - bracatinga | 0,0030 | Lemos, 2010 (Walker, 2004) |
| Agricultura | 0,2559 | Thompson et al., 2013 (Costa et al., 2005) |
| Área Urb. - granja | 0,0075 | Thompson et al., 2013 (Costa et al., 2005) |
| Campo | 0,0420 | Mendonça et al., 2014 (Silva, 2004) |

Fonte: O autor.

O fator C foi rasterizado a partir dos dados da camada vetorial referente ao uso e cobertura do solo. Os mapas rasterizados serão apresentados com resolução de 30 m.

2.6 Medidas conservacionistas (P)

Bertoni e Lombardi Neto (1990) determinaram valores para o fator das práticas conservacionistas mais comumente utilizadas como o plantio em contorno, alternância de campinas com plantio em contorno e cordões de vegetação permanente, e também quando o plantio é realizado em declive, sem qualquer preocupação com a preservação do solo onde o valor é máximo e igual a um. Este trabalho visa a perda de solo e não tem como objetivo discutir ou avaliar planos de manejos na bacia do rio São João. Assim a importância das medidas

conservacionistas na questão da perda de solo é inquestionável, mas a proposta considera que o fator relativo às mesmas, nas duas áreas estudadas, estão, em equivalência por serem aplicados na mesma bacia hidrográfica e estarem relativamente próximas, cerca de 1000 metros. Portanto, foram admitidos valores unitários iguais tanto para sub-bacia 01, onde predomina floresta, como para a sub-bacia 02, onde predomina a atividade agrícola.

2.7 Perda de solo (A)

A partir da identificação dos fatores e determinação de seus valores nas áreas analisadas, pode se estimar a perda de solo por erosão laminar em $t.ha^{-1}.ano^{-1}$, com aplicação da USLE.

Com o auxílio de um SIG, cada fator georreferenciado e sobreposto resultou em uma imagem que representa a estimativa da perda de solo em cada ponto das sub-bacias, bem como demonstra em que locais a erosão laminar é mais suscetível. Desta forma é possível avaliar a diferença de perda de solo em micro-bacias com usos distintos.

Para obtenção dos dados de perda de solo, foi feita uma operação de álgebra de mapas, com os arquivos referentes a bacia do Rio São João.

2.7.1 Projeções de perda de solo até 2100

Com a variação da erosividade da chuva até o final do século XXI, projetada a partir de dois cenários propostos pelo quinto relatório do IPCC-2013, o primeiro com um aumento da temperatura global em $1,7^{\circ}C$ e o segundo com aumento da temperatura global em $4,8^{\circ}C$, abre como opção a simulação da perda de solo nas sub-bacias comparadas, onde se supõem a continuidade dos outros fatores, inclusive a utilização do solo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Erosividade da chuva (R)

Os valores de erosividade (fator R) atuais para as bacia podem ser considerados altos, de acordo com a classificação por Carvalho (2008), com uma média anual, com cerca de $6.677,86 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Valor este, concordante com os encontrados por Waltrick et al. (2010) para a região próxima ao município de Ponta Grossa. Os índices variam entre $6.665,50 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e pouco mais de $6.690,23 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, variação muito pequena devido à proximidade das microbacias de estudo com uma amplitude aproximada de $24,73 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

Devido ao fato que os valores de erosividade da chuva utilizados serem resultado da espacialização no estado do Paraná, com aproximadamente 199.880 Km^2 , e o presente estudo se concentrar numa bacia hidrográfica (Rio São João) de 135 Km^2 , os valores interpolados de erosividade tiveram pequena variação.

O valor médio de erosividade projetado para o final do século XXI para o primeiro cenário (aumento de $1,7^\circ \text{ C}$ na temperatura global) nos três períodos de 30 anos a partir de 2010, foram respectivamente:

$$6.946,95 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$$

$$6.830,71 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$$

$$7.088,30 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$$

Enquanto que para o segundo cenário os valores evoluíram da seguinte maneira para os mesmos períodos de 30 anos:

$$7.150,62 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$$

$$7.375,19 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$$

$$7.707,16 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$$

3.2 Erodibilidade do solo (K)

Dos solos encontrados na sub-bacia 01 é predominante o cambissolo háplico tb distrófico úmbrico, textura argilosa, álico, fase florestal subtropical

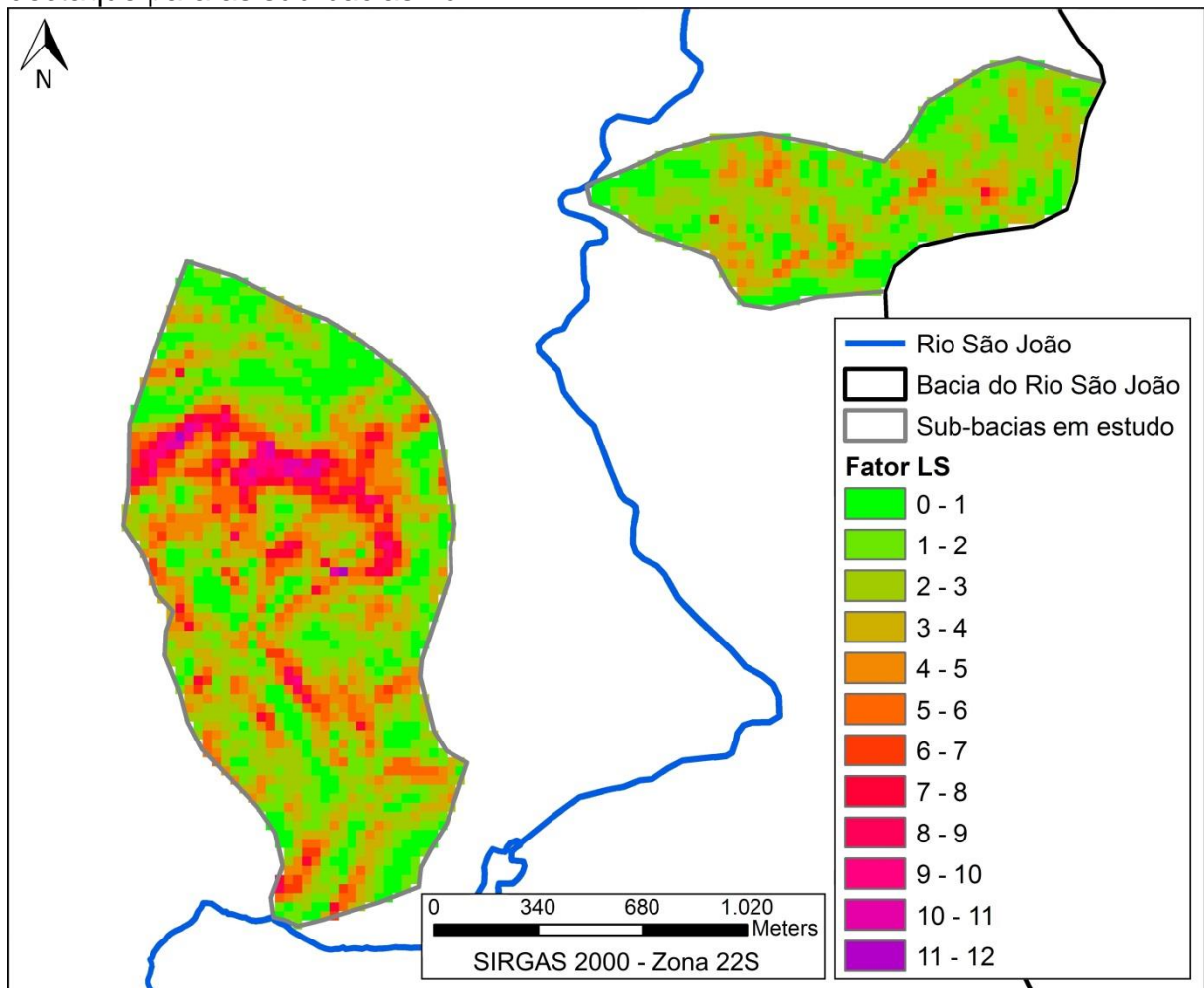
perenifolia de relevo suave ondulado, com erodibilidade considerada média de acordo com a classificação de Carvalho (2008). Já na sub-bacia 02 a predominância ocorre com a associação de nitossolo háplico latossólico de relevo ondulado e cambissolo háplico típico, tb, relevo forte ondulado, ambos distróficos, textura argilosa, de floresta subtropical, considerada como erodibilidade média de acordo com a classificação supracitada. Nas áreas próximas ao exultório das duas sub-bacias ocorrem a associação de organossolo méxico sáprico típico com gleissolo melânico distrófico hístico e típico, ambos os solos de região de várzea em relevo plano. Já a bacia do rio São João contempla nove tipos de solos com características bem distintas.

3.3 Fator topográfico (LS)

Resultante das inclinações do terreno e comprimento das rampas ou vertentes, o fator topográfico (LS) para as micro-bacias em questão variou de 0,00 à 11,96. Prevalendo no sub-bacia 01 valores entre 0,00 e 11,96, onde 38,68 % da área tem o fator topográfico considerado alto ou muito alto, de acordo com a classificação de Campos et al. (2006) na tabela 2.3. Convém pontuar que existem pequenas áreas extremamente escarpadas próximas à nascente, sendo o restante do terreno com grandes ondulações. Já as área onde o fator topográfico se apresenta baixo ou muito baixo corresponde à 43,70%. Na sub-bacia 02 os valores para o fator topográfico variaram entre 0,00 e 7,11 considerando que 66,88% da área da sub-bacia 02 tem fator topográfico baixo ou muito baixo, favorecendo a agricultura. Assim apenas 14,64% da área tem ocorrência de fator topográfico alto ou muito alto. Neste caso temos alguns poucos pontos montanhosos e demais áreas onduladas à suavemente onduladas.

Na figura 2.5, o fator topográfico foi espacializado pelas sub-bacias 1 e 2 demonstrando áreas mais vulneráveis sob esta perspectiva.

Figura 2.5 - Mapa do fator topográfico da bacia hidrográfica do rio São João, com destaque para as sub-bacias 1 e 2



Fonte: O autor.

Tabela 2.5 – Classes do fator topográfico e sua ocorrência nas sub-bacias 1 e 2

| Fator LS | Classe de Fragilidade | SUB-BACIA 01 Ocorrência (%) | SUB-BACIA 02 Ocorrência (%) |
|-----------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0 - 1,5 | Muito Baixa | 23,24 | 30,96 |
| 1,5 - 2,5 | Baixa | 20,46 | 35,92 |
| 2,5 - 3,5 | Média | 17,62 | 18,47 |
| 3,5 - 4,5 | Alta | 14,89 | 11,46 |
| > 4,5 | Muito Alta | 23,79 | 3,18 |

Fonte: Adaptado de Campos et al., 2006.

3.4 Uso do solo (C)

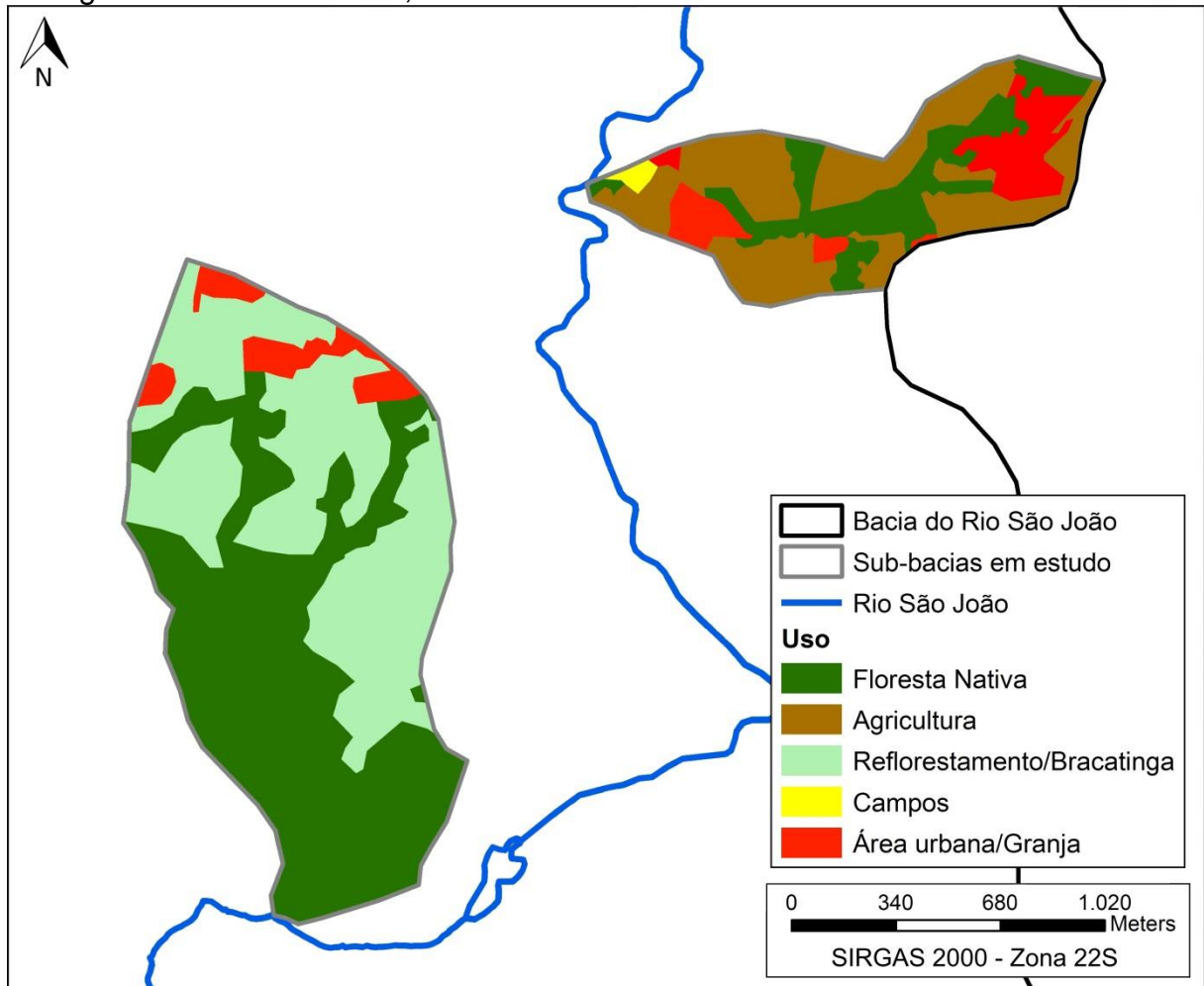
Os valores para o fator de cobertura do solo foram baseados em usos identificados na microbacias estudadas e caracterizam-se pelo grau de proteção fornecida ao solo. Sendo aplicados inversamente à proteção exercida, ou seja, quanto mais baixo for o índice aplicado, mais eficaz é a proteção. A sub-bacia 01 onde a cobertura predominante é a floresta nativa com aproximadamente 51,5 % da área da sub-bacia, 43,2% com reflorestamento e cultura de bracatinga e também nas proximidades das nascentes existem granjas para produção avícola. A sub-bacia 02 por sua vez tem 54,1% da área destinada à agricultura, 26,5% de mata nativa, ocorrendo em menor quantidade campo e granja, conforme Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Valores do para o fator de cobertura de solo e sua ocorrência nas sub-bacias 1 e 2

| Cobertura do solo | Fator C | Citação | Sub-bacia 1 (%) | Sub-bacia 2 (%) |
|--------------------------|----------------|--|------------------------|------------------------|
| Floresta nativa | 0,0010 | Thompson et al., 2013 (Costa et al., 2005) | 51,5 | 26,5 |
| Reflorestamento | 0,0030 | Lemos, 2010 (Walker, 2004) | 24,9 | 0 |
| Cultura - bracatinga | 0,0030 | Lemos, 2010 (Walker, 2004) | 18,3 | 0 |
| Agricultura | 0,2559 | Thompson et al., 2013 (Costa et al., 2005) | 0 | 54,1 |
| Área Urb. - granja | 0,0075 | Thompson et al., 2013 (Costa et al., 2005) | 5,3 | 18 |
| Campo | 0,0420 | Mendonça et al., 2014 (Silva, 2004) | 0 | 1,4 |

Fonte: Adaptado de Freitas, 2016.

Figura 2.6 – Mapa de uso e ocupação do solo nas sub-bacias constituintes da bacia hidrográfica do rio São João, no ano de 2013



Fonte: Adaptado de Freitas, 2016.

3.5 Perda de solo (A)

As perdas de solo estimadas para as sub-bacias em foco, foram resultante da multiplicação dos fatores da USLE. Assim a perda de solo na sub-bacia 01, onde a maior parte da área tem vegetação nativa, variou de $0 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ à $5,92 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, com média de $1,01 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, representando suave potencial de erosão laminar considerando a classificação proposta por Beskow et al (2009), conforme Tabela 2.7, enquanto que na sub-bacia 02, onde à predominância de atividade agrícola, a perda de solo calculada variou de $0 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ à $256,55 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, com média de $44,34 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, representando muito alto potencial de erosão laminar, na classificação citada. Para efeito de comparação a bacia hidrográfica do rio São João apresentou variação de $0 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ à $965,86 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, com média de $39,44 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Conforme tabela 2.8, na sequência:

Tabela 2.7 – Classes de perda de solo

| Taxa de perda de solo | Classes de perda de solo |
|---|---------------------------------|
| t.ha⁻¹.ano⁻¹ | |
| 0,0 - 2,5 | Suave |
| 2,5 - 5,0 | Suave / Moderada |
| 5,0 - 10,0 | Moderada |
| 10,0 - 15,0 | Moderada alta |
| 15,0 - 25,0 | Alta |
| 25,0 - 50,0 | Muito alta |
| 50,0 - 100,0 | Altamente severa |
| > 100,0 | Extremamente severa |

Fonte: Adaptado de Beskow et al. (2009)

Tabela 2.8 – Perda de solo atual estimada, para sub-bacias 01 e 02

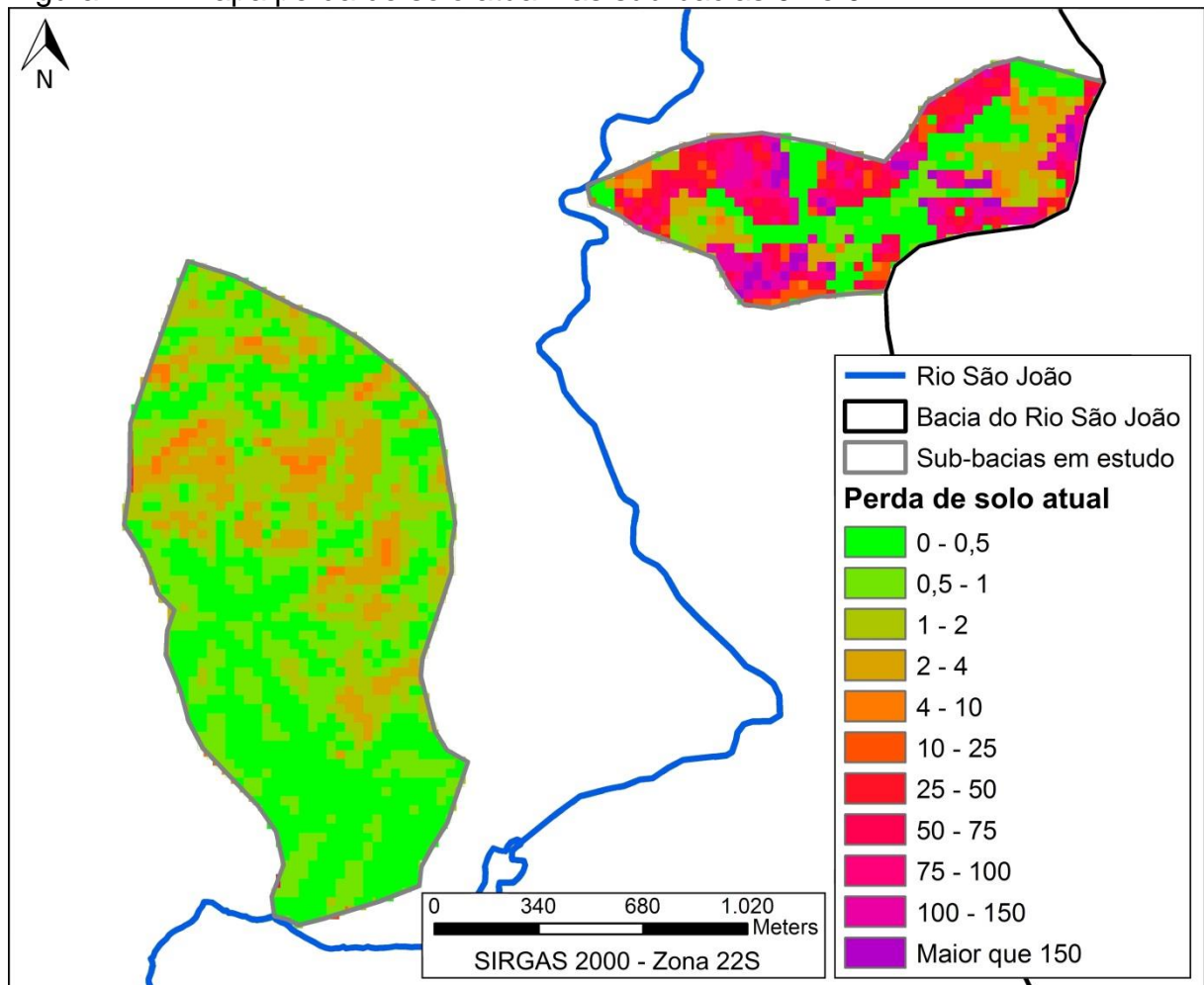
| Perda de solo - Atual | Mínima t.ha⁻¹.ano⁻¹ | Média t.ha⁻¹.ano⁻¹ | Máxima t.ha⁻¹.ano⁻¹ |
|------------------------------|--|---|--|
| Sub-bacia 1 | 0,00 | 1,01 | 5,92 |
| Sub-bacia 2 | 0,00 | 44,34 | 256,55 |
| Bacia São João | 0,00 | 26,81 | 965,86 |

Fonte: O autor.

A estimativa de perda de solo na sub-bacia com vegetação nativa foi aproximadamente 2,8% menor que a perda de solo verificada na micro-bacia ocupada por agricultura. Este fato se pode ser justificado principalmente pela cobertura do terreno, pois a atividade agrícola desempenha considerável potencialidade à erosão laminar quando comparada à áreas cobertas por vegetação de porte médio e florestas. A questão da topografia se apresenta na sub-bacia 1 (mata nativa) com alguns pontos muito mais elevados (apenas 15,33% da área tem fator LS acima de 5,5) que os observados na sub-bacia 2 (agricultura), porém devido à pequena ocorrência o fator topográfico não é suficiente para aproximar a perda de solo com a sub-bacia 02, já que os solos se encontram em patamares próximos de erodibilidade. Pode-se relacionar que a atividade imposta à determinada área é determinada pela sua topografia, pois regiões escarpadas e mais declivosas inviabilizam o desenvolvimento da agropecuária enquanto áreas planas possibilitam a entrada de máquinas e implementos agrícolas. Assim os resultados parecem razoáveis, pois a perda de solo acentuada ocorre na sub-bacia onde predomina a agricultura.

Lemos (2010), estudando a bacia hidrográfica do alto Pitangui, apresentou taxas de perda de solo em séries temporais a partir de 1961 chegando à valores médios de $62,61 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ à $35,41 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, classificando como alta à moderada a perda de solo nesta bacia hidrográfica, relacionando o aumento no último período à fatores como diminuição das áreas de reflorestamento e vegetação primária e secundária, com o aumento do número de moradias rurais, abertura de novos acessos viários e extração de minerais.

Figura 2.7 – Mapa perda de solo atual nas sub-bacias 01 e 02



Fonte: Adaptado de Freitas, 2016.

3.5.1 Projeções de perda de solo até 2100

Nas projeções de perda de solo para o final do século XXI, a sub-bacia 01 chegou evoluiu com valores obtidos ao final de cada período de 30 anos conforme mostrado na Tabela 2.9, chegando ao ápice em 2099 com valores médios de $1,07 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $1,17 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ respectivamente para os cenários simulados 01 e 02,

assim aumentando 8,76 % da perda de solo estimada atual. Apesar do aumento de $0,11 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ na perda de solo de um cenário para outro deve-se considerar que a conservação da intensa cobertura vegetal evitou uma perda de solo ainda maior. Já na sub-bacia 02, conforme Tabela 2.10, os valores médios de perda de solo, ao final do século XXI, foram $46,97 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $51,06 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ respectivamente para os cenários 01 e 02. A variação entre os cenários dentro desta sub-bacia se manteve em $8,70 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, muito próximo do que foi a variação da sub-bacia 01. Agora, ao comparar as quantidades médias entre as sub-bacias observa-se que, enquanto a microbacia preservada, com grande parte de mata nativa e reflorestamento, evolui em 90 anos apenas $0,6 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $0,16 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (respectivamente para os cenários 1 e 2), a sub-bacia com grande ocorrência de atividade agrícola, nos mesmos 90 anos, tem evolução de $2,63 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $6,72 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (respectivamente para os cenários 1 e 2). Estas variações entre as sub-bacias estudadas são aproximadamente 40 vezes maiores em ambos os cenários.

Tabela 2.9 – Perda de solo estimada até 2100, considerando os cenários com aumento de $1,7^{\circ}\text{C}$ e $4,8^{\circ}\text{C}$ para sub-bacias 01

| Projeção da perda de solo - Sub-bacia 1 $\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ | | | | | | | | | |
|---|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
| Aumento da Temperatura Global | 2039 | | | 2069 | | | 2099 | | |
| | Mínima | Média | Máxima | Mínima | Média | Máxima | Mínima | Média | Máxima |
| $1,7^{\circ}\text{C}$ | 0,00 | 1,05 | 6,17 | 0,00 | 1,03 | 6,07 | 0,00 | 1,07 | 6,29 |
| $4,8^{\circ}\text{C}$ | 0,00 | 1,08 | 6,35 | 0,00 | 1,11 | 6,55 | 0,00 | 1,17 | 6,84 |

Fonte: O autor.

Tabela 2.10 – Perda de solo estimada até 2100, considerando os cenários com aumento de $1,7^{\circ}\text{C}$ e $4,8^{\circ}\text{C}$ para sub-bacias 02

| Projeção da perda de solo - Sub-bacia 2 $\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ | | | | | | | | | |
|---|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
| Aumento da Temperatura Global | 2039 | | | 2069 | | | 2099 | | |
| | Mínima | Média | Máxima | Mínima | Média | Máxima | Mínima | Média | Máxima |
| $1,7^{\circ}\text{C}$ | 0,00 | 46,02 | 265,82 | 0,00 | 45,24 | 261,15 | 0,00 | 46,97 | 271,25 |
| $4,8^{\circ}\text{C}$ | 0,00 | 47,37 | 273,50 | 0,00 | 48,86 | 281,88 | 0,00 | 51,06 | 294,74 |

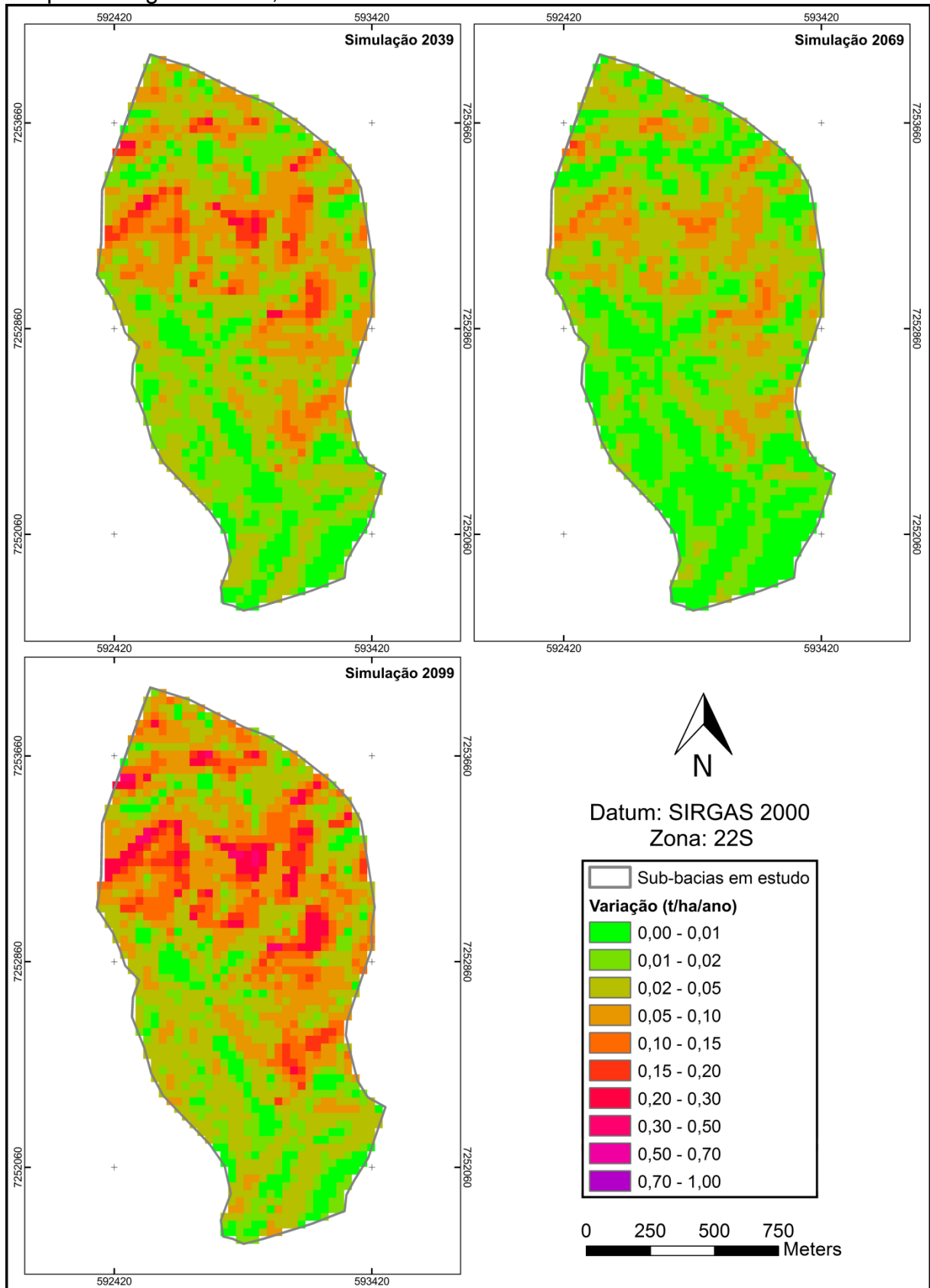
Fonte: O autor.

Para demonstrar o comportamento da perda de solo nas sub-bacias hidrográficas através de bases cartográficas, foram utilizadas variações de perda de

solo a partir do cenário atual estimado. Desta maneira, o fato da área de estudo ser muito reduzida em relação ao estado do Paraná e a grande amplitude de perda de solo em cada ponto das sub-bacias não reduziu a visibilidade da evolução do fenômeno. Como as bacias demonstraram índices de perda de solo muito distintos optou-se por apresentar cada sub-bacia em separado, cada qual com uma escala diferenciada, focalizando as quantidades dentro do universo de cada caso. No caso da Sub-bacia 01, com predominância de mata nativa, a perda de solo variou de 0,00 t.ha⁻¹.ano⁻¹ até 6,84 t.ha⁻¹.ano⁻¹, ao final do pior cenário, de acordo com a Tabela 2.9, enquanto a Sub-bacia 02, onde a agricultura tem maior ocorrência a variação verificada foi de 0,00 t.ha⁻¹.ano⁻¹ à 294,74 t.ha⁻¹.ano⁻¹, conforme tabela 2.10.

Ao avaliar o mapa da sub-bacia 01, para o cenário de aumento da temperatura global em 1,7°C, a evolução da perda de solo em 2039 teve como limite máximo 6,17 t.ha⁻¹.ano⁻¹, enquanto a média para esta área foi de 1,05 t.ha⁻¹.ano⁻¹ (Tabela 2.9). Assim, na Figura 2.8, observa-se, que neste primeiro período de análise, a variação entre 0,05 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,1 t.ha⁻¹.ano⁻¹ tem grande ocorrência do centro ao divisor de águas do norte, prevalecendo variações positivas menores que 0,02 t.ha⁻¹.ano⁻¹ ao sul, próximo ao exultório. A estimativa de variação de perda de solo para 2069 reduz drasticamente, onde poucas áreas chegam até 0,1 t.ha⁻¹.ano⁻¹ em relação à situação atual. Agora num terceiro período, que finaliza em 2099, as terras do centro ao norte da sub-bacia tem variação de perda entre 0,20 t.ha⁻¹.ano⁻¹ à 0,30 t.ha⁻¹.ano⁻¹.

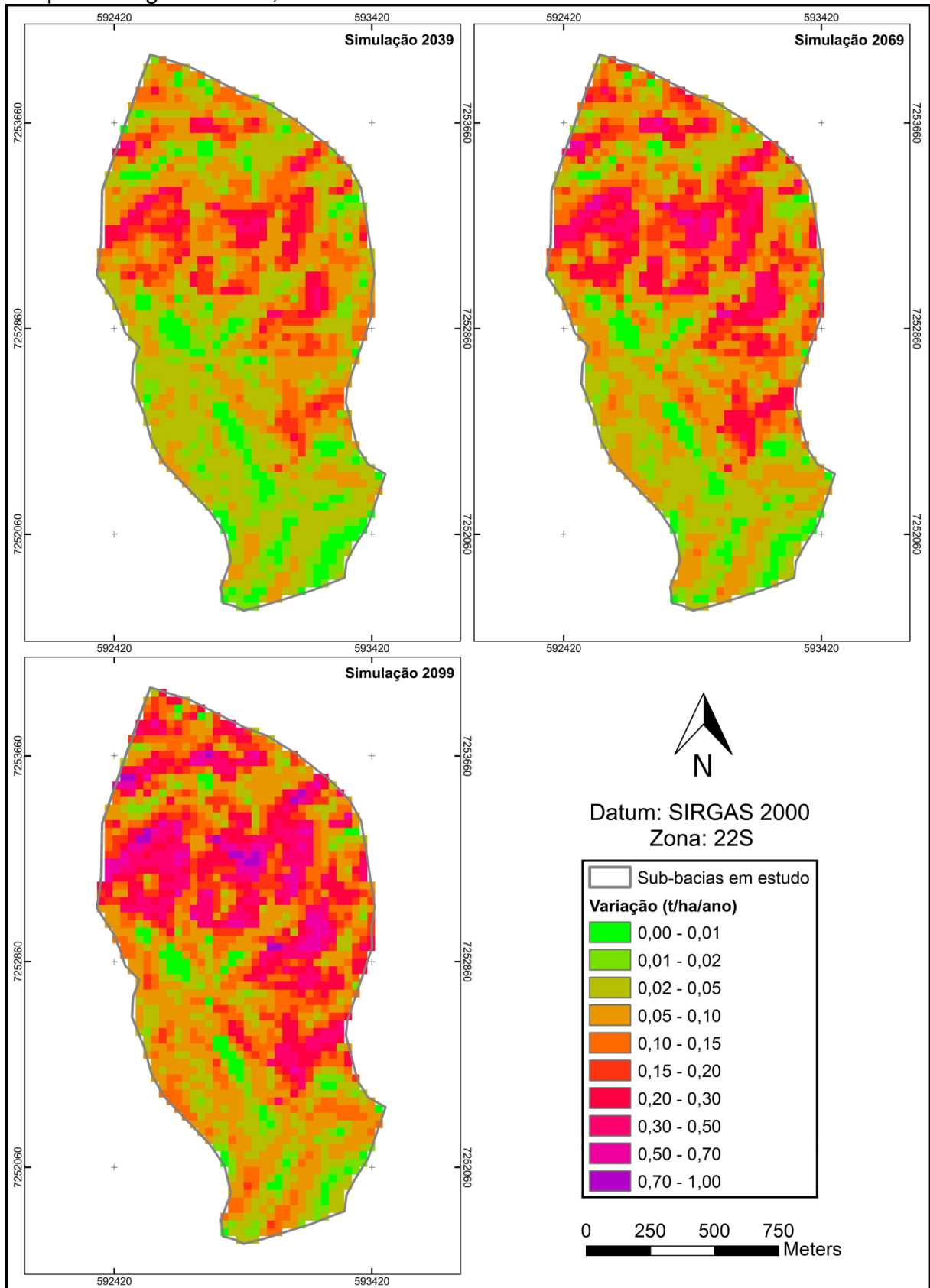
Figura 2.8 – Variação da perda de solo para a sub-bacia 01, com aumento da temperatura global em 1,7°C até 2100



Fonte: O autor.

Já para o cenário de aumento da temperatura global em 4,8°C, a evolução da perda de solo em 2039 o limite máximo foi à 6,35 t.ha⁻¹.ano⁻¹ , enquanto a média para esta área foi de 1,08 t.ha⁻¹.ano⁻¹(Tabela 2.9). Em 2099 no terceiro período estimado o máximo ficou em 6,84 t.ha⁻¹.ano⁻¹ com média de 1,17 t.ha⁻¹.ano⁻¹ para a bacia. Assim na Figura 2.9, nota-se que o primeiro período de análise, na maior parte da área ocorre perda de solo entre 0,02 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,15 t.ha⁻¹.ano⁻¹, com pouquíssimos pontos onde a variação é menor que 0,02 t.ha⁻¹.ano⁻¹, localizados ao sul. A estimativa de variação de perda de solo para 2069 se mantém alta no centro-norte da bacia, onde a ocorrência de perda entre 0,2 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,3 t.ha⁻¹.ano⁻¹ é predominante. Num terceiro período, que finaliza em 2099, no setor norte começam a aparecer pontos onde variação de perda de solo é estimada entre 0,7 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 1 t.ha⁻¹.ano⁻¹, intensificando o fenômeno em regiões já críticas, mas pequenas porções do território ainda remanescem com variação entre 0 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,01 t.ha⁻¹.ano⁻¹, próximo ao exultório.

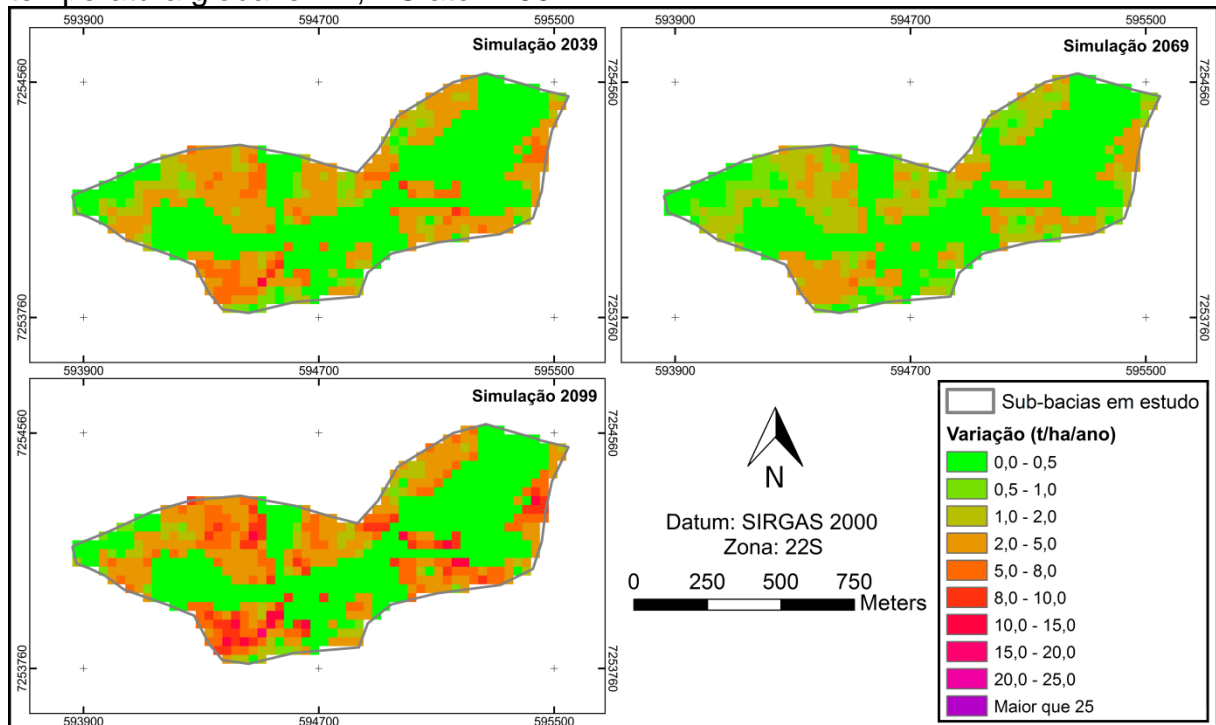
Figura 2.9 – Variação da perda de solo para a sub-bacia 01, com aumento da temperatura global em 4,8°C até 2100



Fonte: O autor.

Agora para a sub-bacia 02, a qual tem sua maior dimensão na direção leste-oeste, lembrando forma de borboleta, no cenário de aumento da temperatura global em 1,7°C, a evolução da perda de solo em 2039 teve como limite máximo 265,82 t.ha⁻¹.ano⁻¹, enquanto a média para esta área foi de 46,02 t.ha⁻¹.ano⁻¹ (Tabela 2.10). Assim na Figura 2.10, em 2039, apresenta uma faixa que se estende do oeste para o nordeste com variação de perda de solo entre 0 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,5 t.ha⁻¹.ano⁻¹ em relação à situação atual, já nas áreas próximas aos limites da sub-bacia grandes porções estão com variação de perda de solo entre 5,0 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 8,0 t.ha⁻¹.ano⁻¹. A variação de perda de solo para 2069, observa-se um aumento da área onde a variação não passa de 0,5 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e nas proximidades do perímetro poucas são as áreas onde a variação se enquadra entre 2 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 5 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Em 2099, a faixa de relativa baixa variação se mantém enquanto nos setores leste e oeste se concentram pontos de variação entre 8 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 10 t.ha⁻¹.ano⁻¹.

Figura 2.10 – Variação da perda de solo para a sub-bacia 02, com aumento da temperatura global em 1,7°C até 2100

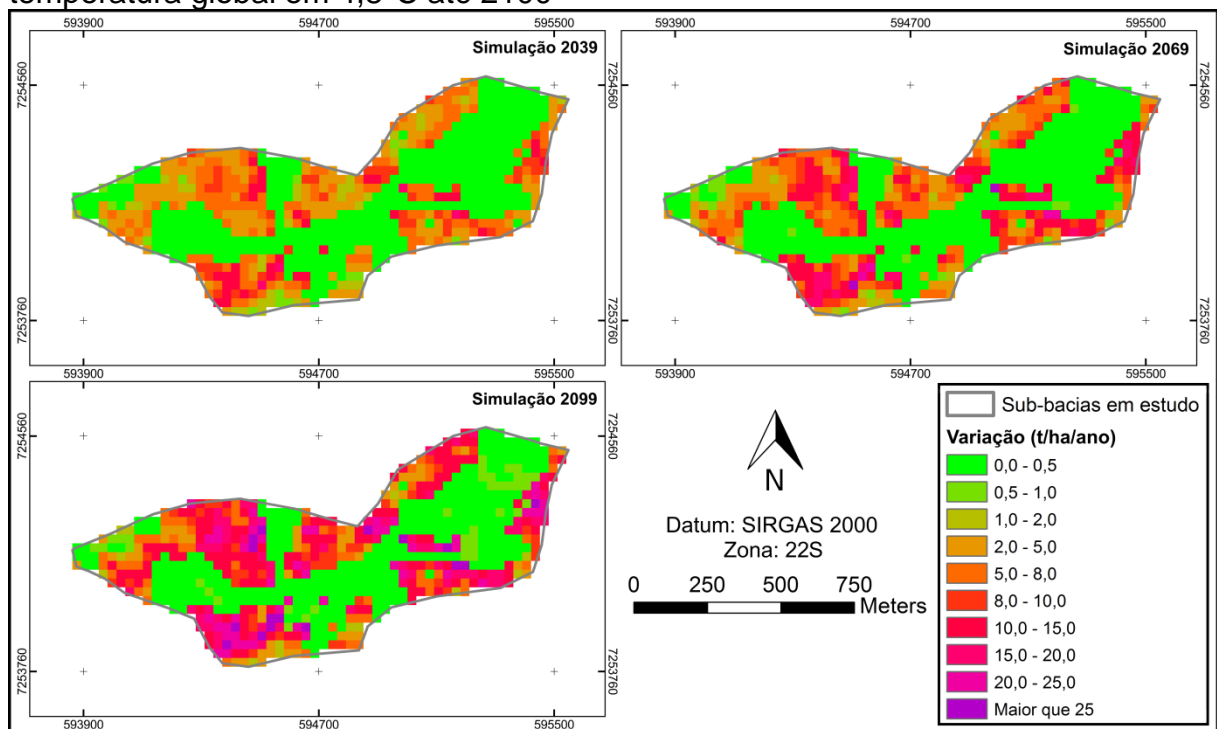


Fonte: O autor.

Continuando a análise da sub-bacia 02, agora com o cenário de aumento da temperatura global em 4,8°C, a evolução da perda de solo em 2039 o limite máximo foi à 273,50 t.ha⁻¹.ano⁻¹, enquanto a média para esta área foi de 47,37 t.ha⁻¹.ano⁻¹ (Tabela 2.10). Em 2099 no terceiro período estimado o máximo ficou em

294,74 t.ha⁻¹.ano⁻¹, com média de 51,06 t.ha⁻¹.ano⁻¹ para a bacia. Assim na Figura 2.11 nota-se, que no primeiro período de análise, a faixa de terra com variação de perda de solo entre 0,00 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,50 t.ha⁻¹.ano⁻¹ ainda persiste amplamente, mas a partir do mapa do período de 2069 esta faixa se reduz em detrimento de áreas com perda de solo entre 10 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 15 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Já em 2099, em toda extensão da sub-bacia aparecem pontos isolados com variação maior que 25 t.ha⁻¹.ano⁻¹, no momento em que nos locais onde a variação é maior, se assevera consideravelmente.

Figura 2.11 – Variação da perda de solo para a sub-bacia 02, com aumento da temperatura global em 4,8°C até 2100



Fonte: O autor.

Tais valores ajudam a estabelecer um padrão correlato da perda de solo com as variáveis elencadas na USLE e permite uma análise multitemporal, sendo possível não apenas estimar, mas também medir se os usos adotados se intensificaram ou não. Ao contrário do que vem ocorrendo na bacia hidrográfica do rio Mourão, no noroeste do Paraná, que segundo Graça et al. (2015) houve uma diminuição nas taxas de perda de solo, não pode se esperar tal queda visto que a erosividade da chuva evolui positivamente e a intensificação do uso do solo é muito representativo para as microbacias estudadas. Assim deve ser pensado em formas de manejo para retenção dos sedimentos antes que estes adentrem nos corpos

hídricos.

Marchiore (2014) ao realizar uma avaliação hidrosedimentológica na bacia hidrográfica do rio Quatorze, localizada no sudoeste do Paraná, município de Francisco Beltrão, observou que a produção de sedimentos estimada variou de 4,75 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ a 264,67 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ durante o ano de 2011. Nas sub-bacia com predomínio de floresta, observou a baixa produção de sedimentos. Já para as sub-bacias onde predomina a agricultura, a produção de sedimentos variou de 112,05 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ a 211,27 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$. Nas sub-bacias com baixa declividade (entre 0 e 15%) a perda de solo variou entre 7,72 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ e 35,10 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$, apesar da cobertura de solo predominante se enquadra entre agricultura e solo exposto. Para as sub-bacias com altas declividades e predominância de florestas obteve uma produção de sedimentos mediana.

4. CONCLUSÕES

A verificação das estimativas de perda de solo possibilitou análise atual e forneceu uma perspectiva da situação à longo prazo na bacia hidrográfica do rio São João.

No que diz respeito ao levantamento e cruzamento de dados em ambiente SIG, foi possível pontuar dentro das sub-bacias, setores críticos em relação ao uso do solo, declividade e da própria potencialidade de perda de solo, com precisão de 30 metros.

A sub-bacia 01 com predominância de mata nativa, teve perda de solo média estimada em $1,01 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, ou seja, baixo potencial de erosão, enquanto que na sub-bacia 02 com atividade agrícola predominante, foi de $44,34 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Sendo que a agricultura é uma atividade que influencia consideravelmente o aumento da perda de solo quando comparada à mata nativa e ao reflorestamento.

As projeções de perda de solo médias até 2100, considerando o cenário climático mais pessimista (aumento de $4,8^{\circ}\text{C}$ na temperatura global), foram de $1,17 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ para a sub-bacia com predominância de mata nativa, e $51,06 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ para a sub-bacia com forte atividade agrícola. Nas análises das variações de perda de solo, entre o período atual e o período projetado, foram de $0,2$ à $0,3 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ para o primeiro cenário, e $0,7$ à $1,0 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ para o segundo cenário modelado, na sub-bacia com mata nativa, e de $8,0$ à $16,0 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ para o primeiro cenário, e chegando até $25 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ para o segundo cenário projetado, na sub-bacia com agricultura.

A técnica utilizada na simulação da erosividade, a partir da alteração climática da precipitação pluviométrica, foi efetiva para realizar prognósticos da perda de solo na região dos Campos Gerais do Paraná.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; SILVA, A. M. Características das vertentes e potencial natural de erosão da bacia hidrográfica do ribeirão dos Pinheirinhos – Torrinha/Brotas-SP. In: Anais do XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, p. 11, 2005.

AYER, J. E. B.; OLIVETTI, D.; MINCATO, R. L.; SILVA, M. L. N. Erosão hídrica em latossolos vermelhos distróficos. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia-GO, v. 45, n. 2, p. 180-191, 2015.

BERTONI, J. O. O espaçamento de terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão. **Bragantia**, Campinas, v. 18, n 10, p. 113-140, 1959.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. . São Paulo: Ícone, 1990.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas-SP, v.79, n.1, p. 49-59, 2009.

BISCAIA, R. C. M.; RUFINO, R. L.; HENKLAIN, J. C. Cálculo de erodibilidade (fator K) de dois solos do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas-SP, v.5, p. 183-186, 1981.

CAMPOS, R. A.; MACHADO, W.; STIPP, N. A. F. Tipologia dos processos erosivos decorrentes do uso e ocupação do solo. In: SEMINÁRIO TEMÁTICO DE GEOGRAFIA DO NORTE DO PARANÁ: O BRASIL FRENTE AOS ARRANJOS ESPACIAIS DO SÉCULO XXI, 1, SEMANA DE GEOGRAFIA, 21, 2005. Londrina. Anais do I Seminário Temático de Geografia do Norte do Paraná: O Brasil Frente aos Arranjos Espaciais do Século XXI – XXI Semana de Geografia. Londrina: DGEO/UDEL - AGB, 2006, v. 1, p. 1-13.

CARVALHO, N. O. Hidrosedimentologia Prática. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.

CORRECHEL, V. Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica de análise da redistribuição do “FALLOUT” do ¹³⁷Cs. 2003. 79 p. Tese (Doutorado em ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2003.

COUTINHO, L. M.; CECÍLIO, R. A.; GARCIA, G. O.; XAVIER, A. C.; ZANETTI, S. S.; MOREIRA, M. C. Cálculo do fator LS da equação universal de perda de solo (EUPS) para a bacia do rio da Prata, Castelo-ES. **Revista agroambiente**, Boa Vista-RR, v. 8, n.1, p. 01-09, 2014.

DENARDIN, J. E. Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. 1990. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia – solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz – Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 1990.

EDUARDO, E. N.; CARVALHO, D. F.; MACHADO, R. L.; SOARES, P. F. C.; ALMEIDA, W. S. Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em argilossolo vermelho-amarelo, sob condições de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 796-803, 2013.

ELTZ, F.; CASSOL, E. A.; PASCOTINI, P. B. Potencial erosivo e característica das chuvas de Encruzilhada do Sul – RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 15, n. 4, p. 331-337, 2011.

ELTZ, F.; CASSOL, E. A.; PASCOTINI, P. B.; AMORIM, R. S. S. Potencial erosivo e característica das chuvas de São Gabriel – RS, de 1963 à 1993. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 17, n. 6, 2013.

FOURNIER, F. **Climatet erosion**. Paris: PressesUniversitaires de France, 1960. 201p.

FREITAS, L. M. Qualidade da água em sub-bacias com diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do rio São João. 2016. 109 p. Dissertação (Mestrado em engenharia sanitária e ambiental) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, 2016.

GRAÇA, C. H.; PASSIG, F. H.; KELNIAR, A. R.; PIZA, M. A.; CARVALHO, K. Q.; ARANTES, E. J. Análise multitemporal da perda de solo estimada para a bacia hidrográfica do rio Mourão, Paraná – Brasil. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 75, n. 4, p. 120-130, 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, 2013.1535 p.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. **Cartas Climáticas do Paraná. Classificação climática**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>>. Acesso em: 27 jul. 2015.

LARIOS, M. B. Resumo Histórico de Modelagem da Erosão. Disponível em <http://www.drenagem.uf.br/06erosão08-modelagemRest.htm>. Acesso em: 04/09/2003

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; EID, N. J.; MARTINS, E. S.; KOIDE, S.; REATTO, A. Desenvolvimento e verificação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade dos solos da bacia do alto rio Jardim-DF. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 8, n. 2, p. 23-36, 2007.

LIMA, J. M.; CURTI, 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.

LEMOS, C. F. Evolução da erosão na bacia hidrográfica do alto curso do rio Pitangui – PR. 2010. 206 p. Tese (Doutorado em Geologia – geologia ambiental) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2010.

LOMBARDI NETO, F. Rainfall erosivity – its distribution and relationship with soil loss at Campinas, Brazil. 1977. 53p. Tese (Mestrado) West Lafayette, Purdue University, 1977.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI J. Erodibilidade de solos paulistas. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo de São Paulo**, São Paulo, n. 27, p. 12, 1975.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com a perda de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, n. 51, v. 2, p. 189-196, 1992.

MARCHIORE, J. Avaliação hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Quatorze, Francisco Beltrão (PR), por meio de modelo hidrológico computacional. 2014. 101 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, 2014.

MENDONÇA, H. F. P.; PATERLINI, E. M.; OLIVEIRA, F. S.; SANTOS, A. R. Estimativa de perda de solo por erosão laminar para o município de Iconha, estado do Espírito Santo. *Enciclopédia Biosfera*. Goiânia-GO, v. 10, n. 19, p.1027-1038, 2014.

NEVES, S. M. A. S.; MOTINHO, M. C.; NEVES, R. J.; SOAREZ, E. R. C. Estimativa da perda de solo por erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Jauru/MT. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, ano 23, n. 3, p. 423-434, 2011.

OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; DURÃES, M. F.; SILVA, A. M. Vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica do rio Verde, sul de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 3 p. 262-269, 2014.

PETAN, S.; PINTO, F. T.; MIKO, M.; BARBOSA, J. P. Modelagem da erosão do solo na bacia hidrográfica do rio Leça, com a equação RUSLE e SIG. **Revista Recursos Hídricos**, v. 31, n. 1, p. 99-110, 2010.

RIBEIRO, A. S.; MINCATO, R. L.; CURI, N.; KAWAKUBO, F. S. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 16-31, 2016.

ROLLOF, G.; DENARDIN, J. E. Estimativa simplificada da erodibilidade do solo. REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA, Florianópolis, 1994. **Resumos**, Florianópolis: SBCS, 1994. p.150-151.

ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, v. 8, p. 63-74, 2012.

RUFINO, R. L. Avaliação do potencial erosivo da chuva para o estado do Paraná: segunda aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campo Grande, v. 10, p. 279-281, 1986.

RUFINO, R. L.; BISCAIA, R. C. M.; MERTEN, G. H. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná, através de pluviometria: terceira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 437- 444, 1993.

SCOPEL, I. **Avaliação da erosão com auxílio de técnicas de sensoriamento remoto e equação universal de perdas de solo à nordeste de Cornélio Procópio (PR)**. 1988. 142 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 1988.

SILVA, S. F. Avaliação das alterações ambientais na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão – Campinas - SP. 2000. 149 p. Dissertação (Mestrado em geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2000.

THOMPSON, D.; FIDALGO, E. C. C. Estimativa da perda de solos por meio da equação universal de perda de solo (USLE) com uso do invest para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu – RJ. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSO HÍDRICOS, 20, 2013. Bento Gonçalves, RS. Anais, Bento Gonçalves, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.2014.

VIRGENS FILHO, J. S.; LEITE, M. L. Simulation of climate scenarios for the region of Campos Gerais, State of Paraná, Brazil. In: IUFRO Landscape Ecology Working Group International Conference, 2010, Bragança-Portugal. **Anais**. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, 2010. p. 364-369.

VIRGENS FILHO, J. S. et al. Desempenho dos modelos CLIGEN, LARS-WG e PGECLIMA_R na simulação de séries diárias de temperatura máxima do ar para localidades do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 3, p. 538-547, 2013.

WALTRICK, P. C. Erosividade de chuvas no Paraná: atualização, influência do “El nino” e “La nina” e estimativa para cenários climáticos futuros. 2010. 94 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciência do Solo) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2010.

WALTRICK, P. C.; MACHADO, M. A. M.; DIECKOW, J.; OLIVEIRA, D. Estimativa da erosividade de chuvas no estado do Paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 à 2008. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 256-267, 2015.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. A rainfall energy its relationship to soil loss. **Transaction American Geophysical Union**, Washington, v. 39, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 3, p. 246-249, 1959.

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

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning .United States Department of Agriculture, 1978. 58p.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O primeiro capítulo abordou a erosividade da chuva, em todo o estado do Paraná, e suas projeções até o final do século XXI, permitindo observar como é grande sua variação nas diversas regiões. Assim também ocorre com a sua distribuição ao longo do ano, onde a região sudoeste tem erosividade alta em pelo menos 08 meses durante o ano, enquanto à leste a erosividade atinge valores altos somente nos meses de verão. A erosividade no estado do Paraná decresce no sentido de oeste para leste onde os índices de erosividade se apresentaram menores, na região próxima à cidade de Curitiba. No litoral a erosividade volta a subir á valores medianos, devido ao clima mais quente e úmido. Para as simulações, contemplando os cenários de mudanças climáticas, em ambos os casos houve uma evolução positiva para todos para todas as regiões até 2100, com ocorrência dos valores máximos na região sudoeste, nas proximidades dos municípios de Quedas do Iguaçu e Francisco Beltrão.

Já o segundo capítulo tratou mais especificamente da perda de solo e possibilitou além de uma análise atual, fornecer uma perspectiva da situação à longo prazo na bacia hidrográfica do rio São João. Foram pontuados dentro das sub-bacias, setores críticos em relação ao uso do solo, declividade e da própria potencialidade de perda de solo. A sub-bacia com predominância de mata nativa teve perda de solo baixa, enquanto na sub-bacia com atividade agrícola predominante, a perda de solo foi severa. As projeções de perda de solo forneceram uma perspectiva dos problemas a serem enfrentados na bacia do rio São João e são ponto de partida para o planejamento dos recurso hídricos em nível regional, dirigindo à tomada de ações preservacionistas do solo.

Diante dos resultados encontrados sugere-se um monitoramento maior das condições do solo na região para um melhor entendimento da dinâmica ambiental e ações de curto prazo no combate à erosão em pontos críticos da bacia hidrográfica.