

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

Caroline de Cassia Banci Garcia

**ESTUDO DA PREDIÇÃO DE PERDA DE SOLOS NA BACIA DO
CÓRREGO DO CRAVO EM NAZARENO (MG): APLICAÇÃO DO
MODELO WEPP**

São Carlos, SP
2016

Caroline de Cássia Banci Garcia

**Estudo da Predição de Perda de Solos na Bacia do Córrego do Cravo
em Nazareno (MG): Aplicação do Modelo WEPP**

Monografia apresentada ao curso de
graduação em Engenharia Ambiental da
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Valéria Guimarães
Silvestre Rodrigues

Co-orientadora: Ms. Ligia de Freitas
Samapio

São Carlos, SP

2016

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Caroline de Cassia Banci Garcia**

Data da Defesa: 26/10/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues (Orientador(a))

Aprovada

Ligia de Freitas Sampaio (Co-orientadora)

Aprovada

Rogério Resende Martins Ferreira

Aprovada

Claudia Marisse dos Santos Rotta

Aprovada



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B212e Banci Garcia, Caroline de Cassia
Estudo da Predição de Perda de Solos na Bacia do
Córrego do Cravo em Nazareno (MG): Aplicação do Modelo
WEPP / Caroline de Cassia Banci Garcia; orientadora
Profa. Dra. Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues;
coorientadora Ms. Lúcia de Freitas Sampaio. São Carlos,
2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2016.

1. Bacia Hidrográfica. 2. Perda de solo. 3. SIG. 4.
GeoWepp. 5. Simulação. 6. Voçocora do Córrego do Cravo.
I. Título.

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, Zilda e Marcos, por todo apoio, suporte e amor dados ao longo da minha vida, e às minhas irmãs, Fernanda e Nathália, pelo carinho, afeto e dedicação que me confortam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida, pelo imenso amor, pelas oportunidades e proteção ao longo de toda a minha vida. Agradeço por todas as bênçãos realizadas na hora e no momento certos, que me levaram a ser uma pessoa melhor.

Agradeço à minha mãe, Zilda por todo carinho e cuidado imensuráveis que me oferece e pela completa disponibilidade em me dar apoio e suporte em todas as minhas decisões. Ao meu pai, Marcos, por todo carinho, apoio e compreensão que sempre me transmitiu tranquilidade para que eu fosse atrás dos meus objetivos. À minha irmã Fernanda pelo amor e compreensão e por ser sempre disposta a me escutar e aconselhar. À minha irmã Nathália pelo amor e dedicação e pelo sentimento de pureza que transmite a mim. Vocês são minha vida.

Agradeço demais aos amigos que o CAASO me deu e que sempre estiveram presentes me dando força e tornando a vida são carlense inesquecível. Sem vocês São Carlos não seria a nossa São Carlos. Aos amigos de Prudente, Bia, Mary e Isa, que se mantiveram na minha vida mesmo com a distância e que sempre me demonstraram carinho e atenção. Aos amigos do intercâmbio por todas as felicidades e experiências que tornaram o ano na Irlanda um dos melhores da minha vida.

Agradeço, em especial, aos meus amigos André, Bia, Kimi, Diego, Lucas, Rafa, Brubs, Lili e Marie por serem muito mais que amigos. Tenho muito carinho por cada um, desejo toda paz e felicidade que a vida pode oferecer. Amo muito vocês.

Agradeço em especial à Bia, pelas diversos momentos juntas durante toda a graduação, pelas dificuldades e mas também pelas enormes felicidades.

Agradeço imensamente à minha turma, 011 da Engenharia Ambiental, por ser a melhor sala que a USP já teve. Obrigada pela amizade, pelo amor, pelo carinho, pelo sentimento de família e respeito que nós desenvolvemos ao longo da graduação. Vocês marcaram minha vida e espero que nosso relacionamento se estenda pelas nossas vidas.

Agradeço muito à minha orientadora Valéria por toda atenção, disponibilidade e dedicação oferecidos à mim, e principalmente pelo exemplo de pessoa e profissional. À minha co-orientadora Lígia pela ajuda, atenção e solicitude nos momentos que precisei. Agradeço ao Erik que me salvou com todos os problemas e erros tecnológicos possíveis que o trabalho de graduação propiciou. Agradeço ao professor Flávio Gonçalves por toda ajuda com o uso do programa GeoWEPP. Muito obrigada!

Agradeço à Universidade de São Paulo e à Escola de Engenharia de São Carlos, pelo oferecimento do curso de Engenharia Ambiental e por todo suporte acadêmico oferecido.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa concedida para intercâmbio pelo programa Ciência Sem Fronteiras.

Agradeço ao Brasil por ser a minha pátria e ser uma nação linda e que me inspira, mesmo com os diversos problemas.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não
sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não
sou o que era antes.”*

Martin Luther King (1929 – 1968)

RESUMO

GARCIA, C. C. B. **Estudo da Predição de Perda de Solos na Bacia do Córrego do Cravo em Nazareno (MG): Aplicação do Modelo WEPP**. São Carlos, 2016. 102 p. Monografia de Trabalho de Graduação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.

O modelo de predição de erosão Water Erosion Prediction Project (WEPP), desenvolvido nos Estados Unidos, é utilizado na simulação de estimativas de perda de solo decorrentes da erosão hídrica. O WEPP consiste em um modelo dinâmico de simulação que incorpora conceitos de erosão entressulcos e nos sulcos. Estas simulações são realizadas com base em dados climáticos e do solo. Assim, o objetivo principal desta pesquisa foi avaliar se este modelo poderia ser aplicado para uma voçoroca, e em clima tropical, já que o mesmo foi desenvolvido para clima temperado. A região de Nazareno (MG) apresenta inúmeras feições erosivas de grande porte (voçorocas), devido a isso, optou-se por avaliar a aplicabilidade do modelo de predição de erosão WEPP para a voçoroca do Córrego do Cravo, localizada na área urbana de Nazareno (MG). Essa área foi escolhida, pois a mesma, por ter sido bem caracterizada, apresenta banco de dados com as propriedades físicas do solo, dados pluviométricos e informações sobre o uso e ocupação do solo, dados esses necessários para a realização da simulação. Para esse estudo, foram utilizados os programas GeoWEPP e ArcGis. A simulação feita para a bacia do Córrego do Cravo forneceu resultado de perda de solo de cerca de 526 toneladas por ano, correspondendo a 10 ton/há.ano. Para o talude da cabeceira da voçoroca, a simulação forneceu resultado de perda de solo anual média de 77,032 kg/m². Para o talude direito da voçoroca, a perda de solo foi de 6,002 kg/m². Já para o talude esquerdo da voçoroca, a perda de solos anual médio foi de 8,095 kg/m². O resultado das simulações por talude forneceu perda de 910 ton/há.ano. De modo geral, conclui-se que o modelo WEPP é uma ferramenta que pode ser usada em voçorocas e em regiões de clima tropical, como complemento dos estudos realizados, porém os parâmetros de entrada devem ser o mais adequado às condições da área de aplicação, uma vez que quanto maior o número de informações reais da área, menor é a propagação de erros.

Palavras-Chave: Bacia Hidrográfica, Simulação, GeoWEPP, SIG, Voçoroca do Córrego do Cravo, Perda de Solo.

ABSTRACT

GARCIA, C. C. B. **Application of WEPP Model in the Watershed of Córrego do Cravo in Nazareno, MG.** São Carlos, 2016. 102 p. Graduate Work Monograph. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.

The erosion prediction model Water Erosion Prediction Project (WEPP), developed in the United States, is used to simulate estimates of soil loss resulting from water erosion. The WEPP consists in a dynamic simulation model that incorporates rill and interrill erosion concepts. These simulations are based on weather and soil data. Thus, the main purpose of this research was to evaluate if this model could be applied to a gully, and in a tropical climate, since it was developed for temperate climate. The region of Nazareno (MG) has numerous large erosional features (gullies), because of this, we chose to evaluate the applicability of the WEPP erosion prediction model for the gully of Córrego do Cravo, located in the urban area of Nazareno (MG). This area was chosen because the good characterization, that resulted in a database with the physical properties of soil, rainfall data and information on the use and occupation, which are informations needed to perform the simulation. For this study, the GeoWEPP and ArcGis programs were used. The simulation made for Córrego do Cravo watershed resulted in about 526 tonnes per year for soil loss, that corresponding to 10 ton/ha year. For the slope of the head of the gully, the simulation provided average annual soil loss of 77.032 kg/m². To the right slope of the gully, the soil loss was 6.002 kg/m². As for the left slope of the gully, the average annual loss of soil was 8.095 kg/m². The result of the slope simulations provided 910 ton/ha.year of total loss. Generally, it is concluded that the WEPP model is a tool that can be used in gullies and in tropical regions, to complement the existed studies, but the input parameters must be the most appropriated to the area of application conditions, since the higher is the number of real information of the area, the smaller the error propagation.

Keywords: Watershed, Simulation, GeoWEPP, GIS, Gully of Córrego do Cravo, Soil Loss.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Localização do município de Nazareno (MG), com destaque para a voçoroca do Córrego do Cravo em verde no último mapa. Extraído de IGTEC, Google e Horta (2006).</i>	45
<i>Figura 2: Geologia na região do município de Nazareno, MG. (Adaptado de CODEMIG, 2013).</i>	49
<i>Figura 3: Identificação de latossolo e cambissolo em um dos taludes da Voçoroca do Córrego do Cravo.</i>	52
<i>Figura 4: Área urbana de Nazareno e a voçoroca do Córrego do Cravo destacada em vermelho. (OLIVEIRA, 2015).</i>	54
<i>Figura 5: Mapa de Uso e Ocupação para a bacia do Córrego do Cravo. (SAMPAIO, 2014).</i>	54
<i>Figura 6: Mapa de solos do município de Nazareno-MG adaptado de Horta (2006). (OLIVEIRA, 2015).</i>	58
<i>Figura 7: Triângulo textural de solos com localização de áreas agrícolas com erosão na base de dados do WEPP. (ELLIOT et al., 1989).</i>	59
<i>Figura 8: Localização das erosões em áreas agrícolas da base de dados do WEPP. (ELLIOT et al., 1989).</i>	60
<i>Figura 9: Triângulo de textura dos solos. (Agricultural Research Council, 2009).</i>	60
<i>Figura 10: Mapa de solos de Nazareno. Fonte: Horta (2006).</i>	68
<i>Figura 11: Mapas de classificação dos usos do solo em Nazareno. Fonte: Horta (2006).</i>	69
<i>Figura 12: Representação gráfica das classes de ocupação do solo para o verão e inverno, respectivamente. Fonte: Horta (2006).</i>	70
<i>Figura 13: Mapas de classes hipsométricas, de classes de declividade, de direção de fluxo e de uso e ocupação. Fonte: Sampaio (2014).</i>	72
<i>Figura 14: Modelo Digital de Elevação (MDE) com curvas de nível para a Bacia do Córrego do Cravo.</i>	77
<i>Figura 15: Uso e ocupação do solo na Bacia do Córrego do Cravo, MG.</i>	78
<i>Figura 16: Arquivo ROT para o cafezal.</i>	79
<i>Figura 17: Arquivo ROT para estrada.</i>	79
<i>Figura 18: Arquivo ROT para pastagem.</i>	80
<i>Figura 19: Arquivo ROT para área urbana.</i>	80
<i>Figura 20: Arquivo ROT para a vegetação.</i>	81
<i>Figura 21: Arquivo ROT para as voçorocas.</i>	81
<i>Figura 22: Tipos de solo superficial na bacia do Córrego do Cravo, MG</i>	82
<i>Figura 23: Arquivo de solo (.SOL) para a bacia do Córrego do Cravo.</i>	84
<i>Figura 24: Arquivo de solo (.SOL) para o talude direito da bacia do Córrego do Cravo.</i>	85
<i>Figura 25: Arquivo de solo (.SOL) para o talude esquerdo da bacia do Córrego do Cravo.</i>	86
<i>Figura 26: Arquivo de solo (.SOL) para o talude da cabeceira da bacia do Córrego do Cravo.</i>	86
<i>Figura 27: Perfil de declividade da bacia do Córrego do Cravo.</i>	87
<i>Figura 28: Perfil de declividade para o talude direito da bacia do Córrego do Cravo.</i>	88
<i>Figura 29: Perfil de declividade para o talude esquerdo da bacia do Córrego do Cravo.</i>	88
<i>Figura 30: Perfil de declividade para o talude da cabeceira da bacia do Córrego do Cravo.</i>	89
<i>Figura 31: Arquivo de clima (.PAR) da estação de Lavras gerado pelo CLIGEN 5.x.</i>	90
<i>Figura 32: Áreas de influência de cada um dos taludes gerados pelo GeoWEPP.</i>	91

<i>Figura 33: Representação gráfica da perda de solos para simulação a nível de bacia hidrográfica.</i>	<u>92</u>
<i>Figura 34: Simulação para talude da cabeceira do Córrego do Cravo.</i>	<u>94</u>
<i>Figura 35: Simulação para talude direito do Córrego do Cravo.</i>	<u>94</u>
<i>Figura 36: Simulação para talude esquerdo do Córrego do Cravo.</i>	<u>95</u>

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATD - Análise Térmica Diferencial

ATG – Análise Termo-Gravimétrica

BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa

CTC - Capacidade de Troca Catiônica

CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico Típico

DRX - Difração de Raios X

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva

GXbd - Gleissolo Háplico Tb Distrófico

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

LL- Limite de Liquidez

LP - Limite de Plasticidade

LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico Típico

LVdf - Latossolo Vermelho Distróférrico Húmico e Típico

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MO - Matéria Orgânica

SE - Superfície Específica

WEPP - Water Erosion Prediction Project

SIG – Sistema de Informações Geográficas

MDE – Modelo Digital de Elevação

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

TOPAZ – Topography Parameterization

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
2. OBJETIVOS	23
2.1 Objetivos Específicos.....	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.1 Degradação do Solo por Processos Erosivos	24
3.1.1 Fatores condicionantes e deflagradores.....	26
3.1.2 Tipos de feições erosivas.....	30
3.2 Recuperação de Áreas Degradadas por Processos Erosivos	32
3.2.1 Delimitação das feições.....	35
3.3 SIG	37
3.4 WEPP	38
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	44
4.1 Localização e Acesso	44
4.2 Clima	46
4.3 Vegetação	46
4.4 Geologia e Geomorfologia.....	47
4.5 Pedologia	50
4.6 Uso e Ocupação.....	52
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
5.1 Levantamento de Dados.....	55
5.2 ArcGis e GeoWepp.....	55
6. RESULTADOS ANTERIORES	66
7. RESULTADOS.....	76
8. DISCUSSÃO	96
9. CONCLUSÕES	96
10. RECOMENDAÇÕES	97
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

12.	ANEXO	104
------------	--------------------	------------

1. INTRODUÇÃO

A degradação ambiental está diretamente ligada à perda de equilíbrio entre os processos físicos, químicos e/ou biológicos. As feições erosivas são exemplos de degradação por rompimento do equilíbrio entre os processos físicos. Neste caso, ocorre a desagregação, transporte e deposição de sedimentos, sendo a água o principal agente erosivo, em climas tropicais. Esse processo ocorre em uma velocidade elevada, não havendo tempo para reposição do material que foi transportado (formação do solo).

Para os casos de degradação do solo por erosão hídrica, as voçorocas constituem o quadro mais grave, devido a sua grande magnitude. Embora o desenvolvimento dessas feições erosivas dependa de fatores naturais de predisposição e susceptibilidade, geralmente, seu processo de formação está ligado ao uso indevido do solo. Em áreas urbanas, as erosões estão vinculadas à concentração e elevado volume do escoamento das águas pluviais devido à impermeabilização e construções inadequadas de sistemas de drenagem. Em áreas rurais, os processos erosivos associam-se ao manejo inadequado de áreas de pastagem ou culturas com a supressão parcial ou total da vegetação e exposição do solo aos agentes erosivos (gotas de chuva).

Perda de solo por erosão é um grave problema ambiental, não apenas para o local onde ocorre essa perda, mas também para as áreas de depósito desse material, as quais podem sofrer desequilíbrios ambientais como assoreamento de corpos d'água e enchentes, além de diversos outros prejuízos ambientais, sociais e econômicos. Cerca de 56% da degradação dos solos do mundo, é resultante do escoamento hídrico (VITTE e MELLO, 2007), daí a importância de se mensurar os escoamentos e solos que são perdidos.

Segundo Gonçalves (2008), modelos matemáticos têm permitido prever as perdas de solo por erosão, avaliar o impacto dessas perdas sobre o ambiente e a eficiência de técnicas de controle da erosão. Ainda segundo Gonçalves (2008), o WEPP é um modelo computacional de simulação contínua que permite a estimativa da perda e da deposição de solo e não apenas de sua perda média. O WEPP é baseado nos princípios físicos dos processos inerentes à erosão do solo (física do solo, vegetação, infiltração e hidráulica do escoamento), assim apresenta várias vantagens sobre os modelos empíricos, uma vez que considera os efeitos das mudanças de uso e ocupação

do solo e também modela a variabilidade espacial e temporal dos fatores que afetam os processos hidrológicos e erosivos em uma encosta.

Os modelos de predição de perda de solo, em sua grande maioria, foram desenvolvidos e seus parâmetros ajustados para condições de clima temperado, como no caso do modelo WEPP (Gonçalves, 2008). Assim, nesta pesquisa buscou-se avaliar a aplicabilidade deste modelo para condições tropicais. O WEPP apresenta três versões: encosta, malha e bacia hidrográfica (Gonçalves, 2008). A versão para bacias hidrográficas possibilita a determinação do desprendimento, do transporte e da deposição de sedimentos ao longo das diversas encostas até os cursos d'água. Visando avaliar se este modelo seria adequado para estudos de perda de solo em voçorocas, optou-se por trabalhar com a versão de bacia hidrográfica.

Neste contexto, o objetivo principal deste estudo foi estimar a perda de solo na bacia do Córrego do Cravo (Nazareno - MG), voçoroca do Córrego do Cravo. O município de Nazareno (MG) foi escolhido para a realização deste estudo devido ao elevado número de erosões que ocorre neste local. Optou-se por avaliar o emprego do GeoWEPP na voçoroca do Córrego do Cravo, pois a mesma já foi caracterizada e apresenta dados que foram empregados na simulação. Para este estudo utilizou-se, principalmente, os dados de Sampaio (2014) e Oliveira (2015).

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo foi de estimar a perda de solo na bacia do Córrego do Cravo, município de Nazareno (MG), por meio do software GeoWEPP.

2.1 Objetivos Específicos

- A) Avaliar a aplicabilidade do modelo WEPP para voçorocas;
- B) Avaliar a aplicabilidade do modelo WEPP para climas tropicais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Degradação do Solo por Processos Erosivos

Os solos constituem um recurso natural finito e não renovável, devido à sua lenta velocidade de reposição em escala de tempo geológico. Em consequência disso, impactos ambientais negativos (degradação) no solo são de difícil controle e reparação, tanto pela fragilidade, quanto pela diversidade de ações interventoras para a recuperação do mesmo (PEJON et al., 2013a). Assim, atividades que visem à prevenção dos impactos ambientais são necessárias.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1989), degradação do solo pode ser entendida como sendo “*alteração adversa das características do solo em relação aos seus diversos usos possíveis, tanto os estabelecidos em planejamento quanto os potenciais*”. Assim como em outros recursos naturais, a degradação do solo consiste na alteração de suas propriedades com perda de funcionalidade e quebra de equilíbrio físico-químico e ecossistêmico.

No caso da degradação do solo, segundo Barrow (1991) e Pejon et al. (2013a), é preciso que haja uma avaliação na extensão dos danos e a identificação se o processo de degradação é controlável ou reversível, uma vez que a intensidade e velocidade das atividades antrópicas torna a degradação ainda mais acentuada, e a recuperação da área degradada, às vezes se torna impossível. Segundo Machado (2008) apud Sampaio (2014), a degradação do solo pode ser de três tipos: química, na qual se observa a diminuição de nutrientes devido à lixiviação; física, com a desestruturação das partículas do solo; e biológica, na qual há modificações biogeoquímicas.

A erosão é um exemplo de degradação gerada pelo desequilíbrio dos processos físicos. A erosão é entendida como o processo de desagregar e remover porções de solo ou rocha, devido à ação combinada de agentes como a gravidade, água, vento e gelo (BITAR, 1995). A sequência de eventos relacionados à erosão pode ser descrita pela inicial desagregação das partículas do solo com posterior transporte do material destacado pelo escoamento superficial, e por fim, esse material é depositado em locais mais baixos, culminando em regiões de assoreamento. Esse processo de transformação da superfície terrestre pode se desenvolver em condições naturais de equilíbrio e formação do solo, chamada erosão natural ou geológica, ou em condições aceleradas,

com remoção de solo mais rápida que a reposição propiciada pelo intemperismo, nomeada de erosão acelerada (GUERRA, 1995; OLIVEIRA e BRITO, 1998; ROTTA, 2012).

A erosão natural é um processo que ocorre lentamente ao longo do tempo geológico e é regulado pelo equilíbrio entre os processos físico, químico e biológico. No entanto, essa erosão equilibrada pode ter sua velocidade e intensidade alteradas naturalmente por mudanças geológicas ou climáticas. Tais alterações resultam em desequilíbrio, porém o processo continua lento e seus efeitos apenas são percebidos em milhares de anos, constituindo uma erosão acelerada natural (BITAR, 1995).

Quando a aceleração dos processos erosivos é provocada pelo homem, a velocidade de erosão é muito mais rápida e de grande abrangência territorial que resultam em diversos impactos ambientais prejudiciais ao meio. Dessa maneira, a ação humana no ambiente é um fator deflagrador muito importante na origem e aceleração dos processos erosivos (BITAR, 1995). Neste caso, o equilíbrio entre os processos físico, químico e biológico é rompido, tendo-se uma perda de solo elevada, sem que haja reposição do mesmo.

Dentre os agentes erosivos, a água é o mais atuante em regiões tropical, e ao tipo de erosão provocado pela chuva dá-se o nome de erosão hídrica. No Brasil, pela predominância de regiões com grande ocorrência de chuvas, a maioria dos processos erosivos são resultados da ação das águas. Durante uma chuva, parte da água atinge diretamente o solo e parte é interceptada pela cobertura vegetal, sendo que uma parcela dessa água interceptada retorna à atmosfera, e outra parcela atinge o solo posteriormente (GUERRA, 1995). A água que atinge o solo tende a causar erosão por salpicamento ou *splash*, desagregando partículas de solo, além de poder infiltrar ou ser armazenada em depressões da superfície. O movimento das águas superficiais é iniciado no momento em que o solo não absorve mais água, e o escoamento hídrico causa erosão pelo transporte das partículas desagregadas. Apesar das taxas de infiltração serem bastante variáveis e dependentes de diversas propriedades do solo, a infiltração tende a ser maior no início do evento chuvoso e vai diminuindo até que a capacidade de armazenamento do solo esteja saturada. Conforme a água vai infiltrando e o solo vai ficando saturado, o escoamento superficial se desenvolve, de modo que as partículas desagregadas são removidas e carregadas até regiões mais baixas onde esse solo será depositado, podendo causar assoreamento (GUERRA, 1995).

Para Gomide, Silva e Soares (2011), a erosão hídrica é uma das principais causas de degradação do solo, sendo responsável pela inviabilidade de uso socioeconômico e ambiental desse recurso. Segundo Valentin, Poesen e Li (2005) a erosão hídrica acarreta impactos imprevisíveis muito mais sérios que os já conhecidos, especialmente em relação às funções hidrológicas.

Diversas alterações ambientais são acarretadas por processos erosivos. Modificações no relevo pela retirada e depósito de material erodido, com alterações na geometria da encosta e nas margens e frequência de canais. No que diz respeito às águas superficiais, verifica-se o assoreamento de reservatórios e canais, alterações no escoamento superficial e na forma dos canais de drenagem, além de modificações na qualidade das águas. Para as águas subsuperficiais, processos erosivos podem ser responsáveis por mudanças no fluxo e no nível de água. Os materiais geológicos, como materiais inconsolidados e rochas das camadas mais rasas sofrem alterações em suas propriedades pela retirada dessas camadas e exposição do material. O meio biótico sofre perturbações na biodiversidade pela retirada da cobertura vegetal. E por fim, o aspecto antrópico também pode ser atingido pela destruição de obras de engenharia e infraestrutura (RODRIGUES, FERREIRA e ZUQUETTE, 2015).

Segundo Guerra (1995), de acordo com a forma de escoamento, a erosão hídrica pode ser dividida em: erosão subsuperficial, laminar e linear, as quais estão descritas no tópico 3.1.2.

3.1.1 Fatores condicionantes e deflagradores

Qualquer processo erosivo está sujeito a agentes condicionantes e fatores deflagradores. Os condicionantes são propriedades intrínsecas ao solo e ao local em questão, e são evidenciados em características como tipo, textura, mineralogia, espessura do solo; tipo de rocha de origem e estrutura rochosa do local; declividade do terreno; formato e comprimento das encostas; presença de cobertura vegetal e matéria orgânica, entre outros. Enquanto que os deflagradores são os desencadeadores da erosão, a qual é dependente da quantidade e intensidade de ação desses fatores, os quais podem ser agentes erosivos como a chuva, o vento, a gravidade e o gelo, ou a ação antrópica. Alguns autores classificam a chuva como um condicionante por ser uma característica natural do clima local, enquanto que outros, a classificam como

deflagradores por ser considerada um agente erosivo desencadeador da erosão (BITAR, 1995; PEJON, RODRIGUES E ZUQUETTE, 2013a).

A ocorrência e proporção das erosões submetem-se aos conceitos de erodibilidade e da erosividade. A erodibilidade do solo pode ser interpretada como o quão suscetível à erosão aquele solo é (RIBEIRO et al., 2006), ou pode ser entendida como o grau de resistência de um solo aos processos erosivos (PEJON, RODRIGUES E ZUQUETTE, 2013a). Essa suscetibilidade é influenciada pela declividade do local, uso e ocupação do solo, condições climáticas da região, tipo de cobertura vegetal e propriedades do solo como infiltração, coesão, matéria orgânica, textura, teor de umidade, entre outros. Já erosividade é uma propriedade que avalia o quão erosiva uma chuva pode ser (BITAR, 1995; OLIVEIRA e BRITO, 1998; SILVA, 2003), tanto pela intensidade como pelo tempo de atuação.

Salvo algumas diferenças de abordagem, a maioria dos autores descrevem os eventos interferentes na erosão de maneira bem parecida. Bitar (1995) cita a chuva, a cobertura vegetal, a topografia e os tipos de solo como condicionantes naturais, enquanto que Oliveira e Brito (1998) adicionam o substrato rochoso à esses fatores. Observa-se que para esses autores a chuva é um condicionante para ocorrência de erosões, e que a ação erosiva do evento chuvoso é função da distribuição pluviométrica espaço-temporal relativa à chuva acumulada, e da intensidade do evento chuvoso. A cobertura vegetal funciona como uma defesa natural do solo, por meio da proteção ao impacto direto das gotas de chuva devido à diminuição da energia da gota que atinge o solo, pelo aumento da infiltração por meio das raízes e aumento de retenção de água pela matéria orgânica. Consequentemente há diminuição do volume e dispersão de energia do escoamento superficial. Nesse sentido, o desmatamento expõem o solo, que fica desprotegido e susceptível à erosão. Por sua vez, o relevo tem papel determinante na velocidade de fluxo das águas devido à declividade e comprimento da encosta, de modo que quanto mais inclinada e comprida for a vertente, maior é a velocidade de escoamento e maior é a capacidade das águas em causar erosão (BITAR, 1995). Para Guerra (1995), embora a forma de encosta curtas convexo-côncavas facilitem o destacamento de solo, a declividade, comprimento e forma dos taludes atuam em conjunto na ocorrência de processos erosivos. Em relação ao substrato rochoso, características litológicas estão intimamente associadas ao grau de intemperismo, alteração e fraturamento, intervindo na suscetibilidade a erosão. No Brasil, por exemplo,

as principais regiões de existência de voçorocas estão vinculadas à presença de formações geológicas sedimentares e solos arenosos (OLIVEIRA e BRITO, 1998).

O grau de resistência do solo à erosão é determinado por suas propriedades físicas e químicas. Em relação às propriedades físicas destacam-se a textura, estrutura, permeabilidade e densidade. A textura corresponde ao tamanho das partículas, e influencia na coesão do solo e na infiltração da água. Oliveira e Brito (1998) descrevem que solos arenosos por serem porosos e com grande capacidade de infiltração, contribuem para a diminuição de escoamento superficial, todavia, por apresentarem baixa fração de argila, são solos pouco coesos e mais suscetíveis à desagregação das partículas. A estrutura diz respeito ao modo como as partículas se arranjam, interferindo na infiltração e capacidade de arraste. Salomão e Iwasa (1995 apud OLIVEIRA E BRITO, 1998) explicam que solos argilosos, em geral, são menos permeáveis que os arenosos, porém a estruturação das partículas pode tornar um solo argiloso mais poroso e até mais permeável que solos arenosos. A permeabilidade é determinante na infiltração de água no solo, e está diretamente relacionada a porosidade (BITAR, 1995). A espessura do solo também é uma característica importante no desenvolvimento de processos erosivos, uma vez que solos rasos saturam mais rápido e, conseqüentemente, aumentam o escoamento superficial.

A respeito das propriedades químicas, biológicas e mineralógicas do solo, essas atuam na agregação das partículas, influenciando na resistência do solo à erosão. Para Bitar (1995) a matéria orgânica promove agregação e coesão nas partículas, além de melhorar a capacidade de infiltração, tornando o solo menos erodível.

Com algumas diferenças de abordagem, Guerra (1995) cita a erosividade das chuvas, propriedades dos solos, cobertura vegetal e características das encostas como fatores controladores da erosão. Para o autor, a atividade humana atua na aceleração ou retardamento dos processos erosivos. Um bom critério para análise de perda de solo em processos erosivos é a quantificação da erosividade das chuvas, isso porque a intensidade do evento chuvoso influencia muito nas taxas de infiltração e, conseqüentemente, no escoamento superficial. No entanto, essa análise quantitativa é um processo bastante complexo devido à variação de intensidade e de espaço e tempo das chuvas (GUERRA, 1995). Outro fator controlador da erosão são as propriedades do solo as quais determinam o grau de susceptibilidade do solo aos processos erosivos. Dentre essas propriedades, destacam-se a textura, densidade aparente, porosidade,

matéria orgânica, agregados e pH. A influência da textura está relacionada à facilidade de remoção dos sedimentos que depende das frações granulométricas, de modo que essa facilidade aumenta da fração argila para areia. A estrutura de agregação dos sedimentos no solo é influenciada pela matéria orgânica, a qual é função da flora e fauna presentes no solo. Segundo Guerra (1995), para solos com alto teor de silte e argila, quanto maior o teor de matéria orgânica menor é a erodibilidade do solo, enquanto que para solos argilosos, essa relação não é tão evidente. Ribeiro et al. (2006) ressaltam que o arranjo dos poros e agregados influencia na aeração, condução e retenção de água no solo, assim como na resistência desse ao desenvolvimento de raízes e aproveitamento de nutrientes. Dessa forma, os autores afirmam que a distribuição dos poros é responsável pelo comportamento físico-hídrico de um solo, e a condutividade hidráulica do solo saturado tem variação diretamente proporcional com a macroporosidade. A densidade aparente interfere na compactação do solo, e relaciona-se intimamente com a matéria orgânica de modo que a medida que o teor de matéria orgânica diminui, intensifica-se o destacamento dos agregados, crostas são formadas na superfície do solo e a compactação do mesmo aumenta (GUERRA, 1995). Quanto ao pH, esse fator deve estar sempre relacionado às outras características do solo para avaliação de sua influência em processos erosivos de solos (GUERRA, 1995).

Embora a cobertura vegetal exerça papel fundamental na proteção do solo contra processos erosivos e no auxílio para formação de matéria orgânica e húmus que aumentam a estabilidade do solo, ela pode provocar aumento de erosão por *splash* na região ao redor da copa das árvores uma vez que as folhas podem concentrar as gotas de chuva (GUERRA, 1995). Além disso, a vegetação associada às características topográficas pode ocasionar efeitos de sobrecarga no solo e funcionar como alavanca ao deslizamento dos taludes, ou ainda a vegetação pode proporcionar concentração dos escoamentos com formação de caminhos preferenciais à água, precedentes de erosões (OLIVEIRA, 2015).

Um aspecto essencial na dinâmica erosiva é o uso e ocupação do solo. Processos naturais de erosão são acelerados pela intensificação de sistemas agrícola, seja pela depleção de material orgânico que reduz a estabilidade estrutural do solo e causa concentração do escoamento, ou por canais de irrigação que favorecem a erosão pelo fluxo da água. Atividades de pastoreio podem dar início a processos erosivos pela compactação do solo e formação de trilhas resultantes do pisoteio de animais. Ademais,

a construção de rodovias e estradas além de alterar o escoamento hídrico na área, também provoca efeitos importantes além da região da estrada, isso porque estradas induzem a concentração do escoamento superficial e aumentam o transporte de sedimentos, o que contribui para formação e aumento das feições erosivas (VALENTIN, POESEN e LI, 2005).

Todas as características naturais e de usos e ocupação antrópicos de uma região, interferem em conjunto no desenvolvimento de erosões. Essa ação conjunta pode retardar ou acelerar o início e desenvolvimento do processo erosivo (VALENTIN, POESEN e LI, 2005). Por isso é necessária avaliação integrada de todos os fatores atuantes na área de estudo, sejam condicionantes ou deflagradores.

3.1.2 Tipos de feições erosivas

De acordo com o local de ocorrência, as erosões no solo podem ser divididas em rurais e urbanas, cada tipo com características específicas. Processos erosivos urbanos são complexos e de enorme preocupação. Isso porque a dinâmica da erosão urbana é dependente do processo de ocupação e urbanização e bastante variável no tempo e espaço, pela constante e intensa modificação do espaço urbano. O processo de desenvolvimento das cidades aumenta áreas construídas e impermeáveis, reduz a infiltração e intensifica o escoamento superficial e, portanto, há aumento da velocidade e volume escoado, acarretando desastres com perdas econômicas, ambientais e até populacionais (FERREIRA, 2004). Assim, percebe-se que processos erosivos urbanos destroem moradias, construções públicas sejam elas ruas ou sistemas de drenagem e esgoto, causam desvalorização imobiliária, além de perdas de vidas humanas. Dessa maneira, as dificuldades de mitigação, controle e recuperação de feições erosivas urbanas estão vinculadas a área envolvida, e ao próprio padrão de urbanização que é responsável pela rápida evolução e difícil controle das feições erosivas nas cidades (SAMPAIO, 2014; OLIVEIRA e BRITO, 1998).

Por outro lado, processos erosivos em áreas rurais constituem uma das formas de degradação oriundas de atividades de intervenção agrícola, desmatamento e mecanização do solo. Relacionam-se principalmente ao manejo inadequado de áreas de pastagem ou culturas com má cobertura vegetal (SAMPAIO, 2014; OLIVEIRA e BRITO, 1998).

As feições erosivas resultantes da erosão hídrica dependem da forma como ocorre o escoamento, sendo assim divididas entre erosões subsuperficial, laminar e linear. Quando o escoamento das águas é difuso e disperso, há remoção uniforme e progressiva dos horizontes mais superficiais do solo, tem-se a erosão do tipo laminar. Nesse tipo de erosão, não há concentração do escoamento em canais definidos, e a retirada de solo ocorre na superfície como um todo. É um processo erosivo de difícil percepção, mas que pode ser detectado pela diminuição da produção agrícola e aparecimento de raízes no terreno (BENNETT, 1995 apud FENDRICH, 1997), e pela descoloração do solo (BAHIA et al, 1992 apud SAMPAIO, 2014).

Quando há formação de canais de água, com existência de um caminho preferencial no escoamento, ocorre erosão concentrada, que pode adquirir diversas proporções. Erosão linear é definida para escoamentos com concentração do fluxo das águas, em que incisões são formadas no terreno na forma de sulcos, os quais podem evoluir para ravinas e voçorocas. A feição inicial característica desse processo erosivo são sulcos os quais surgem como pequenas incisões no solo com profundidade e largura inferiores a 50 centímetros, e por serem a fase inicial da erosão, são de fácil recuperação e com intervenções simples podem ser estabilizados. Ravinas são as feições evoluídas dos sulcos. As ravinas caracterizam-se por profundidade maior que 50 centímetros, porém não atingem o lençol freático e não se ramificam (FERREIRA, 2004). Boçorocas ou voçorocas são o estágio mais avançado da erosão e são de grandes dimensões, apresentam ramificações e atingem o nível d'água. A classificação das voçorocas pode englobar critérios diversos, como idade, localização, formato de seção transversal, dimensão, forma, dentre outros. Devido a essa complexidade as voçorocas são de difícil controle e recuperação (BITAR, 1995; GUERRA, 1995; PEJON, RODRIGUES E ZUQUETTE, 2013a).

Para situações em que fluxos de água subsuperficiais, inclusive o lençol freático, influenciam na desagregação e remoção de partículas, o processo erosivo é interno e ocorre a formação de canais vazios podendo causar colapsos. Esses vazios podem ocasionar desabamentos no terreno que aumentam e ramificam ainda mais as voçorocas (FERREIRA, 2004; BITAR, 1995; GUERRA, 1995).

Para Valentin, Poesen e Li (2005) voçorocas são feições erosivas não limitadas ao local de ocorrência apenas, mas integram uma séria causa de degradação global do solo que afeta uma grande variedade de solos e o lençol freático. Considerando diversas

circunstâncias, essas feições podem ser consideradas as principais fontes de sedimentos em nível de bacia hidrográfica e são frequentemente desencadeadas ou aceleradas por uma combinação de uso inapropriado do solo com eventos extremos de chuva (VALENTIN, POESEN e LI, 2005).

3.2 Recuperação de Áreas Degradadas por Processos Erosivos

De maneira geral, recuperação ambiental de uma área fundamenta-se no estabelecimento de uma forma de uso com estabilidade física e química do meio ambiente, e um novo equilíbrio dinâmico. Pejon, Rodrigues e Zuquette (2013b) explicam que o conceito de recuperação ambiental pode ser separado em classes dependendo da origem clássica, legal e institucional. Como definição clássica, Williams et al (1990) conceituam recuperação ambiental como a ação de dar à área degradada um uso que esteja de acordo com um plano preestabelecido. Nesse conceito inclui-se também a obtenção de uma condição estável segundo aspectos ambientais, estéticos e sociais das áreas próximas, que permitam à região degradada atingir um novo equilíbrio dinâmico, tanto com novo solo como com nova paisagem. Para a definição legal, o conceito estabelecido na Lei Federal nº 99.885/2000 diz que recuperação ambiental é a *“restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original”*. Por fim, a norma técnica da ABNT NBR 13.030 de 1999 é um exemplo de definição institucional do conceito de recuperação ambiental. Essa norma conceitua recuperação ambiental como o grupo de ações que recompõem a área que sofreu degradação para que a função original daquele ecossistema seja restabelecida. Para Bitar (1995) recuperação de uma área deve visar a obtenção de um equilíbrio e estabilidade o mais próximo possível da situação anterior ao processo de degradação.

De acordo com as características da área degradada, a recuperação de uma área é uma atividade que apresenta níveis, sendo eles restauração, reabilitação e remediação. Simplificadamente, restauração consiste no retorno do ambiente degradado às condições ambientais anteriores à degradação (PEJON, RODRIGUES e ZUQUETTE, 2013b), através da restituição das condições naturais e uso anteriores ao processo erosivo, e resultando na reprodução exata das condições do meio precedentes à intervenção (BITAR, 1995). Reabilitação é entendido como o reaproveitamento da área degradada

para uma outra finalidade diferente da condição anterior à degradação, associada a um uso futuro conforme um plano previamente estabelecido e que esteja em conformidade com as áreas vizinhas. A remediação, diferentemente da restauração e reabilitação, está ligada à recuperação de áreas contaminadas e visa diminuir ou eliminar a concentração do contaminante para que o ambiente possa ser reutilizado (PEJON, RODRIGUES e ZUQUETTE, 2013b; BITAR, 1995).

A recuperação de um ambiente pode se dar por processos naturais, ou por meio de intervenções corretivas. Quando é viável a execução de intervenções, em geral, essas resultam na obtenção de condições de estabilidade física da área por meio de obras geotécnicas e revegetação. Por outro lado, a recuperação natural depende de condições biogeoquímicas favoráveis no meio, e em situações de degradação que envolva uma área muito extensa e elevados custos das técnicas necessárias, esta é a única alternativa para a recuperação (PEJON, RODRIGUES e ZUQUETTE, 2013b). Segundo Morgan (1995), o objetivo principal do controle da erosão, é evitar que a degradação da qualidade do solo cause efeitos que não possam ser recuperados, e em longo prazo, a área não seja mais útil para usos futuros.

Não há solução única para recuperação das áreas erodidas, cada situação é própria e distinta, com particularidades do meio físico, uso do solo e recursos disponíveis, e por isso, uma técnica específica deve ser utilizada em cada caso (FENDRICH, 1997; SALOMÃO, 2010). Daí a importância do respaldo de estudos geológico geotécnicos na escolha da técnica de controle e recuperação de erosão que não dependem apenas das características da área, mas também da finalidade que se pretende dar ao local degradado (RODRIGUES, FERREIRA e ZUQUETTE, 2015). Para Ayres (1936 apud ROTTA, 2012), o controle de erosão engloba práticas que promovem o aumento das taxas de infiltração e assim a água de escoamento seja absorvida. Além disso, é necessária redução do impacto das gotas de chuva, aumento da resistência do solo ao cisalhamento e diminuição da força de arraste da água (LAL, 1990).

Alguns autores propõem divisões das medidas de intervenção para feições erosivas causadas pela ação da água da chuva. Rotta (2012) explica que entre as maneiras de intervenção mais utilizadas e difundidas para erosões hídricas, destacam-se técnicas de prevenção, controle, mitigação e recuperação. Técnicas de prevenção são caracterizadas por tentar evitar a ocorrência da erosão tanto pela diminuição da

vulnerabilidade dos condicionantes quanto pelo inibição do processo deflagrador (ROTTA, 2012). Medidas de controle não modificam o estado da erosão, elas apenas interrompem o desenvolvimento da feição erosiva. Já as atividades de mitigação relacionam-se à redução ou eliminação de um impacto negativo ocasionado pela área degradada. Enquanto que recuperação é um conjunto de técnicas que eliminem totalmente a erosão e vulnerabilidades existentes. Nesse processo de recuperação existem níveis identificados como reabilitação, quando o local é destinado a um uso diferente do anterior à degradação, e restauração, quando são restabelecidas as condições naturais e uso anterior ao processo erosivo (ROTTA, 2012). Para intervenções em áreas degradadas, há diversas técnicas de revegetação, culturas em faixa, técnicas de plantio direto, rotação de culturas, terraceamento, curvas de nível, barragens e canais escoadouros, meios-fios, sarjetas, galerias, dissipadores de energia, proteção de talude, uso de geossintéticos com vegetação, entre outros.

Uma outra visão de classificação das técnicas de recuperação foi proposta por Morgan (1995). O autor propõe 3 divisões para técnicas de conservação do solo: as técnicas agrícolas que consistem na proteção do solo por meio o uso da vegetação; técnicas de manejo as quais atuam no preparo do solo com melhorias na sua estrutura e resistência, objetivando a facilitação do crescimento vegetal; e técnicas mecânicas as quais são basicamente estruturas de engenharia para controle do escoamento. Bitar (1995) desenvolve uma visão mais técnica dos processos de recuperação, e defende que o controle de erosões é dividido de acordo com o tipo dessas feições, se rurais ou urbanas. Medidas de controle e recuperação de erosões em áreas rurais envolvem o conjunto da aplicação de técnicas e execução de práticas agrícolas para manutenção da capacidade produtiva das terras. Loschi et al (2014) enfatizam que espécies vegetais capazes de se desenvolverem em condições adversas são imprescindíveis para recuperação natural de áreas degradadas, visto que nessas regiões há deficiências de nutrientes no solo, umidade e outros fatores essenciais ao desenvolvimento vegetal. Para Stroosnijder (2005), a erosão pode ser controlada de três formas principais, sendo elas a persuasão moral combinada com instrumentos de regulamentação, por exemplo, respeito ao uso da terra; por medidas culturais, de apoio ou estruturais; e por subsídios e outros incentivos.

Independente de qual seja a prática de conservação aplicada, o objetivo deve ser a adequação à capacidade de uso do solo em estudo. Para isso, a escolha da técnica deve

considerar as propriedades tanto físicas quanto químicas do solo, características do talude como declividade e comprimento, e ainda as particularidades do uso e ocupação da região, condições socioeconômicas e circunstâncias futuras para manutenção das obras de intervenção. Portanto, estudos geológico-geotécnicos e de caracterização da área são de extrema importância no processo de recuperação de áreas degradadas.

3.2.1 Delimitação das feições

O aumento do interesse no controle e recuperação de voçorocas, e a intensificação da preocupação com os impactos que atingem além dos limites físicos das feições erosivas são justificados, principalmente, pela grande abrangência espacial que as erosões têm atingido em áreas cultiváveis, e às consequências ambientais, sociais e econômicas negativas que as voçorocas têm promovido nos últimos anos (VALENTIN, POESEN E LI, 2005). Segundo Stroosnijder (2005), a grande variação espaço-temporal dos processos erosivos e a carência de precisão nas medições têm sido duas constantes dificuldades de determinação da magnitude destes processos. Somado a esses dois fatores, o problema de extrapolação de informações para grandes escalas a partir de poucos dados, e a questão da conversão da erosão para unidades monetárias visando à mensuração do impacto, torna essa avaliação quantitativa ainda mais difícil (STROOSNIJDER, 2005).

Ainda segundo Stroosnijder (2005), a avaliação de processos erosivos ocorre, normalmente, em escala de bacia hidrográfica, e envolve apenas dois procedimentos: as medidas diretas e uso de tecnologia de predição de erosão. O autor relata que inventários de erosão em escalas de bacia fornecem, na melhor das hipóteses, uma visão do estado atual da erosão, e que dificilmente indicam a taxa de erosão e o processo erosivo em um período de tempo. Além disso, aponta como ponto fraco dos inventários a falta de informações do impacto da erosão sobre a produtividade e o ambiente. Considerando tais deficiências de estudo, Stroosnijder (2005) comenta sobre a necessidade de realização de pesquisas científicas, com experimentos em laboratório e campo, para melhor entendimento da evolução do processo erosivo, além de uma abordagem sobre suas causas e sobre seus efeitos.

Rodrigues, Ferreira e Zuquette (2015), indicam a necessidade de estudos envolvendo diferentes escalas de observações, indo da escala regional (inventário) até

escala de detalhe (envolvendo ensaios em campo e laboratório). Esses autores sugerem quatro escalas de trabalho: regional, de bacia, vertente e de detalhe. Sendo que em cada uma delas é possível obter uma informação distinta do processo erosivo. Dentre esses estudos geológico-geotécnicos, pode-se citar o uso de mapas físicos, fotografias aéreas e de sensoriamento remoto, trabalhos de campo, ensaios *in situ* e em laboratório, entre outros.

Na hierarquia escalar definida por Rodrigues, Ferreira, e Zuquette (2015), a escala regional, de 1:50.000 ou menor, é utilizada na localização, identificação e delimitação da área degradada. O resultado dessa análise escalar é um inventário regional que contém o levantamento das informações geológico-geotécnicas da área e da degradação, obtidos por meio de imagens de satélites ou radar, fotografias aéreas e de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT). Além disso, trabalhos de campo devem confirmar as informações obtidas pelas imagens e identificar outras formas de degradação não identificadas previamente. Na escala de bacia hidrográfica (1:50.000 e 1:25.000), os estudos devem complementar e detalhar o inventário geral gerado no estudo realizado em escala regional. O objetivo de estudos nessa escala é a obtenção de dados para identificação de relações entre as áreas que sofrem os processos erosivos, a evolução dessas erosões e as características geológico-geotécnicas do local. Nessa etapa, os estudos estão relacionados ao tipo de área erodida, à área da bacia que deve ser inferior à 100 km², e à magnitude do processo erosivo. São realizados principalmente trabalhos de campo e análises e ensaios laboratoriais, com complemento de fotografias aéreas e imagens de satélite, radar e VANT. Além disso, as áreas com processos erosivos são relacionadas as cartas de declividade, mapas de substrato rochoso e material inconsolidado, mapas hidrológicos, entre outros, a fim de que fornecer subsídios para os estudos posteriores como priorização das investigações mais quantitativas e detalhadas (RODRIGUES, FERREIRA e ZUQUETTE, 2015).

Na escala de vertente (1:10.000), Rodrigues, Ferreira, e Zuquette (2015), comentam que as informações obtidas com os estudos geológico-geotécnicos são mais quantitativos, e visam compreender a dinâmica dos processos erosivos. Nessa escala, os estudos consistem na identificação das vertentes por imagens de satélite e fotografias aéreas e, principalmente, por trabalhos de campo e caracterização laboratorial, para análise de propriedades como escoamento superficial e declividade, e outras características como infiltração e instabilidade do solo. Os estudos geológico-

geotécnicos nessa escala fornecem uma representação 3D da vertente permitindo modelagem matemática do processo erosivo na vertente, e resultam em uma hierarquização dos locais e tipos de degradação que devem ser avaliados em escala de detalhe. A escala de detalhe (1:5.000 e 1:2.500), envolve estudos geológico-geotécnicos que fornecem detalhamento da área erodida com caracterização realizada por trabalhos de campo, para que haja subsídio técnico na tomada de decisão quanto à recuperação da área. O resultado dos estudos nessa escala engloba mapeamento dos materiais geológicos, fluxo sub e superficial, obtenção de amostras de água e materiais geológicos, medidas geométricas e morfométricas, ensaios *in situ* e laboratoriais específicos, entre outros (RDRIGUES, FERREIRA e ZUQUETTE, 2015).

Ainda segundo Rodrigues, Ferreira e Zuquette (2015), a visão multiescalar auxilia na comparação entre a degradação e a situação natural do local, e no entendimento e proposição de soluções para problemas de grandes dimensões em nível de bacia hidrográfica, e para áreas menores e mais específicas como os limites de uma feição erosiva.

3.3 SIG

Os sistemas de informações geográficas (SIGs) são um conjunto de ferramentas que possibilitam a coleta, tratamento, armazenamento e análise de dados georreferenciados. Esses sistemas são muito utilizados para acompanhamento do uso e manejo de solo e análises temporais de uma porção territorial. São ferramentas importantes uma vez que minimizam os custos e tempo no tratamento de dados e de investigação do local de estudo (HORTA et al., 2009). Como ferramentas de armazenamento, os SIGs permitem a realização do geoprocessamento, definido como a manipulação de informações associadas a uma área no espaço. Ao conjunto de dados representativos de atributos físicos ou sociais intrínsecos a uma determinada localização dá-se o nome de informação geográfica (FERREIRA, 2005).

O SIG permite unir diversas informações tanto de entendimento prévio das características socioambientais de um local, quanto dados criados ou manipulados, imprescindíveis para o planejamento integrado de recuperação de áreas degradadas. Assim, o uso de SIG para combinar informações, fornece bases e subsídios para a compreensão dos processos de degradação ambiental. Dessa forma, a manipulação de

dados existente com a geração de informações adicionais, permite uma visão holística do processo, o que auxilia no planejamento ambiental (FERREIRA, 2005; SAMPAIO, 2014).

O uso combinado de SIG com outros modelos de simulação, como o WEPP, tem sido bastante utilizado devido à disponibilidade de análise de informações, entendimento e predição de processos erosivos e perdas de solo, em diferentes escalas geográficas. No entanto, é preciso cuidado na utilização de *softwares*, uma vez que estes propagam erros em relação às escalas utilizadas e à compatibilização com as informações reais (SAMPALIO, 2014; HORTA et al., 2009).

3.4 WEPP

O modelo de predição de erosão WEPP foi desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em agosto de 1985, com um conjunto de instituições norte americanas relacionadas à agricultura, manejo e conservação do solo e florestas (FLANAGAN, GILLEY e FRANTI, 2007; GONÇALVES, 2008). O WEPP surgiu como uma nova tecnologia para predição de erosão hídrica disponível para agências federais ligadas à conservação do solo e água, e avaliação e planejamento ambiental. Em sua primeira versão, o modelo fazia estimativas de perda de solo apenas em taludes, não sendo capaz de estimar escoamentos, perdas de solo em pequenas bacias, erosão em corpos hídricos, efeitos de represamento, produção de sedimentos ou probabilidade da ocorrência de eventos erosivos (FLANAGAN, GILLEY e FRANTI, 2007). Assim, inicialmente, o WEPP tinha o objetivo de substituir a equação universal de perda de solo (USLE - Universal Soil Loss Equation), porém o modelo se desenvolveu e superou as deficiências da primeira versão (MARIA, CHAVES e DECHEN, 2001).

O desenvolvimento do WEPP envolveu engenheiros e cientistas que criaram um modelo lógico amparado em experimentos laboratoriais e de campo, com parametrização e testes no programa, além da criação de interfaces e banco de dados. Durante os dez primeiros anos de criação, mais de 50 locais nos Estados Unidos foram utilizados como pontos experimentais para verificação do modelo (FLANAGAN, GILLEY e FRANTI, 2007).

Atualmente, o modelo consiste em elaborar simulações contínuas de estimativas de perda de solo decorrentes da erosão hídrica, com base em parâmetros de entrada específicos de clima e solo (OLIVEIRA E CECÍLIO, 2011). O WEPP tem sido bastante utilizado pelo Serviço Florestal do Departamento de Agricultura e pelo Departamento de Gestão de Terras do Interior dos Estados Unidos para avaliação das erosões do solo e determinação de estratégias de remediação dessas áreas. Além disso, agências públicas e privadas aplicam o modelo em mais de 16 países, em especial o Canadá, que pelo departamento de Alimentação e Agricultura utiliza o WEPP como base em suas práticas de conservação do solo. Outro uso bastante difundido do programa, diz respeito à identificação e acompanhamento do destacamento, transporte e deposição de sedimentos em solos contaminados com lixo radioativo no Colorado, EUA, e maneiras de recuperação de tais áreas (FLANAGAN, GILLEY e FRANTI, 2007). Diversos países tem realizado trabalhos com uso do modelo WEPP, com destaque para a China, Índia, Itália, Peru e Noruega (OLIVEIRA, 2010).

Apesar do modelo apresentar deficiências de modelagem, principalmente em relação à erosões de grande porte, a escolha do WEPP para desenvolvimento deste trabalho deve-se às suas diversas vantagens, abrangência internacional, inclusive com experimentos no Brasil, aos bons resultados do programa em predições de erosão por meio de uma fácil utilização e por ser um software aberto de livre acesso.

No Brasil, alguns trabalhos foram realizados utilizando o modelo WEPP. A maioria deles comparou os resultados obtidos na simulação, com aqueles obtidos por monitoramento em regiões experimentais. Essa comparação ocorreu, normalmente, em duas situações. Uma utilizava dados de entrada calculados pelas equações internas do modelo, e a outra utilizava dados de entrada referentes às características da região estudada. Os resultados dos estudos mostraram que para a segunda condição estimou melhor as perdas de água e sedimentos uma vez que o modelo foi ajustado para as condições brasileiras. A seguir, estão sintetizadas algumas dessas pesquisas.

O trabalho realizado por Garcia (2001) consistiu na determinação do volume de água escoado e da quantidade de sedimentos produzidos em estradas florestais sob condições de chuva natural. Com os dados obtidos em campo, o modelo WEPP foi validado através da comparação de tais dados com os resultados da modelagem matemática. O local de estudo foi uma área de reflorestamento por Pinus em Agudos –

SP. A pesquisa foi realizada em 16 porções de estrada, agrupados em quatro conjuntos com os seguintes requisitos: para comprimento de 20 m, os segmentos se separavam em declividade de 1% e 7%, e para comprimento de 40 m, as declividades também eram de 1 % e 7 %. Como dados de entrada, introduziu-se no modelo WEPP, as informações de clima, precipitação, solo, inclinação e comprimento de cada fragmento de estrada visando à validação desse modelo de predição de erosão adaptado às condições florestais brasileiras. Quanto aos resultados, Garcia (2001) constatou que em relação ao volume de água e peso de solo estimados pelo modelo WEPP, o efeito da declividade foi mais relevante que o comprimento. Na validação do modelo WEPP, a autora descreve que os valores de volume de enxurrada fornecidos pelo modelo matemática superestimaram os dados reais. Já no parâmetro de perdas de solo, para condições de baixa declividade, os valores foram muito subestimados, com variações de até 1125% menores em relação aos dados observados. Garcia (2001) conclui que o modelo de predição WEPP não está ajustado para as condições do Brasil, sendo necessário criação de uma base de dados brasileira.

O trabalho apresentado por Maria, Chaves e Dechen (2001) objetivou examinar o uso do modelo de predição de erosão WEPP em regiões tropicais por meio de obtenção dos dados de entrada e análise comparativa dos resultados. Os autores, portanto, compararam números relativos a perdas de sedimento e água por erosão sob chuva natural estimados pelo modelo WEPP, com os números reais de perdas obtidos na área experimental. A região de estudo localiza-se em Campinas – SP e caracteriza-se pela existência de latossolo vermelho distroférico. As informações relativas à perda de água e sedimentos eram referentes ao período de coleta entre 1987 e 1995 realizados pelo Centro de Solos e Recursos Agroambientais do Instituto Agrônomo. Para obtenção de tais informações, foram separadas parcelas de 4 m por 25 m com declividade de 9%, e variados níveis de cobertura foram aplicados, sendo eles 0,18 % e 30 % de cobertura. Quanto à climatologia, a série de dados era relativa ao período de 1967 a 1997. Para validar estatisticamente o uso do modelo WEPP, comparou-se os números estimados e os obtidos em campo. Tal avaliação comparativa foi feita para valores médios anuais e mensais e incluiu teste “t”, análise de regressão e erros experimentais sistemáticos e não sistemáticos, o índice de concordância e erro médio absoluto. Os autores concluíram que apesar das dificuldades na definição dos dados de entrada, a modelagem fornecida pelo modelo WEPP teve aproximação satisfatória aos

valores medidos, embora não tenha caracterizado apropriadamente o efeito da cobertura do solo. No entanto, ressaltam que é preciso ajustes no uso da modelagem, especialmente em dados de condutividade hidráulica.

Amorim (2004) avaliou as perdas de solo e água em quatro porções experimentais sob condições de chuvas naturais em Viçosa – MG. O autor analisou como os modelos de estimativas de perdas de solo, como o WEPP, se comportavam para condições edafoclimáticas brasileiras. Para tanto, realizou-se uma análise da sensibilidade do WEPP aplicado em condições brasileiras, em especial, no solo do tipo cambissolo. Como obtenção de banco de dados, Amorim (2004) explica que utilizou dados de nove locais diferentes no Brasil visando englobar o máximo de heterogeneidade possível para condições climáticas. Para avaliação dos modelos no Brasil, foi considerado o tipo e textura de solo, comprimento e declividade das encostas, e uso e ocupação do solo. Amorim (2004) explica como os resultados obtidos pelos modelos foram comparados com os valores obtidos experimentalmente. Para análise da sensibilidade do WEPP, foram considerados 22 parâmetros de entrada. Como resultado, o autor cita que o modelo WEPP, entre todos os modelos analisados, foi o que forneceu melhor desempenho em relação aos desvios entre dados experimentais e estimados. O modelo mostrou-se altamente sensível aos dados de característica, uso e manejo do solo. De modo geral, o critério que se apresentou mais sensível no modelo foi a lâmina total precipitada.

Gonçalves (2008) avaliou perdas de água e solo em parcelas experimentais sob circunstâncias de chuva natural e comparou os valores dos quatro parâmetros de solo obtidos experimentalmente com os números fornecidos pela aplicação do modelo WEPP. Os parâmetros estudados foram erodibilidade do solo nos sulcos e entressulcos, tensão crítica de cisalhamento do solo e condutividade hidráulica efetiva. Com base na comparação entre os valores reais e estimados de perda de solo e água nas parcelas experimentais, Gonçalves (2008) validou o uso do modelo WEPP para as condições da área de estudo. Para tal, foram utilizadas seis parcelas de solo tipo cambissolo e argissolo manejadas de modo diferente e cobertas com culturas diferentes, como milho e soja, e monitoradas durante cinco safras agrícolas. O resultado do estudo permitiu ao pesquisador concluir que, para os mesmos parâmetros estimados pelo modelo, os resultados se diferenciavam de acordo com o tipo de solo. Para o cambissolo, o modelo WEPP forneceu valores maiores para a erodibilidade nos sulcos e entressulcos, ao ponto

que para tensão cisalhante crítica e condutividade hidráulica efetiva os valores foram subestimados. Já para o argissolo, a erodibilidade nos entressulcos e a tensão cisalhante crítica foi superestimada, enquanto que a erosibilidade no sulco e a condutividade hidráulica efetiva tiveram valores estimados menores que os obtidos em campo.

Cecílio et al. (2009) apresentam uma pesquisa cujo objetivo era comparação das medições de perda de água e solo em uma bacia experimental em Viçosa – MG e estimativas obtidas por modelos, como o WEPP. A bacia em estudo era completamente ocupada por pastagem com total cobertura de superfície. Essa unidade foi dividida em seis sub-bacias conforme particularidades de suas encostas. Cecílio et al. (2009) comentam que para modelagem do WEPP duas situações foram simuladas. Na condição A, a condutividade hidráulica do solo foi considerada igual à taxa de infiltração estável medida na bacia. Na condição B, a condutividade hidráulica foi calculada pelo WEPP de acordo com as características físicas e químicas do solo. Na condição A, houve melhor representatividade das condições tropicais presentes no território brasileiro, enquanto que a condição B foi uma situação padrão fornecida pelo modelo que representa características dos solos americanos. Em relação à perda de água, o modelo de predição apresentou valores próximos aos medidos para a condição A, enquanto que para a condição B a perda de água foi superestimada. No que diz respeito à perda de solo, na condição A, a estimativa foi nula, enquanto que para a condição B o modelo forneceu resultados maiores que os observados em campo. Os autores concluem o trabalho descrevendo que o uso do WEPP para condições brasileiras deve ser feito atentamente e com cuidado, devido aos cálculos internos do programa. Isso porque as diferenças entre os solos no Brasil e nos EUA influenciam muito nas equações utilizadas pelo WEPP, daí a necessidade de caracterização das condições climáticas e de solo no Brasil para aplicação do modelo de predição.

Paiva et al. (2009) utilizaram a bacia hidrográfica de São João do Cariri - PB para estudo de modelagem de escoamento superficial e erosão por meio do modelo WEPP. Os dados de monitoramento de escoamento e erosão observados em duas parcelas e três microbacias da bacia experimental referem-se ao período de 1999 a 2006. A bacia de estudo tem clima seco semi-árido com solos rasos, pouco porosos e plásticos, subsolo de embasamento cristalino, cobertura vegetal característica da caatinga e relevo levemente ondulado. O modelo foi calibrado para os parâmetros de saturação inicial do solo, erosão causada pelo fluxo superficial e nos sulcos, e

condutividade hidráulica saturada. E a calibração foi feita para os planos e para os canais em estudo. Os resultados permitiram aos autores concluir que nas parcelas experimentais, a simulação ajustou de forma adequada para o escoamento, porém não tão adequada para a produção de sedimentos. Já para as microbacias, os resultados para o escoamento foram razoáveis enquanto que a produção de sedimentos apresentou resultados muito diferentes dos observados. De maneira geral, os autores concluem que a modelagem realizada pelo modelo WEPP não teve precisão satisfatória para a bacia de São João de Cariri, principalmente quando os valores de produção de sedimentos estimados eram pequenos.

A pesquisa desenvolvida por Oliveira (2010) teve por finalidade analisar a adequação do modelo WEPP em duas encostas distintas de uma bacia hidrográfica na região de encostas basálticas em Arvorezinha – RS. A região caracteriza-se por clima subtropical úmido com verões quentes e invernos com geadas, e chuvas bem distribuídas no ano. O solo nas encostas é do tipo argissolo, sendo o cultivo de fumo a atividade predominante. Para aplicação do modelo, os parâmetros de entrada como erodibilidade do solo nos sulcos e entres-sulcos, tensão crítica de cisalhamento do solo e condutividade hidráulica saturada foram obtidos de duas maneiras. Uma delas foi experimental e a outra por equações do modelo WEPP. Importante salientar que o monitoramento da bacia de estudo teve duração de cinco anos e que o modelo foi utilizado sem calibração. Assim, tal análise considerou os parâmetros simulados em comparação com dados medidos no exutório da bacia na qual as vertentes estudadas faziam parte. Em relação ao escoamento, quando a modelagem foi feita utilizando dados de solo obtidos experimentalmente, os resultados simulados foram semelhantes aos valores medidos para as duas vertentes. Oliveira (2010) finaliza seu trabalho defendendo que o modelo WEPP pode ser aplicado para as características edafoclimáticas do sul do Brasil, especialmente quando os parâmetros usados no modelo são referentes às condições do local de estudo.

Na pesquisa de Oliveira e Cecílio (2011) não houve dados obtidos em campo para comparação com a simulação feita pelo modelo WEPP. Os autores simplesmente organizaram uma base de dados para a região de estudo e aplicaram no modelo de predição. Para análise de perda de água e solo por erosão, Oliveira e Cecílio (2011) caracterizaram climática e fisicamente uma microbacia localizada em Alegre – ES. Com os conhecimentos de clima, solo, uso do solo e topografia, criaram uma base de

dados utilizada no software GeoWEPP. A região estudada foi caracterizada como inverno seco e verão chuvoso, solo do tipo latossolo vermelho-amarelo e a cobertura vegetal bastante diversificada, com porções de pastagem com braquiária e do tipo arbustiva, eucalipto, cultivo florestal de nível secundário e floresta em nível primário de regeneração.

A partir do levantamento bibliográfico realizado sobre a aplicação do modelo WEPP, conclui-se que a aplicação do modelo WEPP no Brasil ainda é pouco difundida devido às limitações para as especificidades do meio físico brasileiro. Isso porque o modelo tem como base de dados às características dos Estados Unidos da América. Dessa forma, para utilização do modelo é necessária modificação e adaptação das configurações de simulação, o que é uma dificuldade dependendo da região do Brasil pela falta de dados do meio físico.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização e Acesso

A área de estudo localiza-se no sul do estado de Minas Gerais, no município de Nazareno, na mesorregião dos Campos das Vertentes. O município encontra-se nas coordenadas 21°13'S e 44°36'W e faz divisa com São João del Rei, Carrancas, Itutinga, Ibituruna, Bom Sucesso, São Tiago e Conceição da Barra de Minas (Figura 1) (SAMPAIO, 2014). Segundo o Censo de 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), o município de Nazareno tem cerca de 342 km² de área com população de 7.954 habitantes.

O acesso ao município de Nazareno (MG) se dá pelas rodovias federais BR-381 (Rodovia Fernão Dias) no sentido Três Corações a Lavras, pela BR-265 sentido São João del Rei, e pela rodovia estadual MG-332 na direção São Paulo a Belo Horizonte.

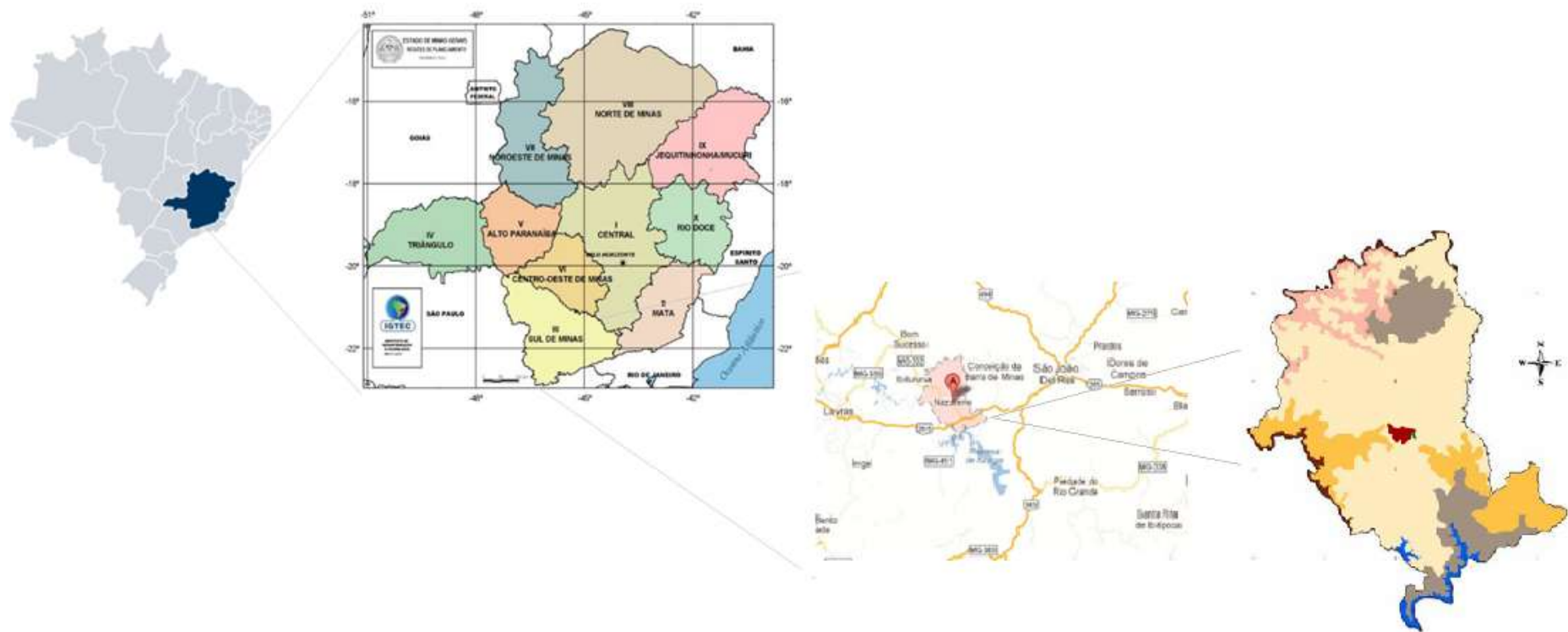


Figura 1: Localização do município de Nazareno (MG), com destaque para a voçoroca do Córrego do Cravo em verde no último mapa. Extraído de IGTEC, Google e Horta (2006).

O município de Nazareno é drenado pelos rios Grande e das Mortes, e pelos seus tributários, como o Córrego do Cravo. O município está inserido em duas bacias hidrográficas, do Alto Rio Grande e dos Rios das Mortes e Jacaré. A bacia do Alto Rio Grande tem área de drenagem de cerca de 9.000 km² com extensão de 240 km. A população é estimada em 360.000 habitantes, da qual fazem parte 33 municípios (IGAM, 2010a). A bacia do Rio das Mortes e Jacaré engloba 29 municípios com área de drenagem de aproximadamente 10.600 km² e extensão de 18.710 km. A população é estimada em 522.135 habitantes (IGAM, 2010b).

4.2 Clima

A região de Nazareno tem clima tropical de altitude sendo o verão quente e úmido e o inverno frio e seco, classificado como Cwa por Köppen (FERREIRA, 2005), com variação da temperatura média anual entre 18° e 19° C (HORTA, 2006).

Com relação à precipitação, a média anual varia entre 1.200 a 1.500 mm. (HORTA, 2006). No estado de Minas Gerais as chuvas têm variabilidade tanto na origem quanto na intensidade devido ao relevo montanhoso e atuação de diversas massas de ar. Devido as características do clima mineiro, com chuvas de alta intensidade e curta duração, especialmente nas regiões mais quentes do estado, e por efeitos orogenéticos regionais, a erosividade dos eventos chuvosos em Minas Gerais varia de valores médios a elevados (SAMPAIO, 2014).

4.3 Vegetação

Segundo Horta (2006) a região é composta, naturalmente, por dois tipos de vegetação, a Floresta Estacional Semidecidual e o Cerrado Tropical Semidecidual ou Savana.

A Floresta Estacional Semidecidual é considerada como uma vegetação primária constituída por espécies altas com poucos galhos. Essa formação é reduzida no município de Nazareno (MG), restando apenas algumas espécies arbóreas (HORTA, 2006).

Ainda segundo Horta (2006), a Savana ou Cerrado Tropical Semidecidual é constituída por espécies vegetais de diferentes alturas e com certo espaçamento (HORTA, 2006).

Em Nazareno, a vegetação nativa dominante é caracterizada pela transição entre Mata Atlântica e Cerrado Tropical Subcaducifólio. Essa vegetação nativa têm sido substituída pelo cultivo agrícola e pastagem. Em alguns locais de solo mais raso, na porção inferior das encostas há ocorrência de campo cerrado tropical, e na porção superior das serras com altitudes maiores que 1.000 m há campos rupestres (FERREIRA, 2005).

Horta (2006) identificou Campos Hidrófilos de Várzea, nos quais as espécies vegetais são condicionadas ao relevo e drenagem com predominância de gramíneas em áreas baixas e úmidas; Campos Secundários ou Pastagens os quais são formações resultantes da interferência antrópica que se instalaram após a destruição da vegetação anterior por queimada ou uso agrícola, caracterizando-se pela aparência de pradaria.

4.4 Geologia e Geomorfologia

No Planalto do Alto Rio Grande e Campo das Vertentes afloram rochas metassedimentares com presença de quartzitos e porções de rochas cristalinas (HORTA, 2006). O relevo é constituído de morros em serras alongadas, cortado por cristas de quartzito e com deformações tectônicas.

Essas formações são originadas de rochas sedimentares parcialmente metamorfizadas da Era Proterozóica, características do Cráton do São Francisco. A feição geológica do Cráton do São Francisco integra porções de granito-gnáisses das eras Arqueana e Paleoproterozóica, sucessões do tipo *Greenstone Belt* da era Arqueana, rochas metassedimentares da era Paleoproterozóica e também coberturas sedimentares da era Neoproterozóica (TEIXEIRA, ÁVILA e NUNES, 2008; SAMPAIO, 2014).

Na parte sul de Minas Gerais, o Cráton do São Francisco é bastante complexo em relação a sua geologia. Essa complexidade evidencia-se nos tipos litológicos presentes, que abrangem diversas texturas tais como xisto e rochas metassedimentares associadas à formação ferrífera, e também, uma porção de gnaisses, migmatitos e

granitos. Essa região é composta por rochas de sucessão vulcano-sedimentares e outros tipos adjacentes com parcelas descontínuas de granito-gnáissicos (SAMPAIO, 2014).

Nazareno localiza-se na porção sul do Cráton São Francisco que está inserido no Domínio dos Remanescentes das Cadeias Dobradas (conjunto de dobramentos em rochas proterozóicas modelados por superfícies de aplainamento antigas) (HORTA, 2006). No município de Nazareno, a origem Arqueana é evidenciada por rochas com inclusões de gnaisses e migmatitos em granitos foliados. Além disso, há afloramentos de rochas metavulcânicas como forma de cristas de xistos ou blocos maciços que estão semi-enterrados, e em algumas zonas de cisalhamento há porções de talco-xisto. Essas rochas apresentam padrões de foliação tectônica dos tipos clivagem, xistosidade de bandamentos gnáissicos, e aspectos como granulação fina com alta diversidade textural e mineralógica. Nas regiões em que não há afloramento, o solo resultante da alteração das rochas é de característica mais sedosa típica de talcos e quartzo sigmoidal, e de cor vermelho escuro (SAMPAIO, 2014; FERREIRA, 2005).

A voçoroca do Córrego do Cravo localiza-se na região de contato geológico entre o domínio das metavulcânicas do Greenstone Belt, caracterizado em Nazareno por uma porção metavulcano-sedimentar, e entre o embasamentos de granito, gnaisse e migmatitos. Nessa região, ao norte há uma falha vertical com composição de xisto e talco xisto, enquanto que na porção sul, os tipos geológicos característicos são granitos, gnaisses e migmatitos (OLIVEIRA, 2015). A Figura 2 exibe o mapa geológico do município de Nazareno (MG).

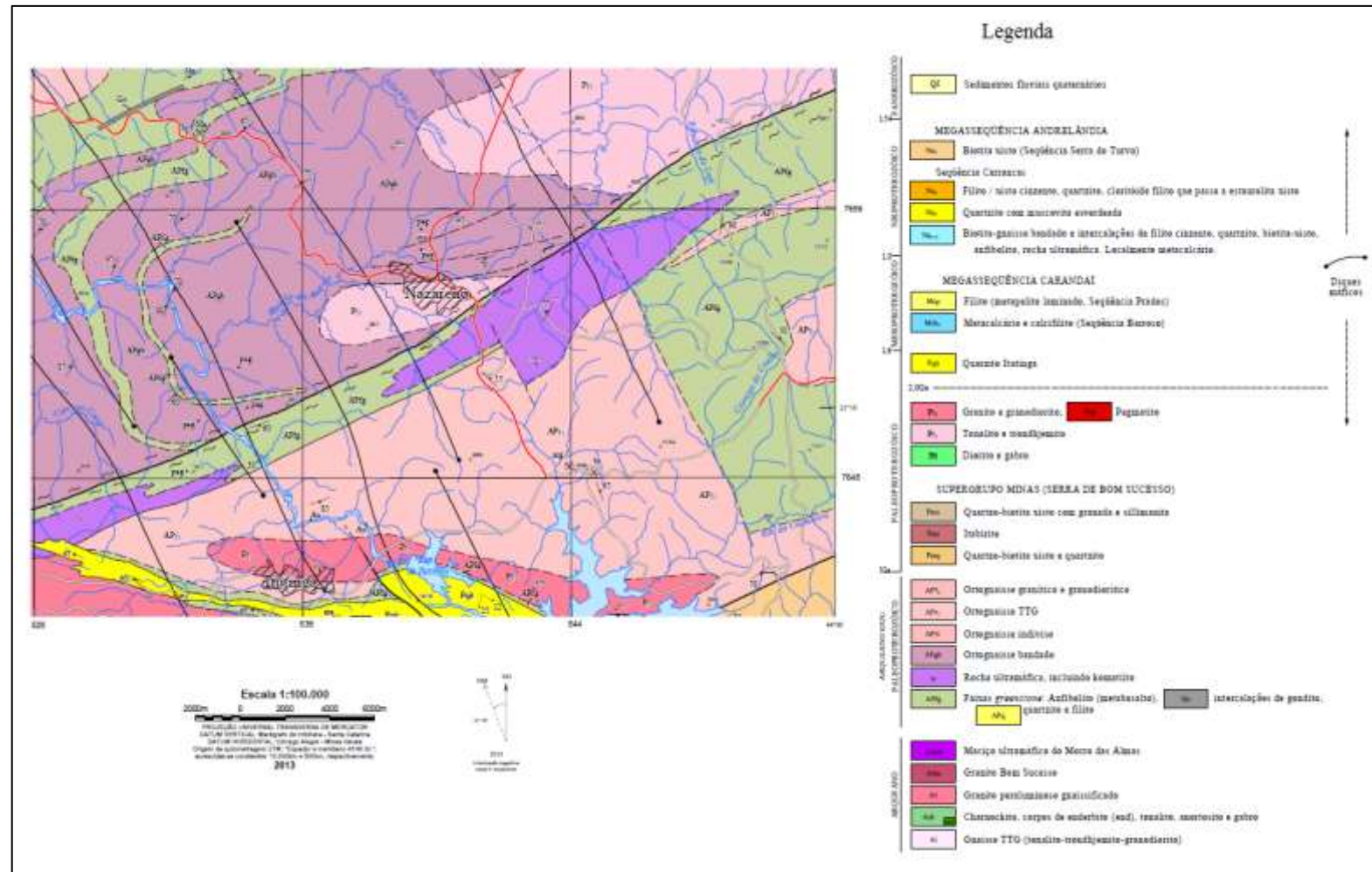


Figura 2: Geologia na região do município de Nazareno, MG. (Adaptado de CODEMIG, 2013).

O relevo da região dos Campos das Vertentes é caracterizado por colinas e morros de vertentes do tipo convexo-côncavas presentes nas altitudes de 400 a 1300 metros (SAMPAIO, 2014). Em relação à Nazareno, o relevo é resultado de alterações de rochas metassedimentares e de quartzito, com porções de rochas cristalinas do tipo gnaiss, e tem padrão homogêneo com colinas de topos convexos e tubulares, e encostas convexas misturadas com cristas alongadas com declividade variando entre 10 e 50%, entre as altitudes de 839 e 1140 metros. O sistema de drenagem é de média a alta densidade com feições hídricas de característica dendrítica (FERREIRA, 2005; HORTA, 2006).

A bacia do Córrego do Cravo localiza-se nas altitudes entre 900 a 1.000 metros, de modo que 7,56% da área da bacia tem declividade de 0 a 3%; em 22,56% da área a variação de declividade é de 3 a 8%; 56,48% encontra-se nos declives de 8 a 20%; 13,38% da área está compreendida entre 20 a 45% de declividade; e apenas 0,01% da área da bacia do Córrego do Cravo tem declividade superior a 45% (SAMPAIO, 2014).

4.5 Pedologia

No município de Nazareno, os tipos de solos presentes são Latossolos, Cambissolos, Gleissolos e Neossolos, sendo o Latossolo e o Cambissolo, os mais representativos em termos de presença, ocupando respectivamente 58% e 31% da área do município. (HORTA, 2006). Em regiões tropicais, os Latossolos caracterizam-se por desenvolverem horizonte B latossólico (Bw) profundo e bastante evoluído e lixiviado, com espessura mínima de 50 cm a profundidade de até 10 metros. A coloração característica é vermelha, podendo aparecer nas cores amarela ou marrom. Por serem homogêneos, esse tipo pedológico apresenta minerais primários bastante intemperizado com presença de argilominerais resistentes e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e relação entre silte e argila inferior a 0,7 (SAMPAIO, 2014; EMBRAPA, 2013). Os Latossolos são solos com agregados desenvolvidos e bastante estáveis, com pouca diferenciação entre os subhorizontes do horizonte Bw e de elevada porosidade aparente e permeabilidade. No entanto, embora tenham resistência aparente, à medida que a espessura dos horizontes A e B vai diminuindo, esses solos tornam-se altamente susceptíveis à erosão. São típicos de bioma de cerrado e são muito aproveitados para atividades de cultivo e pastagens (SAMPAIO, 2014; FERREIRA, 2005).

Em Nazareno, há a presença preponderante dos Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2013). Latossolos Vermelhos são originados do intemperismo de arenitos, calcários, gnaisses e outros materiais pré-intemperizados. No município, esse tipo pedológico é encontrado nas altitudes entre 925 e 990 metros, tanto nas áreas urbanas quanto no povoado do Palmital (FERREIRA, 2005; HORTA, 2006). Os Latossolos Vermelho-Amarelo estão presentes na maior parte do município especialmente em relevo suavemente ondulado com declividade entre 5 a 17% entre altitude de 870 e 1045 metros (SAMPAIO, 2014). São solos resultantes da alteração de gnaisses graníticos com presença de micaxistos, bastante intemperizados de textura argilosa com alto teor de areia fina, e bastante porosos. Caracterizam-se pela baixa fertilidade e média susceptibilidade à erosão, utilizado em Nazareno, principalmente, como áreas de pastagem (HORTA, 2006; FERREIRA, 2005; SAMPAIO, 2014).

Os Cambissolos presentes em regiões tropicais apresentam horizontes com muitas características das rochas de origem, horizonte B ainda incipiente e com propriedades que variam em relação às condições edafoclimáticas (EMBRAPA, 2013; HORTA, 2006). Na bacia do Alto Rio Grande esses solos são originados de alterações de micaxisto, quartzitos, cistos, biotita-xistos, xistos argiloso e migmatitos, com ocorrência de afloramentos de rocha com cascalhos de quartzo e micaxisto ao longo do talude. Em geral, apresentam menor espessura e coloração mais clara que os latossolos, com horizonte B incipiente e horizonte C mais profundo. Pela alta quantidade de silte e areia fina, há ocorrência de encrostamento, e por estarem relacionados a regiões de relevo ondulado a fortemente ondulado com declividade entre 11 e 40% nas altitudes de 915 a 1030 m, o escoamento superficial é intensificado. Além disso, esses solos são pobres quimicamente, apresentando textura média, baixa permeabilidade, dificultando o desenvolvimento de vegetação, o que contribui ainda mais para alta erodibilidade desse tipo litológico (FERREIRA, 2005; HORTA, 2006; SAMPAIO, 2014).

No município de Nazareno predominam os solos do tipo Cambissolo na região sul, Latossolo Vermelho na porção norte, e Latossolo Vermelho-Amarelo distribuído ao longo do município (HORTA et al., 2009). De maneira geral, na região, os solos são originados de alterações de xisto e granito gnaiss. Para latossolos e cambissolos, seu material de origem contém mineiras de granito gnaiss que produz um solo altamente susceptível à erosão. No entanto, para o latossolo vermelho, originado do intemperismo do xisto, a susceptibilidade à erosão é menor, além de ser um tipo litológico de elevada

fertilidade. Esse tipo de solo ocorre mais ao norte de Nazareno, é homogêneo e argiloso, bastante intemperizado e profundo, com horizontes A e B de profundidade maior que 1 metro. Já o Latossolo Vermelho-Amarelo é bastante intemperizado com textura mais argilosa de baixa fertilidade bastante susceptível à erosão. Na parte sul do Município há presença de cambissolo de textura mais siltosa argilosa com horizonte B raso. A elevada presença de silte provoca encrostamento do solo, reduzindo a infiltração e elevando a susceptibilidade à erosão. Em Nazareno, as voçorocas estão divididas em locais com cambissolo (47,7%), latossolo vermelho amarelo (31,6%) e latossolo vermelho (20,7%), de modo que a voçoroca do Córrego do Cravo localiza-se em solo do tipo Latossolo Vermelho Amarelo (FERREIRA et al., 2011; HORTA, 2006). A Figura 3 exibe os Latossolos e Cambissolos aflorantes na voçoroca do Córrego do Cravo.



Figura 3: Identificação de latossolo e cambissolo em um dos taludes da Voçoroca do Córrego do Cravo.

4.6 Uso e Ocupação

A ocupação da Bacia do Alto Rio Grande tem seus primórdios no período colonial, intensificado pela descoberta de metais e pedras preciosas com surgimento dos primeiros povoados por volta dos séculos XVII e XVIII (HORTA, 2006). A mineração foi a atividade econômica mais importante da região por anos, e o desmatamento da

mata Atlântica na busca pelo ouro resultou na instabilidade das encostas e consequentemente erosões com aparecimento de sulcos e voçorocas, assoreamento de corpos d'água e ocorrência de enchentes. Horta (2006) descreve que com o fim do Ciclo do Ouro, a população voltou suas atividades para fazendas agropecuárias, acompanhada pela introdução do cultivo do café em Minas Gerais por volta do século XIX. Dessa forma, a principal atividade econômica da região do Alto Rio Grande passou a ser a pecuária leiteira.

O modo de ocupação da bacia resultou na redução da cobertura natural primitiva, com recorrentes queimadas e práticas de pecuária extensiva, culminando em intensos processos erosivos na região que são potencializados pelas propriedades físicas e químicas do solo (HORTA, 2006).

Os usos principais do solo em Nazareno são agricultura e pastagem. Para a voçoroca do Córrego do Cravo, as atividades são cultivo do café, vegetação natural remanescente de cerrado, algumas estradas, área urbana e as porções de solo degradado (SAMPAIO, 2014) (Figuras 4 e 5). À montante da bacia, a presença da cultura do café e uma estrada de terra, concentram o fluxo de água para a voçoroca, o que intensifica o processo erosivo (Figura 4).



Figura 4: Área urbana de Nazareno e a voçoroca do Córrego do Cravo destacada em vermelho. (OLIVEIRA, 2015).

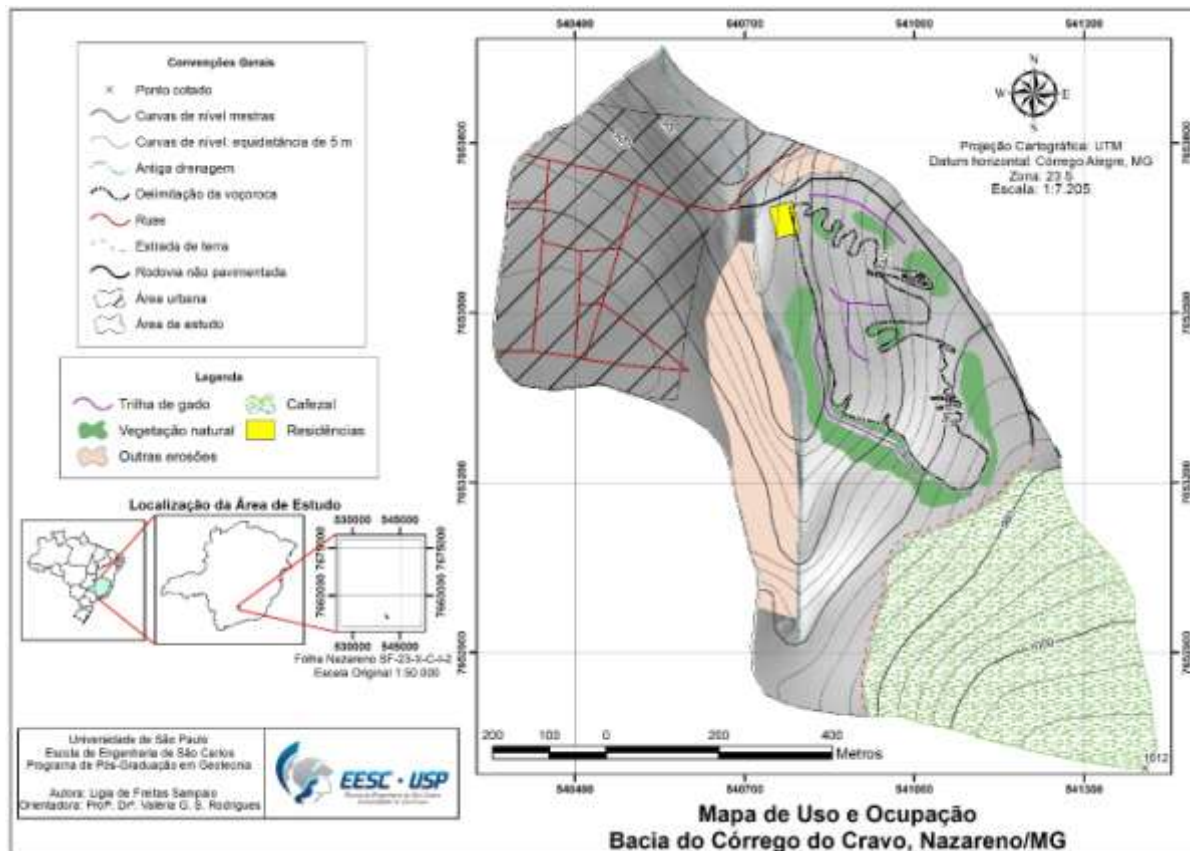


Figura 5: Mapa de Uso e Ocupação para a bacia do Córrego do Cravo. (SAMPAIO, 2014).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Levantamento de Dados

Os dados de clima, solo, uso e ocupação utilizados na simulação de perda de solo na bacia do Córrego do Cravo foram obtidos em Ferreira (2005), Sampaio (2014), Cassaro (2015) e Oliveira (2015).

5.2 ArcGis e GeoWepp

A Folha de Nazareno (SF-23-X-C-I-2), de 1975, escala 1:50.000, obtida do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) foi utilizada como base para a confecção dos mapas e extração de dados para simulação no WEPP. A partir do *software ArcGIS® (ArcMAP TM)*, a Folha SF-23-X-C-I-2 foi georreferenciada na Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000) e Zona 23 S.

Após o georreferenciamento, as curvas de nível da Folha de Nazareno, equidistanciadas em 20 metros, e os pontos cotados foram digitalizadas em formatos *shapefile*. Como o objetivo do estudo é a voçoroca do Córrego do Cravo, a bacia hidrográfica desse córrego foi delimitada com base nos mapas gerados no *ArcGIS* por Sampaio (2014). Além disso, os tipos de uso e ocupação na bacia do Córrego do Cravo (cafezal, pastagem, estrada, área urbana, vegetação natural e outras voçorocas), definidos por Sampaio (2014), também foram digitalizados em formato *shapefile*. Utilizando a ferramenta *Clip*, as curvas de nível e os pontos cotados foram recortados no formato da bacia do Córrego do Cravo, limitando assim a área de estudo.

Para simulação no modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) foi utilizado o *software GeoWEPP for ArcGIS 10.x*. A aplicação do modelo foi desenvolvida em duas etapas. A primeira considerou a bacia do Córrego do Cravo, sendo os dados referentes às características superficiais de cobertura do solo, já a segunda simulação considerou os taludes da bacia de forma que os perfis de alteração foram diferenciados e caracterizados, salientando-se que o modelo considera três vertentes: margem esquerda, margem direita e cabeceira.

O primeiro arquivo de entrada requerido pelo WEPP é o Modelo Digital de Elevação (MDE) em formato ASCII (.asc). Para isso, utilizando-se as curvas de nível e

os pontos cotados na bacia do Córrego do Cravo, gerou-se uma malha irregular no formato “*triangular irregular network*” (TIN) pela ferramenta Create TIN na pasta 3D Analyst em ArcToolbox. O arquivo TIN foi convertido para o formato *raster* originando o modelo de elevação digital por meio da função Conversion from Tin to Raster, também localizada em ArcToolbox 3D Analyst. Por fim, pela ferramenta ArcToolbox, Conversion Tools, From Raster, to ASCII, o arquivo MDE em *raster* foi salvo no formato texto em codificação ASCII (.asc).

A etapa seguinte foi referente à organização dos dados de uso e ocupação do solo. O arquivo *shapefile* referente aos tipos de uso e ocupação foi transformado em *raster* através da sequência ArcToolbox, Conversion Tools, To Raster e Feature to Raster. O arquivo *raster* gerado foi salvo em formato ASCII pela ferramenta From Raster to ASCII. A tabela de atributos do *raster* de uso e ocupação foi salva em formato texto (.txt) para ser operado como uma ponte na leitura das classes de uso do solo entre o ArcGis e o GeoWepp. Esse arquivo relacionou o número de identificação da classe de uso e ocupação (value) com o nome da classe correspondente.

Para criação dos arquivos que foi lido no modelo WEPP, um arquivo exemplo de uso e ocupação formato (.ROT), do banco de dados do modelo WEPP, foi editado com os nomes das classes de ocupação da bacia de estudo. No entanto, os parâmetros específicos de cada tipo de cobertura do solo, como profundidade de raízes, taxa de crescimento da cultura, taxa de biomassa remanescente no solo, entre outros, foram mantidos conforme a base de dados do modelo. Quanto à pastagem, as características estipuladas foram cobertura de grama baixa com criação de gado. Para a ocupação urbana, as condições foram de superfície coberta com pavimento. Em relação à vegetação, as características escolhidas foram de resquícios de vegetação arbórea e arbustiva natural com grande perturbação. Para a estrada, os parâmetros foram escolhidos como caminho que é perpendicular às curvas de nível (SAMPAIO, 2014) e sem crescimento de vegetação. Sobre o uso voçoroca, foi considerada a formação de trilha de arraste com baixa cobertura de vegetação rasteira (< 20%) e remoção turbulenta de resíduos. Por fim, o cafezal foi a classe de uso com maior suposições e considerações porque a cultura do café não consta no banco de dados do modelo, nem qualquer outra forma de cultivo similar. De acordo com a Embrapa Café, essa cultura é perene com sistema radicular desenvolvido, e no Brasil, é cultivada com gramíneas para melhor cobertura do solo. Dessa forma, o arquivo criado para essa classe de cobertura

do solo foi composto por características gerais de campo cultivado em ruas ou fileiras, combinado com vegetação arbórea arbustiva perene e cultivo de uva, devido à similaridades em relação à cultura perene e sistema radicular desenvolvido.

Para identificação dos tipos de solo, foram utilizados os trabalhos de Horta (2006) e Oliveira (2015), que mostram que a bacia da voçoroca do Cravo localiza-se na região de latossolo vermelho-amarelo, como indicado na Figura 6. Com isso, foi criado um *shapefile* para o solo, considerando o latossolo vermelho amarelo definido por Horta (2006) como o latossolo descrito por Sampaio (2014), e área urbana da bacia considerada como solo pavimentado. Esse arquivo formato *shapefile* foi transformado em *raster* por meio da ferramenta Feature to Raster, localizada em ArcToolbox, Conversion Tools e To Raster. O arquivo *raster* gerado foi salvo em formato ASCII pela ferramenta From Raster to ASCII. Assim como nos procedimentos de uso e ocupação, a tabela de atributos do *raster* de solos foi salva em formato texto (.txt) para vincular a leitura das classes de solo entre o ArcGis e o GeoWepp. Para a simulação em bacia hidrográfica, foi considerada apenas a camada superficial de cobertura do solo. Para os taludes, considerou-se as diferenciações em horizontes, correspondendo a latossolos e cambissolos.

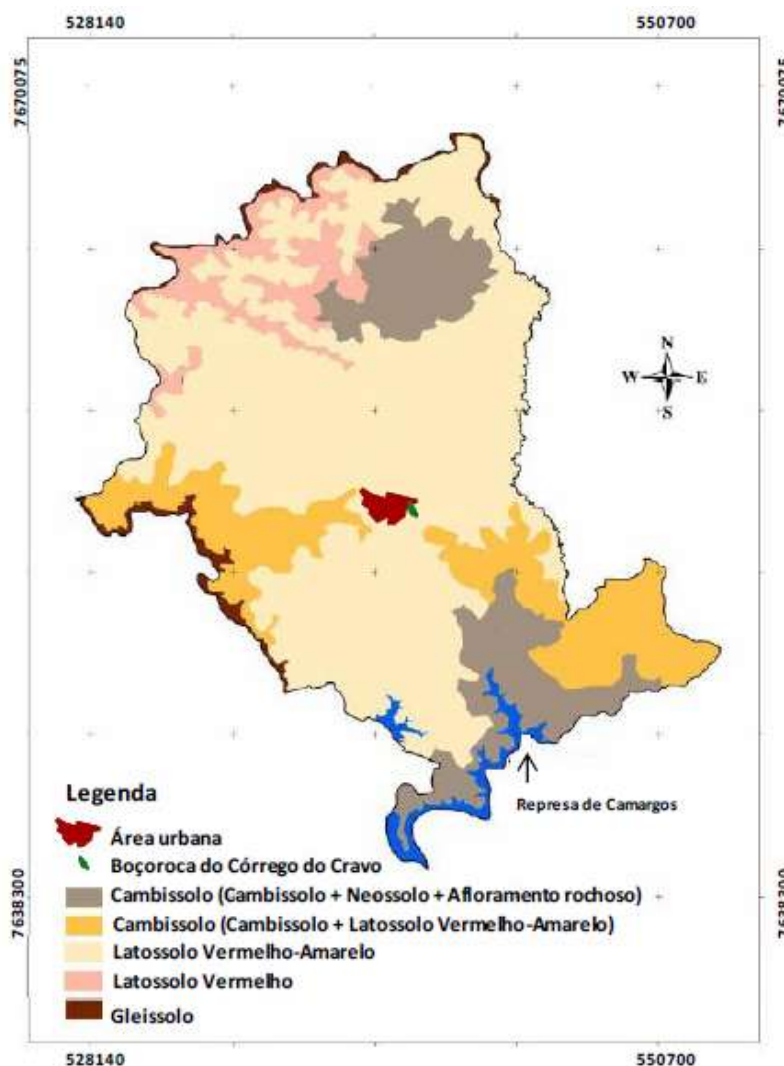


Figura 6: Mapa de solos do município de Nazareno-MG adaptado de Horta (2006). (OLIVEIRA, 2015).

Assim, da mesma forma como feito para os arquivos de uso e ocupação, um arquivo exemplo formato (.SOL) do banco de dados foi editado no WEPP Model for Windows para criação dos dados relativos aos tipos de solo da Bacia do Córrego do Cravo. O arquivo de solo exemplo foi escolhido conforme o triângulo textural de solos (ELLIOT et al, 1989) (Figura 7), sendo que essa escolha foi realizada levando em consideração os tipos de solos da área de estudo. Devido à falta de informações, para diversos parâmetros de entrada, optou-se pela estimativa fornecida pelo modelo de predição, necessitando que a escolha do solo modelo para ser editado levasse ao exemplar características do solo da área de estudo.

Os parâmetros de entrada básicos no arquivo de solo para o modelo WEPP são textura, número de horizontes, albedo, saturação inicial ($m.m^{-1}$), erodibilidade

entressulcos (kg.s.m^{-2}), erodibilidade nos sulcos (s.m^{-1}), fator crítico de cisalhamento (N.m^{-2}), condutividade hidráulica (mm.h^{-1}), porcentagem de areia, argila, matéria orgânica e pedras (%), e capacidade de troca catiônica (meq.100g^{-1}).

Para a etapa de simulação em nível de bacia hidrográfica, os dados de solos utilizados foram obtidos em Sampaio (2014) e Cassaro (2015). Para a simulação em nível de taludes, utilizou-se os dados obtidos por Oliveira (2015), sendo que em alguns casos, esses dados foram complementados com o trabalho de Sampaio (2014). Com a distribuição granulométrica do latossolo na bacia, foi possível localizar no triângulo textural uma área agrícola com erosão para o tipo de solo mais coincidente com o latossolo de Nazareno. Em seguida, o número de localização obtido pelo triângulo foi encontrado no mapa de localização das erosões em áreas agrícolas da base de dados do WEPP (Figura 8), e pelo estado americano, foi possível obter um solo modelo no banco de dados do modelo (Figura 9).

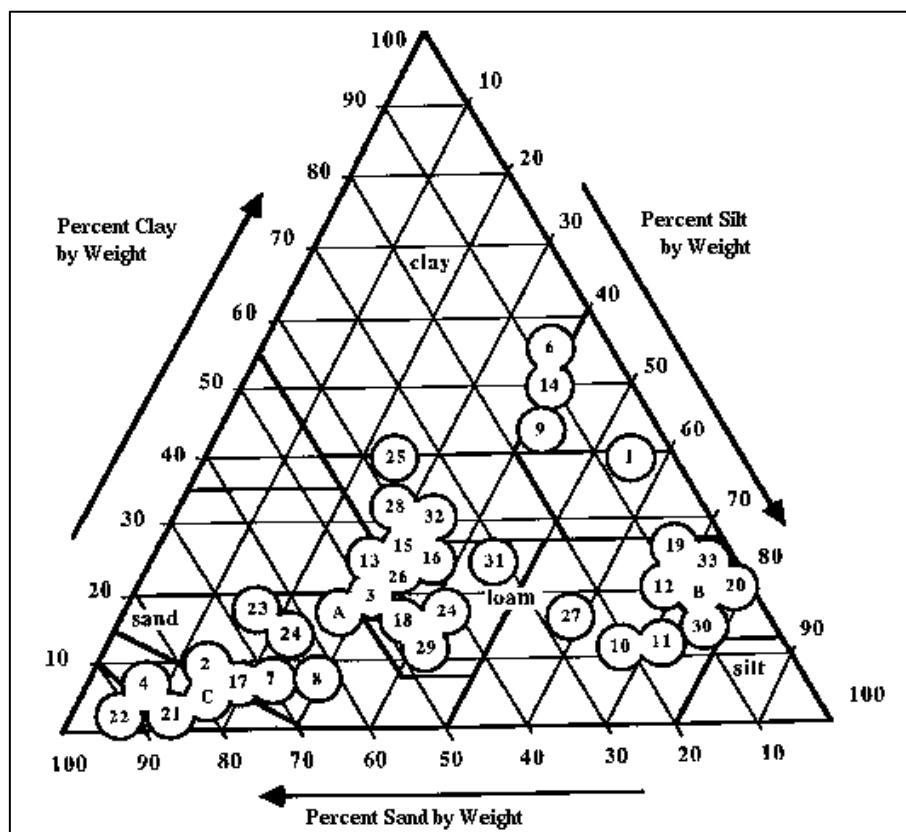


Figura 7: Triângulo textural de solos com localização de áreas agrícolas com erosão na base de dados do WEPP. (ELLIOT et al., 1989).

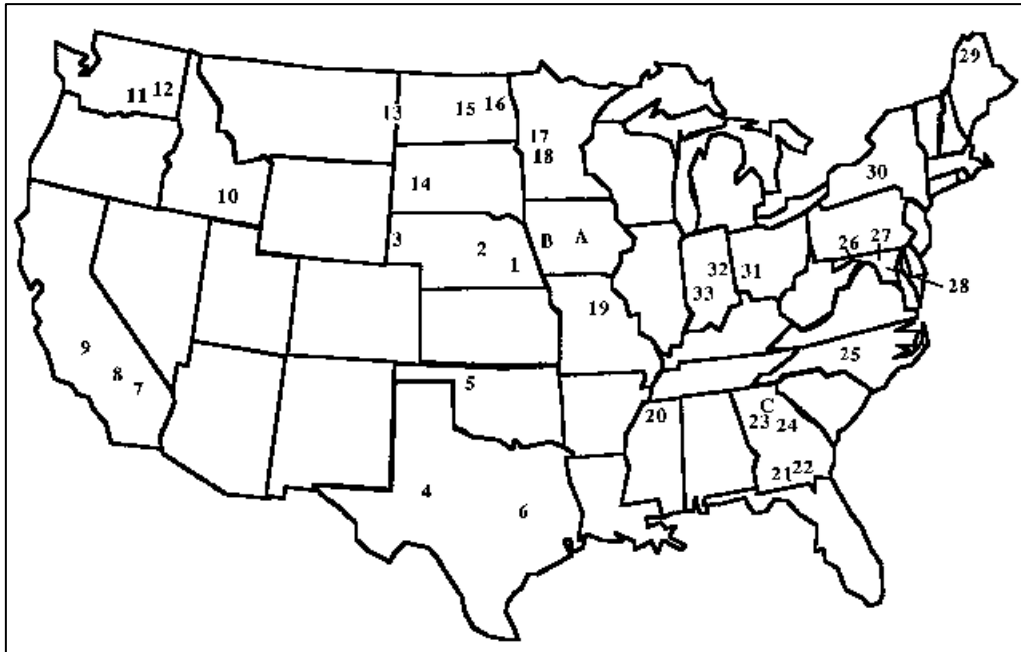


Figura 8: Localização das erosões em áreas agrícolas da base de dados do WEPP. (ELLIOT et al., 1989).

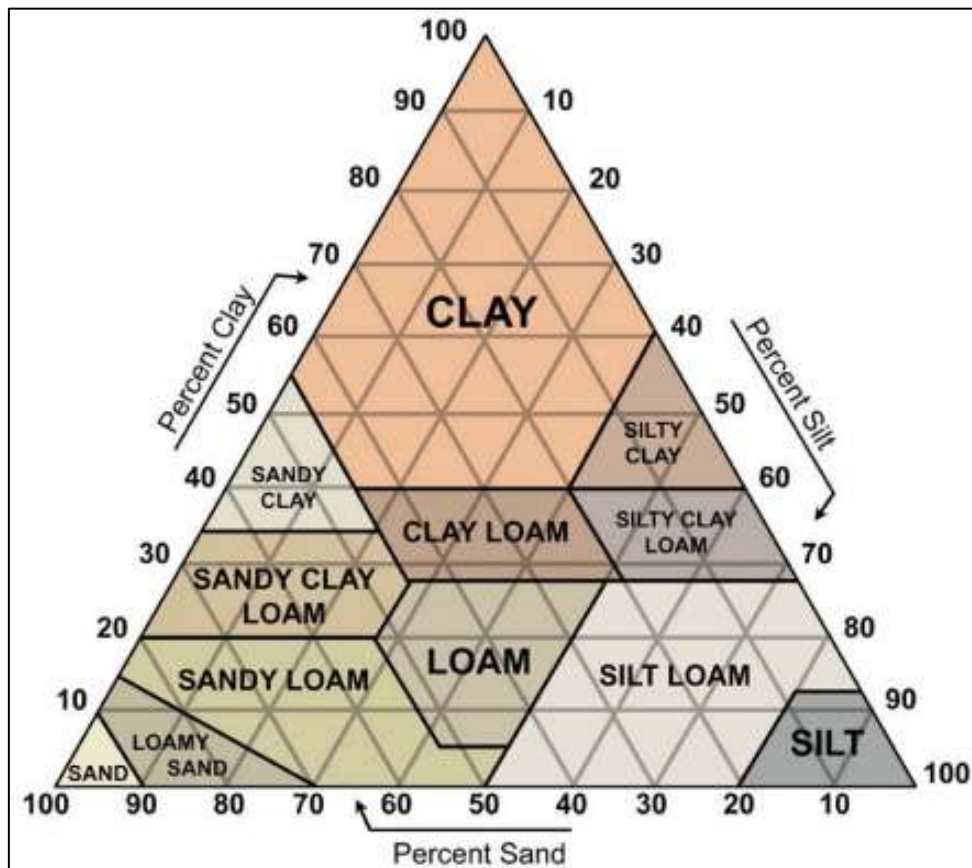


Figura 9: Triângulo de textura dos solos. (Agricultural Research Council, 2009).

Com o arquivo modelo escolhido, este foi alterado para as características de simulação em nível de bacia hidrográfica, e para os taludes. Para os parâmetros de erodibilidade nos sulcos e entressulcos, fator crítico de cisalhamento, condutividade hidráulica efetiva, e saturação inicial do solo, optou-se pela estimativa fornecida pelo modelo de predição.

Para determinação do Albedo considerou-se os dados fornecidos por Reichardt e Timm, (2004) (Tabela 1). Albedo é o poder refletor de uma superfície, caracterizado pela fração de energia solar que é refletida pela superfície em relação à energia recebida, e seu valor varia de acordo com o tipo de superfície.

Tabela 1: Albedo médio para radiação solar de algumas superfícies. Fonte: Reichardt e Timm (2004).

Material	Albedo
Pedras	0,15-0,25
Solo cultivado	0,07-0,14
Florestas	0,06-0,20
Areia clara	0,25-0,45
Cultura	0,12-0,25

Em seguida, foi criado o perfil de declividade para a bacia. As medições de comprimento foram feitas em ArcMap, e os valores de declividade foram obtidos dos trabalhos de Oliveira (2015), Sampaio (2014) e Ferreira (2005).

Na simulação por taludes, cada perfil foi considerado com um tipo de uso e ocupação e uma declividade específica. Para o talude do lado direito, assumiu-se algumas características do talude obtidas no trabalho de Oliveira (2015), tais como perfil côncavo, altura do talude de 23 metros, ângulo de declividade de 62° ou 188 %, horizonte superficial de latossolo e horizonte mais profundo de cambissolo. Para o topo do talude, foi considerada a altura de 5 metros com inclinação de 12,6 % (obtidas em Ferreira, 2005). E para a base do talude considerou-se declividade de 8% obtida em Sampaio (2014). Pelo ArcMap, na ferramenta de mensuração foi possível medir os comprimentos do nível d'água afluente, a região de cabeceira e a largura da bacia. Com esses valores foi possível calcular o comprimento de rampa e a distância horizontal da encosta por trigonometria, e assim determinar o perfil do talude.

Como o valor que se tinha era referente ao comprimento horizontal da rampa do talude, a parte do topo e da base foram calculados pela diferença entre a largura total da bacia medida no ArcMap e as larguras dos taludes obtidas dos trabalhos base ou calculadas pelo ângulo de inclinação, de modo que essa diferença foi separada entre 20 % para o topo e 80 % para a base.

Da mesma forma que para o talude direito da voçoroca, o mesmo procedimento foi feito para o talude esquerdo e para a cabeceira. Todos os taludes foram considerados côncavos.

Para a criação do arquivo de clima, a interface WEPP for Windows através do gerador de clima CLIGEN, tem cerca de 2.600 parâmetros climáticos dos Estados Unidos da América que são utilizados para criação de novos arquivos. Para localidades fora dos Estados Unidos, esses parâmetros têm de ser desenvolvidos pela criação de arquivos com dados observados. Os dados climáticos de precipitação, temperaturas máxima e mínima foram obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A série histórica retirada do *website* <http://www.inmet.gov.br/> foi referente à estação do município de Lavras e continha dados mensais dos anos de 2000 a 2012.

Com os dados obtidos no BDMEP, um arquivo de texto (.txt) foi gerado de modo que cada coluna era referente a uma informação, sendo elas ano, mês, dia, precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima. O arquivo de entrada requerido no WEPP for Windows para o gerador de clima deve estar no formato (.gds). Para transformar o arquivo texto no formato (.gds), o WEPP for Windows foi utilizado por meio da ferramenta *Text to GDS convertor*, localizada na aba Tools. O próximo passo foi transformar o arquivo (.gds) em formato (.PAR) para que este possa ser lido no GeoWEPP. Dessa forma, através da sequência Tools, Add Climate Location, o arquivo de clima (.PAR) foi criado pelo gerador CLIGEN versão 5.x. Os demais parâmetros de clima necessários à simulação no GeoWEPP foram estimados estatisticamente pelo programa por meio dos dados fornecidos da estação de Lavras.

Numa primeira simulação o modelo considera como valor de perda de solo natural 1 ton/ano (T-value), porém há possibilidade de alterar tal valor a partir da segunda simulação. Assim, para os resultados apresentados no presente trabalho,

considerou-se os valor de perda aceitável de solo segundo o trabalho de Giarola (1994) (Tabela 2).

Tabela 2: Estimativa de perdas de solo e tolerância de perdas, em função dos atributos de cada classe de solo nas regiões de influência do reservatório de Itutinga, MG. Fonte: Giarola (1994).

Classe ¹ de solo	Gibbsita ² (%)	Permeabilidade (mm/h)	Relevo ³	Índice K	Perdas (t/ha/ano)	Tolerância (t/ha/ano)
LEdr*g.	44	190	SO	0,027	72	13,4
LE/LRdr*g.	65	190	SO	0,014	31	11,7
LEdr*p.	51	80	SO	0,028	39	12,8
LVdr.g.	21	42	O	0,031	116	11,9
LUdr.p.	56	57	SO	0,034	36	12,6
Cam.rs.p.	21	28	O	0,045	239	6,7
Cam.pp.g.	23	11	O	0,051	126	8,4
Cam.rs.g.p.	16	11	FO	0,051	593	6,0
Cdr.pp.g.	33	71	O	0,039	145	8,8
Cdr*pp.p.	17	44	O	0,055	252	4,8
Ram.c.p.	4	33	FO	0,077	449	1,7

1. d = distrófico; a = álico; r.= argilosa; r* = muito argilosa; m.= média; rs.= raso; pp.= pouco profundo; c.= cascalhenta; g.= gnaíse-granítico; p.= rochas pelíticas pobres.
2. calculada na fração argila.
3. O = ondulado; SO = suave ondulado; FO = forte ondulado.

Pela ferramenta *Define CSA and MSCL to delineate stream* criou-se a rede de drenagem para os valores de 25 hectares e comprimento mínimo de canal hídrico de 100 metros. Em seguida, pela ferramenta *Specify the outlet point of watershed* criou-se as sub-bacias do Córrego do Cravo. Por fim, o arquivo de clima necessário para simulação de perda de solo foi adicionado pela ferramenta *PRISM*, e o arquivo com dados climáticos de Lavras foi selecionado. Considerando o latossolo vermelho e cambissolo de granito-gnaíse no trabalho de Giarola (1994), o valor de tolerância encontrado por média ponderada pela profundidade dos horizontes de cada tipo de solo foi de 9,4 t/ha.ano. Com a simulação feita em nível de bacia e para os taludes, os resultados foram discutidos e comparados com o trabalho de Giarola (1994).

Importante destacar que dependendo do tipo de simulação, se bacia ou talude, os dados de entrada variam. Para a declividade da área a ser estudada, por exemplo, na simulação a nível de bacia, é utilizado o modelo digital de elevação. Já para a simulação por taludes, o arquivo de entrada corresponde à porcentagem de inclinação e comprimento da rampa. Para o uso e ocupação, em nível de bacia, é possível diferenciar os diversos usos pelas ferramentas em SIG, enquanto que para os taludes considera-se apenas um uso por encosta. Assim como para uso e ocupação, os tipos de solo seguem a mesma lógica de diferenciação para a bacia, e tipo único para talude. Apesar do tipo de solo e uso e ocupação serem únicos na simulação das encostas, é

possível diferenciar os horizontes, por profundidade, granulometria e matéria orgânica. Em relação ao arquivo de clima, este é o mesmo para ambas as simulações.

Na tabela 5 abaixo, estão indicados, resumidamente, os parâmetros de entrada utilizados nas simulações, bem como suas características de fonte e formato de arquivo.

Tabela 5: Resumo das características dos parâmetros utilizados para simulação no WEPP.

Atributos	Parâmetros	Fonte de Dados	Formato de entrada do arquivo
Declividade	Modelo Digital de Elevação (MDE)	Gerado em SIG	ASCII (.asc)
Uso e Ocupação	Cobertura do solo	Sampaio (2014) e Embrapa Café	ASCII (.asc)
	Características de cada tipo de cobertura	Estimado pelo modelo	.ROT
Solo	Tipo	Sampaio (2014)	ASCII (.asc)
	Textura	Sampaio (2014) e Cassaro (2015)	.SOL
	Número de horizontes	Sampaio (2014) e Oliveira (2015)	.SOL
	Profundidade dos horizontes	Calculado por proporção com base em Ferreira (2005)	.SOL
	Albedo	Reichardt e Timm, (2004)	.SOL
	Saturação inicial	Estimado pelo modelo	.SOL
	Erodibilidade nos entressulcos	Estimado pelo modelo	.SOL
	Erodibilidade nos sulcos	Estimado pelo modelo	.SOL
	Fator crítico de cisalhamento	Estimado pelo modelo	.SOL
	Condutividade hidráulica	Estimado pelo modelo	.SOL
	Granulometria	Sampaio (2014) e Cassaro (2015)	.SOL
	Matéria orgânica	Sampaio (2014) e Cassaro (2015)	.SOL
	Capacidade de troca Catiônica	Sampaio (2014) e Cassaro (2015)	.SOL
Relevo	Declividade	Oliveira (2015) e Sampaio (2014)	-
	Formato da encosta	Oliveira (2015) e Sampaio (2014)	-
	Comprimento da encosta	Calculado por medição em SIG e com base em Sampaio (2014) e Oliveira (2015)	-
Clima	Precipitação	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)	.txt
	Temperatura Máxima	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)	.txt
	Temperatura Mínima	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)	.txt

6. RESULTADOS ANTERIORES

A região de Nazareno foi objeto de estudo para alguns trabalhos científicos e projetos práticos que objetivaram a compreensão das causas e consequências dos processos erosivos, bem como a proposição de alternativas para solucionar os problemas envolvidos na degradação ambiental. Entre esses trabalhos, destacam-se as produções de Ferreira (2005), Horta (2006), Ferreira e Ferreira (2009), Loschi et al. (2014), Pereira et al. (2014), Sampaio (2014), Cassaro (2015) e Oliveira (2015).

Ferreira (2005) realizou um levantamento das voçorocas na região do município de Nazareno, sendo uma delas a voçoroca do Córrego do Cravo. Nessa feição erosiva, dois perfis foram estudados, um com profundidade de horizontes A e B de 1 metro com latossolo vermelho com textura muito argilosa, e outro com profundidade de 90 centímetros com latossolo vermelho amarelo de textura argilosa. Ferreira (2005) realizou análises dos atributos físicos (distribuição granulométrica, diâmetro médio, espessura de horizontes, cor), químicos (material de origem, pH, carbono orgânico total, concentração de elementos químicos) e geométricos dos solos para cada uma das voçorocas delimitadas. Além disso, o autor caracterizou as bacias de contribuição de cada uma das voçorocas por meio de estudos de posição das encostas, declividade, densidade de drenagem, pedregosidade, uso agrícola, classe de erosão, nível tecnológicos das propriedades e nível de estabilização das voçorocas. De maneira geral, Ferreira (2005) concluiu que os latossolos ocorrem em relevo suave ondulado com declividade entre 7,3 % a 15,1 %, e nas encostas com os maiores comprimentos de rampa. Essa característica aumenta a velocidade do escoamento superficial na parte média e inferior das voçorocas. Além disso, nesse tipo de solo, os usos predominantes correspondem ao plantio de café e pastagem plantada com *Brachiaria sp.*, e poucas áreas de pastagem nativa, sem medidas conservacionistas.

Para Ferreira (2005), o cambissolo foi considerado o solo mais instável e susceptível à erosão uma vez que se encontra em relevo movimentado com alta declividade, além de características favoráveis ao desenvolvimento de erosões como pequena espessura dos horizontes A e B, pedregosidade na superfície e ao longo do perfil, e elevados teores de silte e areia fina. Além disso, a baixa fertilidade natural

desses solos não permite desenvolvimento de cobertura vegetal expressiva, contribuindo ainda mais para exposição do solo e desenvolvimento de processos erosivos. Para os cambissolos, os usos identificados foram principalmente pastagens nativas e de *Brachiaria sp.* Nessa caracterização, Ferreira (2005) identificou fatores antrópicos que estão ligados às erosões. A possível origem da voçoroca do Córrego do Cravo corresponde à mineração de ouro e presença de estrada antiga. Quanto aos impactos, cita a presença de gado, lixo e resíduos de matadouro, queimadas, enxurradas, agricultura e infra-estrutura civil. Para os usos do solo, nas bordas estão presentes pastagem com gado, cafezal, e estrada. Quanto ao controle do processo de erosão, na voçoroca do Córrego do Cravo, já foram estabelecidas práticas de controle de água, plantio, paliçadas e isolamento.

Ferreira (2005), conclui que dentre as 57 voçorocas identificadas, os principais solos com presença de voçorocas foram os latossolos vermelho e vermelho amarelo e cambissolos, que correspondem a solos de baixa fertilidade natural e características físicas favoráveis à ocorrência de erosões. O autor comenta ainda, que para as mesmas condições, os cambissolos são os mais susceptíveis aos processos erosivos. Os cambissolos ocorrem em relevo movimentado com alta declividade, drenagem lenta, presença de pedregosidade e menos cobertura vegetal, o que contribui para sua maior atuação na questão da erodibilidade quando comparado com o latossolo. De modo geral, Ferreira (2005) identificou que os impactos provocados pelas voçorocas estão associados ao assoreamento de corpos d'água, redução de áreas agrícolas e riscos à população dos que vivem nas bordas destas feições erosivas.

Horta (2006) realizou o levantamento dos solos de Nazareno. Foram produzidos mapas de reconhecimento de média intensidade na escala 1:10.000 e modelos representativos da ocupação no município. Os resultados evidenciaram os seguintes tipos pedológicos, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (LVAd) presente em 58% da área de Nazareno, Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico (CXbd) presente em 31% da área, Latossolo Vermelho Distrófico húmico e típico (LVdf) presente em 7% da área, e Gleissolo Háptico Tb distrófico (GXbd) identificado em apenas 2% da área do município. Além disso, para cada classe de solo encontrada no município, a autora especificou diversos atributos físicos e químicos. Pelo mapa de solos elaborado por Horta (2006), é possível constatar que o Córrego do Cravo localiza-se na área com presença de latossolo vermelho-amarelo (Figura 10).

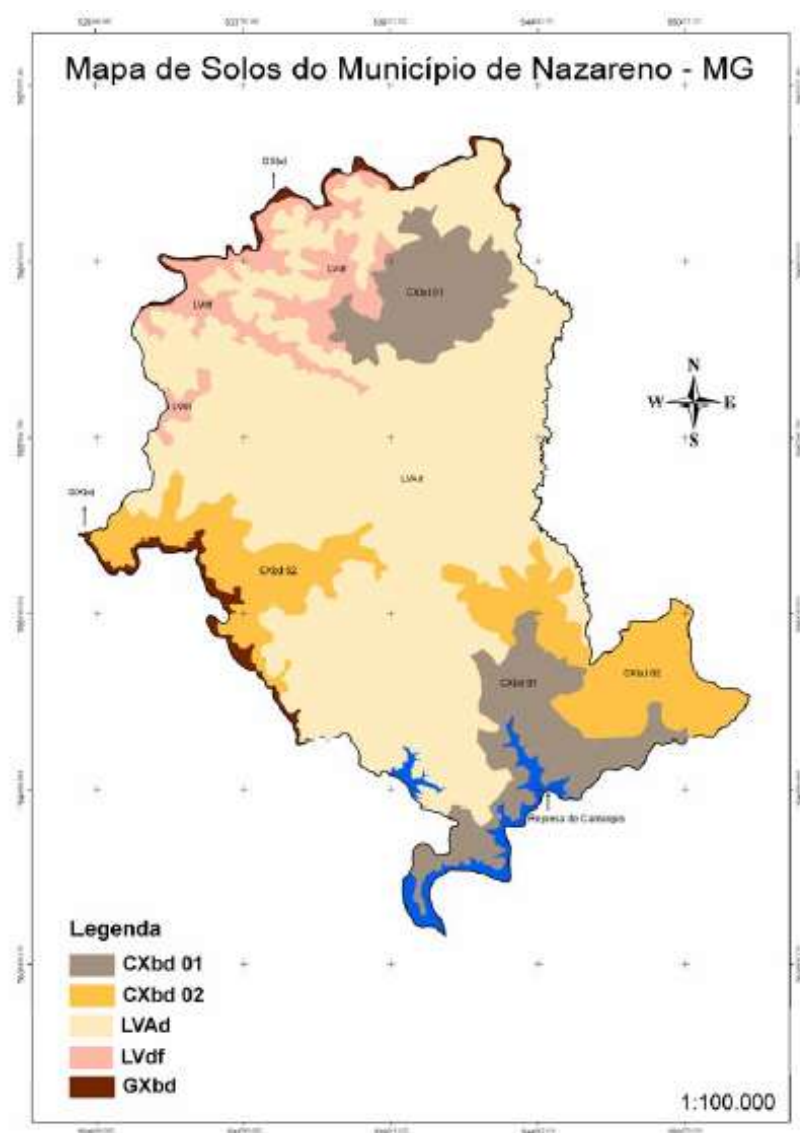


Figura 10: Mapa de solos de Nazareno. Fonte: Horta (2006).

Quanto à ocupação do solo, os resultados foram divididos entre as ocupações no verão e no inverno. Para o verão, a Vegetação Arbustiva representou 40,7% de ocupação da área, seguida de Pastagens e Campos Naturais (26,3%), Vegetação Arbórea (12%), Solo Exposto (11,6%), Culturas (7%), Água (1,7%) e Área Urbana (0,5%). Para o inverno, os resultados foram ocupação de 38,4% da área municipal por Pastagem e Campos Naturais, 25,5% de Vegetação Arbustiva, 16% de Solo Exposto, 14,3% de Vegetação Arbórea, 2,5% de Culturas, 2,1% de Água e por fim, 1% de Área Urbana (HORTA, 2006) (Figuras 11 e 12).

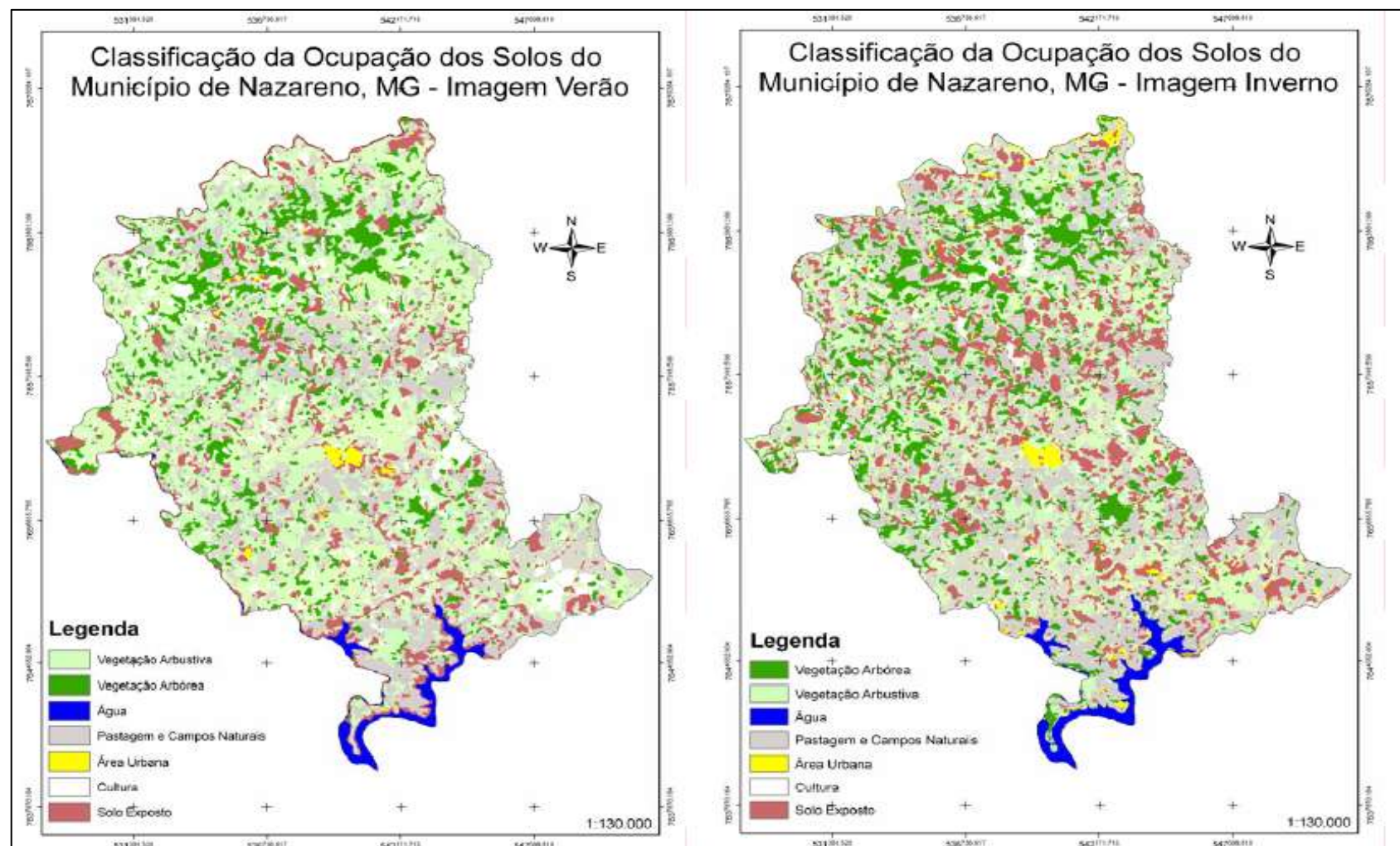


Figura 11: Mapas de classificação dos usos do solo em Nazareno. Fonte: Horta (2006).

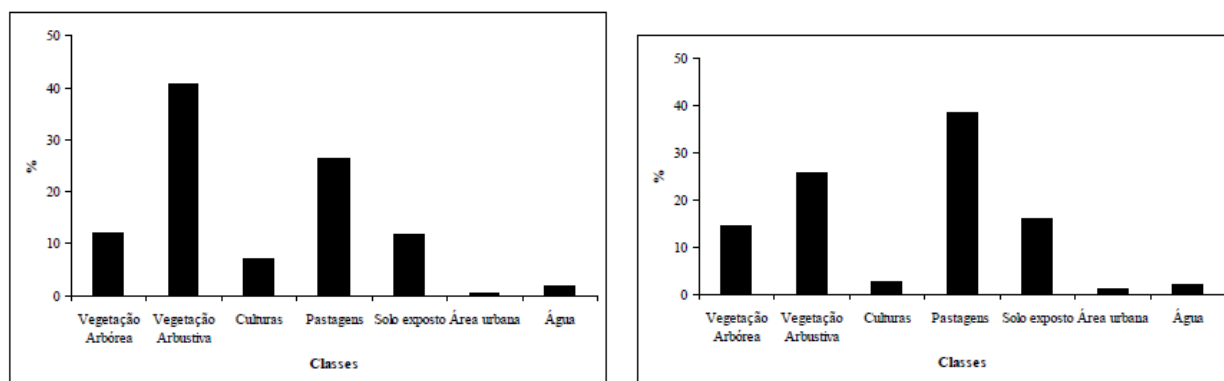


Figura 12: Representação gráfica das classes de ocupação do solo para o verão e inverno, respectivamente. Fonte: Horta (2006).

Ferreira e Ferreira (2009) desenvolveram um estudo das voçorocas da região de Nazareno com diagnóstico da situação do município e com propostas de recuperação, com ênfase na voçoroca do Córrego do Cravo. Basicamente, esse estudo consistiu nas propostas de proteção da área da voçoroca por meio de isolamento, associado a medidas de controle e disciplinamento da água e estruturas de contenção das encostas. Para estabilidade parcial da voçoroca, Ferreira e Ferreira (2009) propuseram controle da água sub e superficial utilizando obras de captação das águas das bordas laterais e da cabeceira por bocas de lobo e desvios por valetas e canais de escoamento, bacias circulares de captação para armazenamento da água da chuva e condução para infiltração, e drenagem das águas subsuperficiais. Em relação às encostas, para as áreas mais críticas foi proposto retaludamento com revegetação de espécies nativas. Por fim, os autores consideraram que para estabilidade final das feições e ainda sustentabilidade do projeto, seria implantada cobertura vegetal na área de contribuição da voçoroca ocupando 5 metros de faixa de plantio com espécies arbóreas, arbustivas e ainda gramíneas e leguminosas. O objetivo desses autores era que o estudo pudesse servir de base para o planejamento estratégico do município e para o plano diretor da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande. O projeto foi executado em 2009, porém fortes chuvas em 2012 destruíram as obras e trabalhos realizados até então, de modo que novos escorregamentos surgiram, e em 2013 um incêndio queimou grande parte da vegetação na voçoroca.

Loschi et al (2014) desenvolveram uma pesquisa de caracterização de uma voçoroca com regeneração natural no município de Nazareno. No levantamento das vegetações foram consideradas tanto espécies vegetais arbustivas quanto arbóreas para

que pudessem identificar e indicar as espécies mais aptas para serem usadas em recuperação de voçorocas. De modo geral, o estudo revelou que a vegetação na voçoroca era composta por plantas pioneiras, e que o maior poder de cobertura e dominância ocorreu com as gramíneas e em seguida com as herbáceas. Conforme o lençol freático aumentava sua profundidade, o solo tornava-se mais estável e com maior oxigenação, permitindo que espécies lenhosas se desenvolvessem. Os autores concluíram que a predominância de plantas pioneiras é devido ao fato de que essas espécies conseguem se desenvolver em condições adversas, como baixa estabilidade dos solos e baixa disponibilidade de nutrientes.

Sampaio (2014) realizou estudo geológico-geotécnico dos processos erosivos e proposta de macrodrenagem para a voçoroca do Córrego do Cravo, em Nazareno. A autora realizou uma avaliação integrada dos condicionantes geológico e geotécnicos da área e as propriedades que interferem na drenagem da água sub e superficial na feição erosiva. Para caracterização e análise foram desenvolvidos mapas em SIG das características da bacia do Córrego do Cravo e da bacia de contribuição. Os mapas gerados foram de Modelo Digital de Elevação (MDE), Classes Hipsométricas, Classes de Declividade, Direção de Fluxo e Uso e Ocupação (Figura 13).

De acordo com Sampaio (2014), a região interna da voçoroca do Córrego do Cravo tem nível d'água aflorante, com formação de pequenos canais hídricos, e até uma porção alagada. A atuação da água subterrânea no local é responsável pela instabilidade do solo no interior da erosão, com ocorrência de escorregamentos de pequena e média intensidade e pipings. Enquanto que outras regiões da voçoroca caracterizam-se pela presença de samambaias e árvores de maior porte, caracterizando a sucessão natural da vegetação na área degradada.

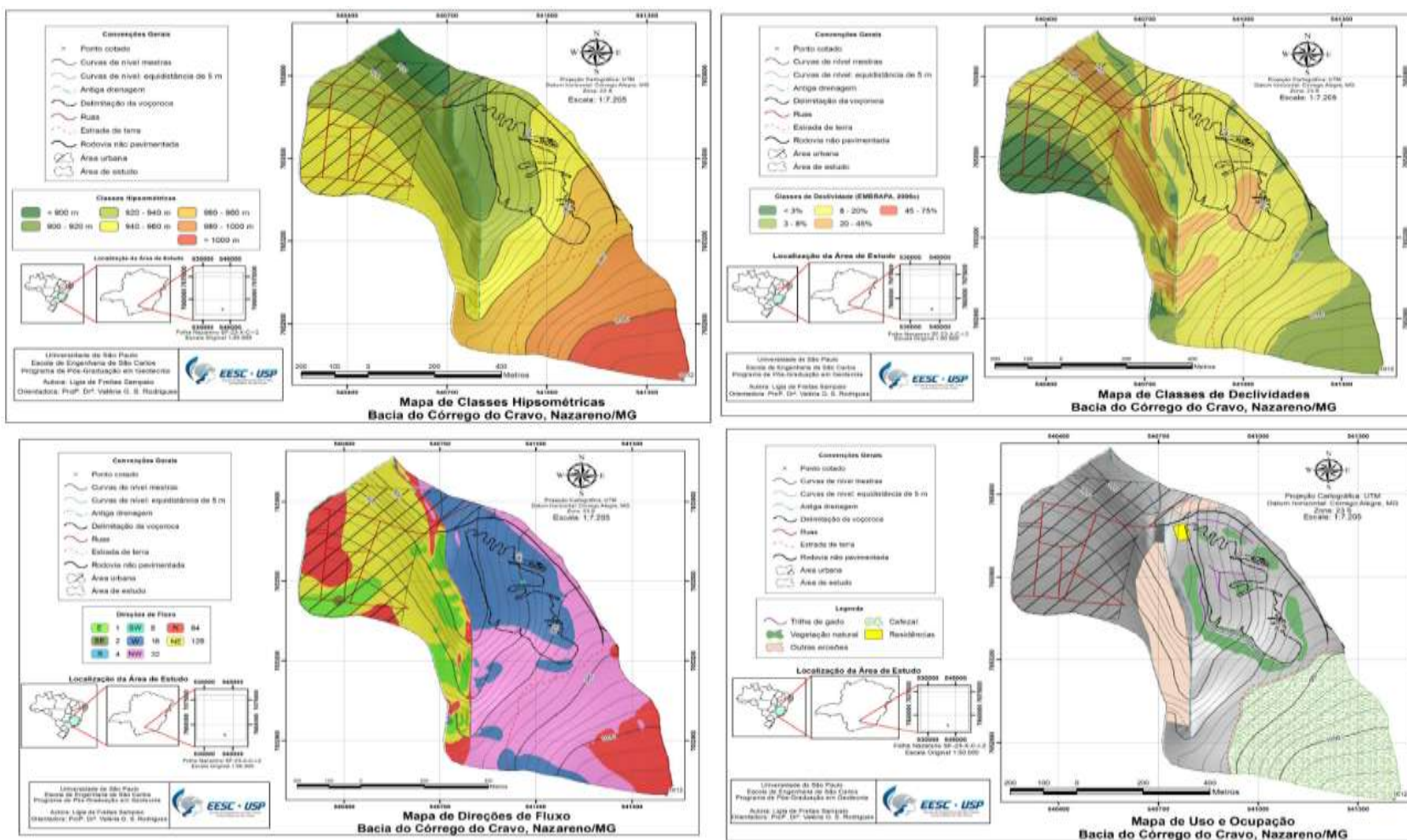


Figura 13: Mapas de classes hipsométricas, de classes de declividade, de direção de fluxo e de uso e ocupação. Fonte: Sampaio (2014).

Sampaio (2014) realizou ensaios de Condutividade Hidráulica a Carga Constante, Permeabilidade, Erodibilidade, Matéria Orgânica, Classificação de Solos como Miniatura Compactada Tropical (MCT) e Análise Granulométrica Conjunta, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e de parâmetros físico-químicos como Delta pH (ΔpH), Condutividade Elétrica, Potencial de Oxi-Redução (Eh), entre outros. Entre os resultados destacam-se o valor de $1,68 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ para Condutividade Hidráulica Média no cambissolo; as porcentagens médias de matéria orgânica foi de 5,4 % no Latossolo e de 2,4 % no Cambissolo para amostras retiradas na encosta da voçoroca. Por fim, a autora apresenta propostas de projetos de drenagem para a Voçoroca do Córrego do Cravo considerando a própria bacia do córrego e a bacia de contribuição. Sampaio (2014) sugere redução no volume de água e energia de escoamento superficial em direção às áreas mais susceptíveis por meio de trincheiras de infiltração, canais de escoamento com correção de declividade, criação de bancos de sedimentos na voçoroca para alteração da direção do fluxo e suporte de vegetação, entre outros.

Cassaro (2015) desenvolveu um trabalho no qual foi feita uma caracterização dos solos e avaliação das técnicas de recuperação na Voçoroca do Córrego do Cravo em Nazareno. Na caracterização geológica e geotécnica dos solos para identificação dos fatores condicionantes de processos erosivos, realizou-se ensaios de granulometria, determinação de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Matéria Orgânica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), entre diversos outros. O autor concluiu que o Cambissolo de granito-gnaiss por apresentar alto teor de silte (60%), baixa coesão e baixo teor de matéria orgânica é o principal condicionante natural do processo erosivo na Voçoroca do Cravo. Além disso, a ação antrópica na área é responsável pela intensificação dos processos erosivos. Alguns dos resultados obtidos por Cassaro (2015) estão listados nas Tabelas 3 e 4. Para a capacidade de troca catiônica, os valores encontrados por Cassaro (2015) foram de 2,33 meq/100g para o latossolo e 1,62 meq/100g para cambissolos.

Tabela 3: Distribuição granulométrica dos latossolos e cambissolos. LAT1: latossolo, CAM1 e CAM2: cambissolos. (CASSARO, 2015).

Amostra	Autor	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa
LAT1	Cassaro (2015) e Sampaio (2014)	50%	28%	14%	7%	1%
	Oliveira (2015)	58% (média)	21% (média)	12% (média)	6% (média)	2% (média)
CAM1	Cassaro (2015) e Sampaio (2014)	4%	61%	19%	15%	1%
	Oliveira (2015)	5%	60%	19%	13%	3%
CAM2	Oliveira (2015)	4%	78%	15%	3%	0%

Tabela 4: Quantidade de matéria orgânica (MO) presentes no Latossolo e Cambissolo analisados por Cassaro (2015) e Sampaio (2014). (CASSARO, 2015).

Amostra	Autor	MO (g/kg)
LAT1	Cassaro (2015)	21,7
	Sampaio (2014)	31,0
CAM1	Cassaro (2015)	29,0
	Sampaio (2014)	24,0
CAM2	Cassaro (2015)	24,3
	Sampaio (2014)	18,0

Por fim, Cassaro (2015) descreve que a recuperação adequada deve envolver medidas de controle do escoamento superficial por meio do estabelecimento de cordões de nível à montante da erosão, vertedores e dissipadores de energia para desvio do fluxo de água, e controle do fluxo de sedimentos no interior da feição erosiva.

Oliveira (2015) realizou a caracterização geológica-geotécnica da voçoroca do Córrego do Cravo, além de indicar propostas de intervenção para estabilização dos taludes da voçoroca. A autora desenvolveu trabalho de campo e ensaios laboratoriais

com amostras de diferentes condições de estabilidade na voçoroca, por exemplo, áreas com deslizamento e sem deslizamento, e situações de escorregamento rotacional e translacional. Entre os ensaios laboratoriais realizados incluem-se ensaios geotécnicos como massa específica, granulometria, consistência e erodibilidade, e ensaios mineralógicos como Adsorção de Azul de Metileno para identificação da Capacidade de Troca Catiônica, Superfície Específica (SE) e Atividade da Fração Argila, ensaio de Análise Térmica Diferencial (ATD) e Granulométrica (ATG) e Difração de Raio X (DRX).

Quanto às sugestões de intervenção, Oliveira (2015) descreve a necessidade de isolamento da área, obras de drenagem superficial e subsuperficial, estabilização dos taludes e proteção da cobertura vegetal. O foco desse trabalho foi a estabilização dos taludes e por isso a autora propõem técnicas de bioengenharia de solos para as diferentes situações analisadas. Oliveira (2015) sugere adoção de biorrolos e geotêxteis biodegradáveis para diminuição do comprimento de rampa, desenvolvimento da vegetação e consequentemente redução do escoamento superficial, e retaludamento em bermas para diminuição da alta declividade nos taludes com escorregamento rotacional. Para os taludes com escorregamento translacional, a proposta é de retaludamento em pequenos terraços com aplicação de geotêxteis biodegradáveis e revegetação com espécies nativas. Nas áreas sem escorregamento, a autora indica intervenções para drenagem superficial e revegetação.

Uma pesquisa bastante interessante em Nazareno foi realizada por Pereira et al. (2014). Os autores desenvolveram um trabalho a respeito da análise da percepção da população de Nazareno em relação às voçorocas. Essa pesquisa foi desenvolvida pela aplicação de questionários e pela realização de entrevistas. Os autores concluíram que, em geral, a população tem baixa percepção da influência das voçorocas na vida cotidiana e não há conhecimento algum quanto à forma de recuperar as erosões, ocorrendo inclusive propostas de uso das voçorocas como depósito de entulho como alternativa para recuperação.

A caracterização geológico-geotécnica do município de Nazareno, análise dos processos erosivos e propostas de recuperação da área degradada é contemplada em diversos trabalhos acadêmicos e práticos, como descritos acima. Aspectos como condicionantes e deflagradores das erosões e medidas para recuperação estão muito bem

caracterizadas e estudadas, no entanto, essas produções não contemplam a predição de erosão e estimativa da perda de solos. Sendo assim, é interessante a realização de estimativas dos processos erosivos e elaboração de possíveis cenários futuros que possam auxiliar nas tomadas de decisão para intervenções de recuperação das voçorocas. A importância de tais prognósticos deve-se também à instabilidade dos processos erosivos no município de Nazareno, que podem se intensificar ainda mais.

7. RESULTADOS

Como descrito anteriormente, as curvas de nível e os pontos cotados foram digitalizados em formatos *shapefile* para delimitação da área da Bacia do Córrego do Cravo. Com os *shapefiles* referentes aos pontos cotados e curvas de nível obtidas de 5 em 5 metros, foi possível gerar o Modelo Digital de Elevação da área de estudo (Figura 14). Conforme figura 14, observa-se que as maiores altitudes estão plotadas na porção SE da bacia, área referente a cabeceira da voçoroca do Córrego do Cravo.

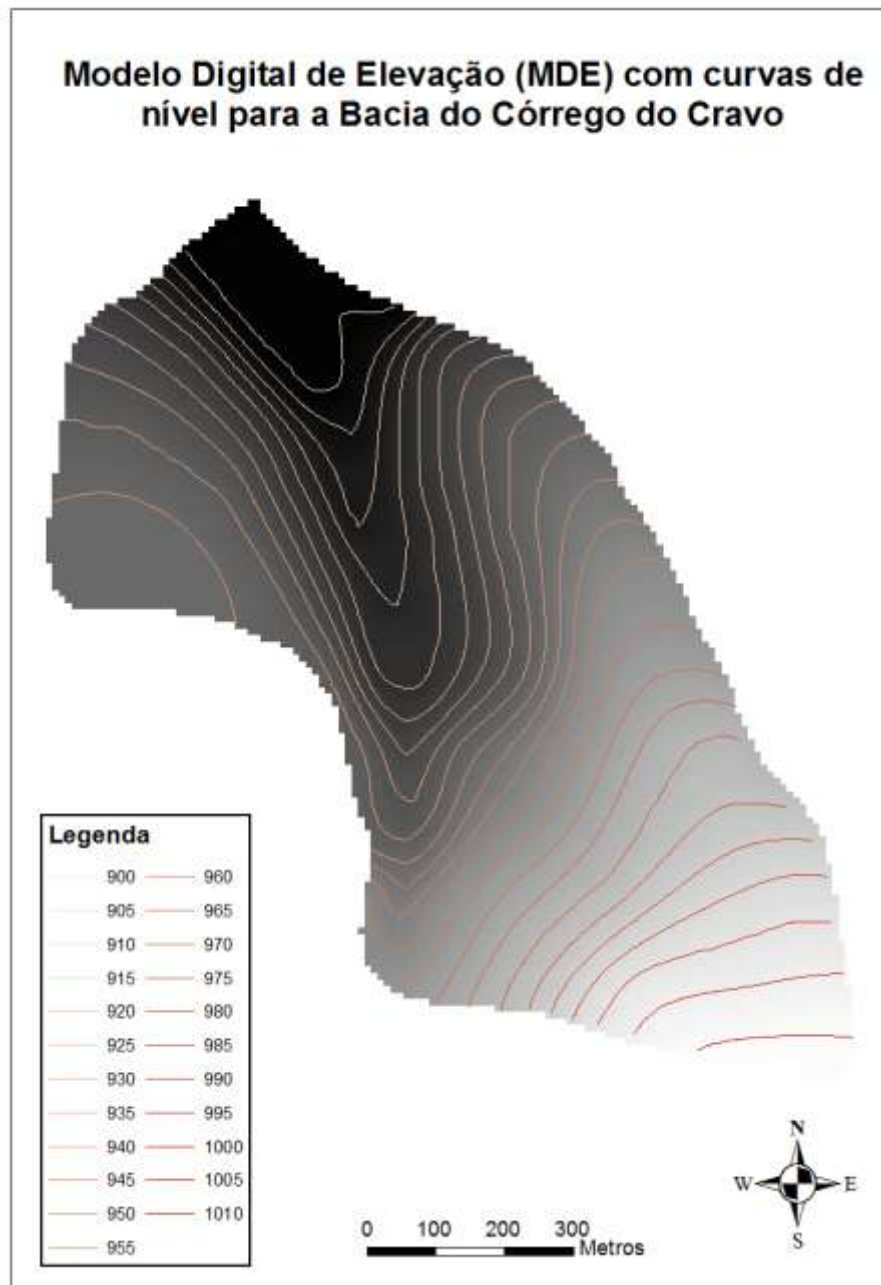


Figura 14: Modelo Digital de Elevação (MDE) com curvas de nível para a Bacia do Córrego do Cravo.

Os tipos de uso e ocupação (cafezal, pastagem, estrada, área urbana, vegetação natural e outras voçorocas) foram digitalizados no sistema de referência SIRGAS2000. A Figura 15 exibe o mapa de uso e ocupação da bacia do Córrego do Cravo.

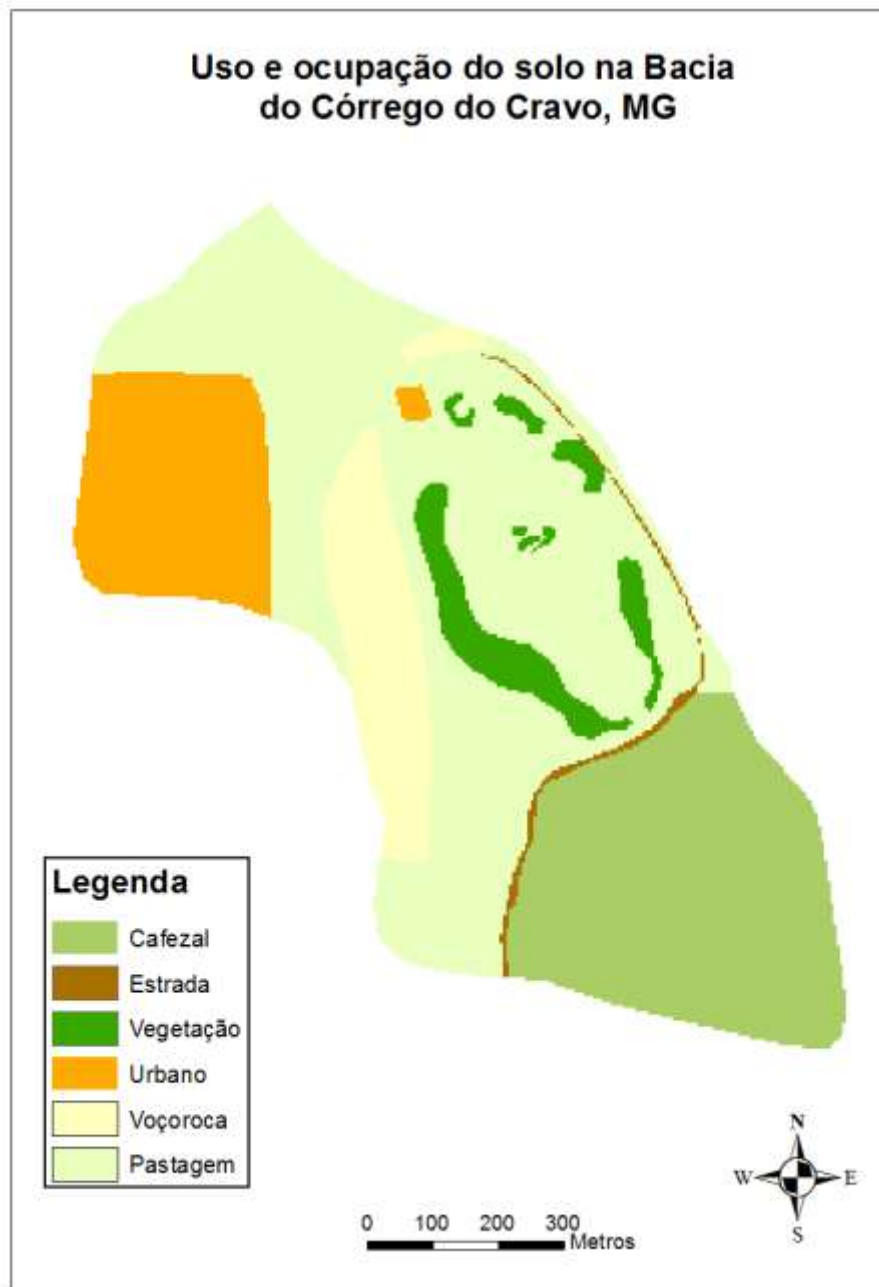


Figura 15: Uso e ocupação do solo na Bacia do Córrego do Cravo, MG.

Conforme Figura 15, o uso do solo na porção SE da bacia do Córrego do Cravo é cafézal. Entre a área da voçoroca do Córrego do Cravo e o cafézal, existe uma estrada de terra que direciona toda a água pluvial para o interior da voçoroca. Na porção referente à voçoroca, os usos predominantes são pastagem e vegetação.

Como explicado anteriormente no item referente aos materiais e métodos, para cada uma dessas classes de uso e ocupação, foi criado um arquivo com formato ROT para ser usado no *software* GeoWEPP (Figuras 16 a 21).

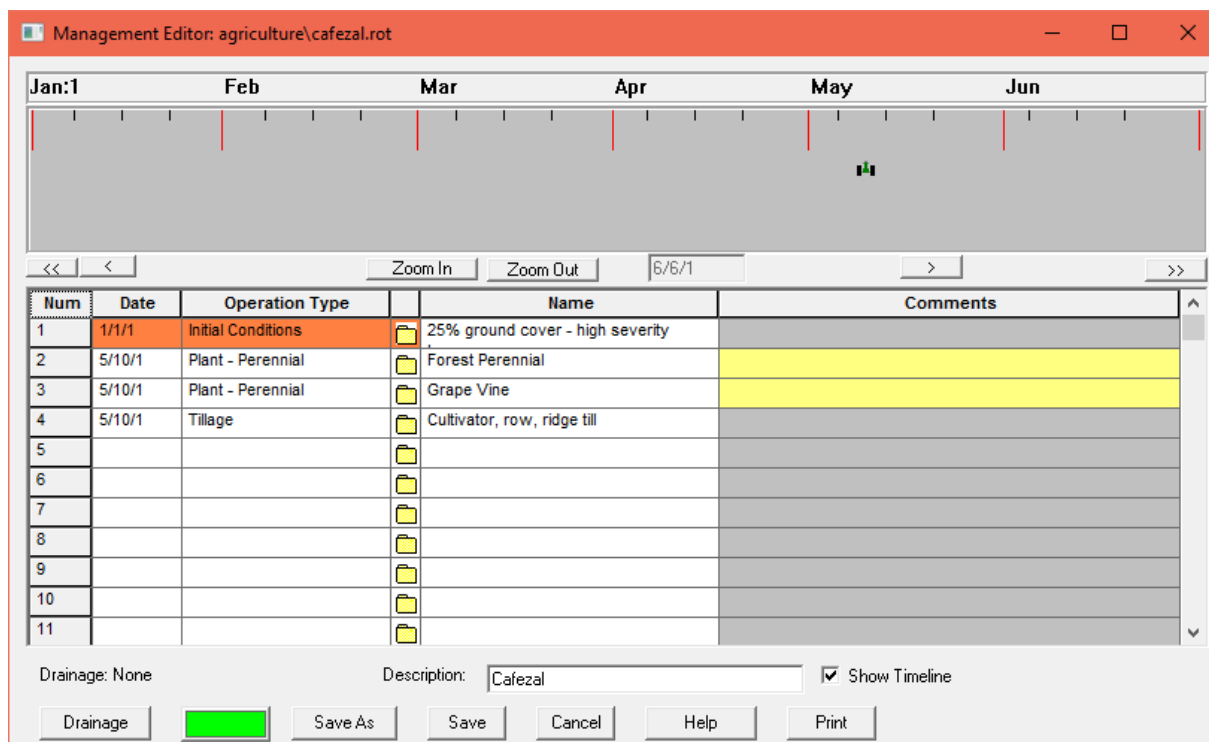


Figura 16: Arquivo ROT para o cafezal.

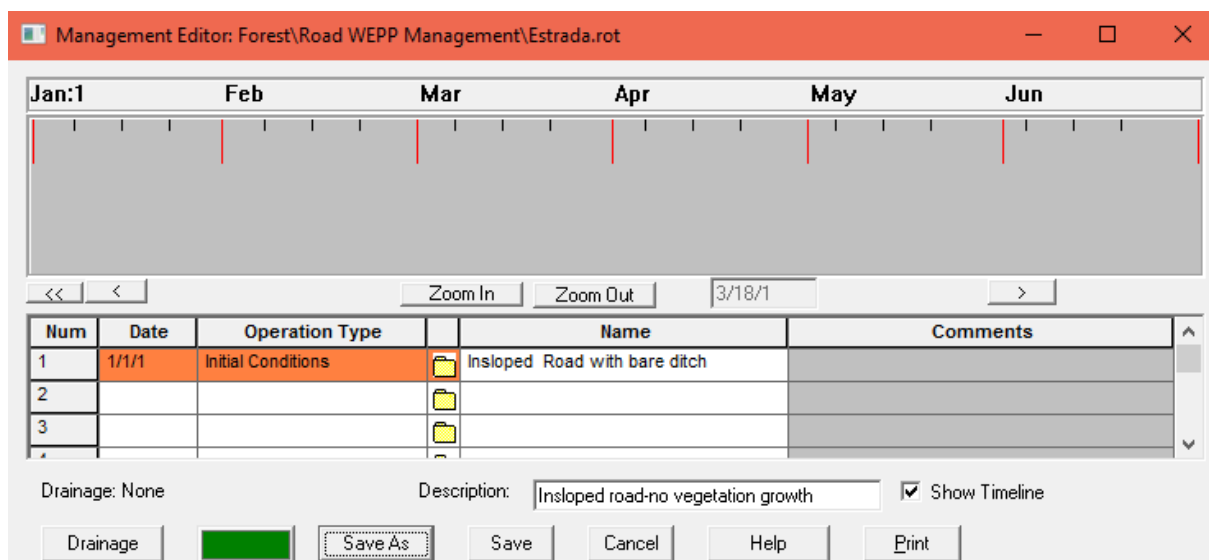


Figura 17: Arquivo ROT para estrada.

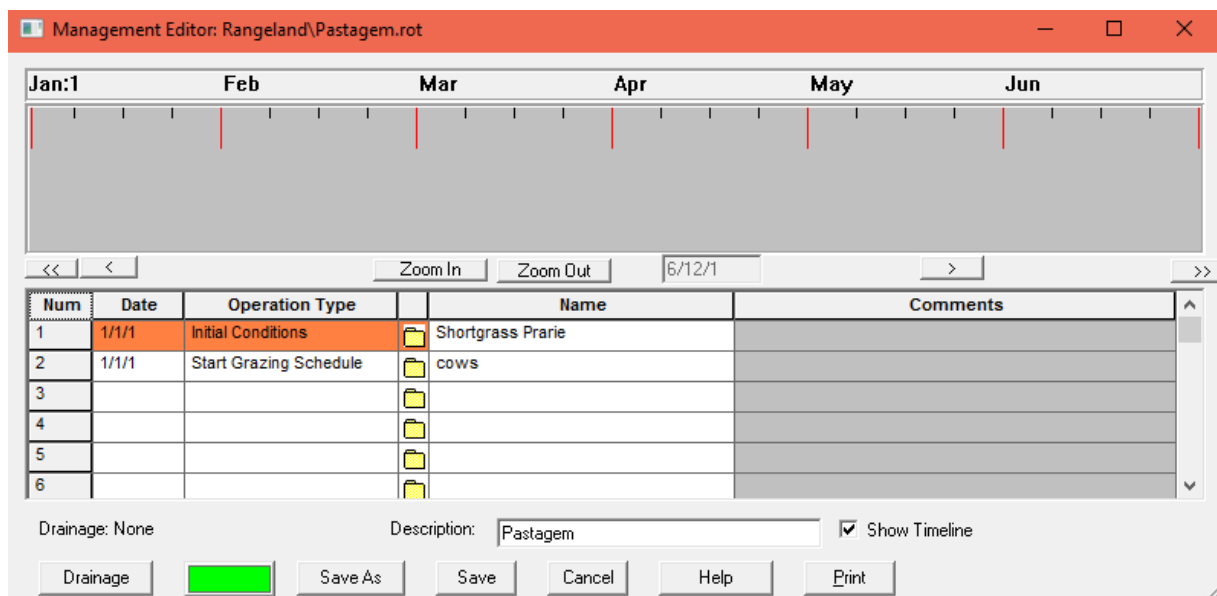


Figura 18: Arquivo ROT para pastagem.

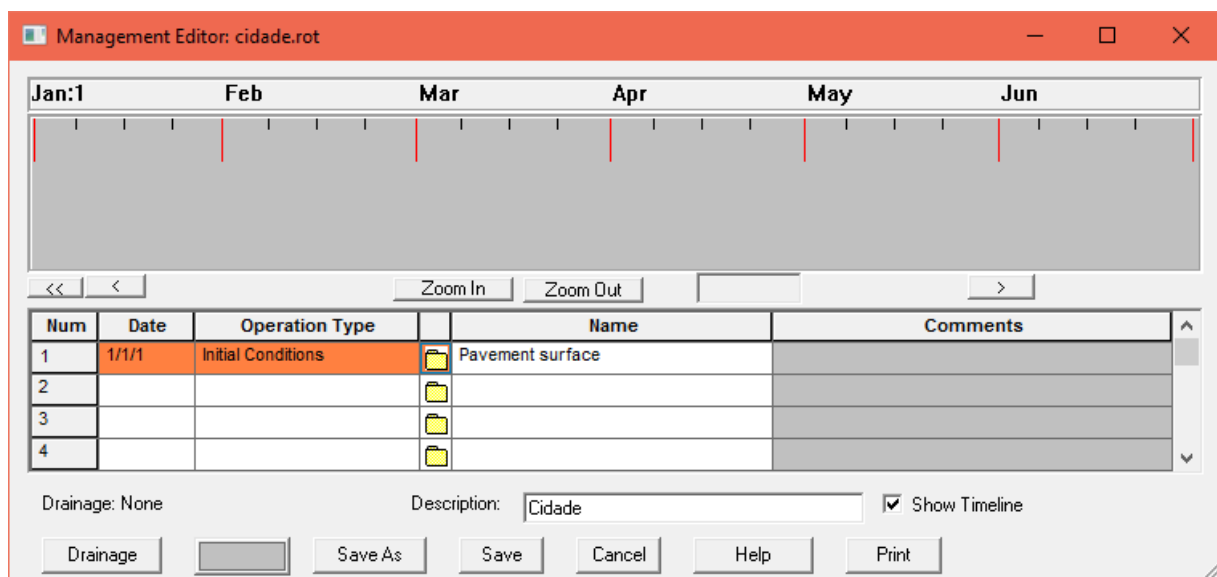


Figura 19: Arquivo ROT para área urbana.

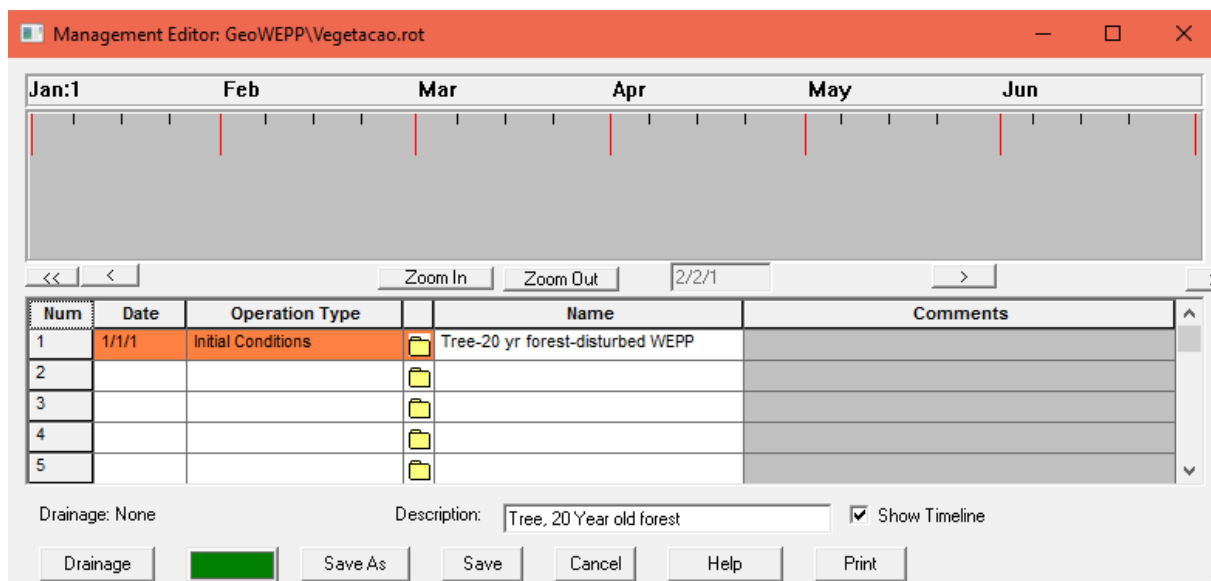


Figura 20: Arquivo ROT para a vegetação.

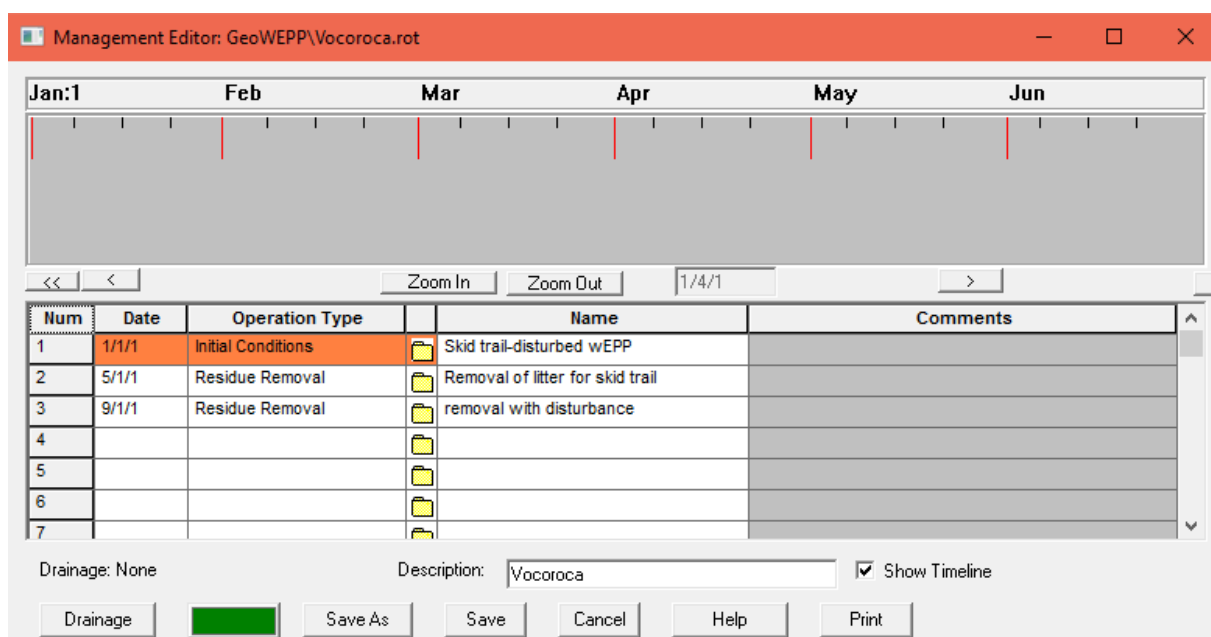


Figura 21: Arquivo ROT para as voçorocas.

Quanto ao tipo de solo, a bacia do Córrego do Cravo se localiza na área onde aflora os latossolos vermelho amarelo (considerado neste trabalho como latossolo) e os cambissolos. De acordo com Ferreira (2005), Sampaio (2014) e Oliveira (2015), o perfil de alteração na voçoroca do Córrego do Cravo é composto pelo horizonte superficial composto por latossolo, e uma profunda camada de cambissolo.

Para o modelo WEPP, utilizou-se o latossolo (Figura 22), por ser o solo de superfície, em toda a bacia do Córrego do Cravo. Os valores referentes à distribuição granulométrica que foram inseridos no modelo de predição de perda de solo foram obtidos nos trabalhos de Sampaio (2014) e Cassaro (2015).

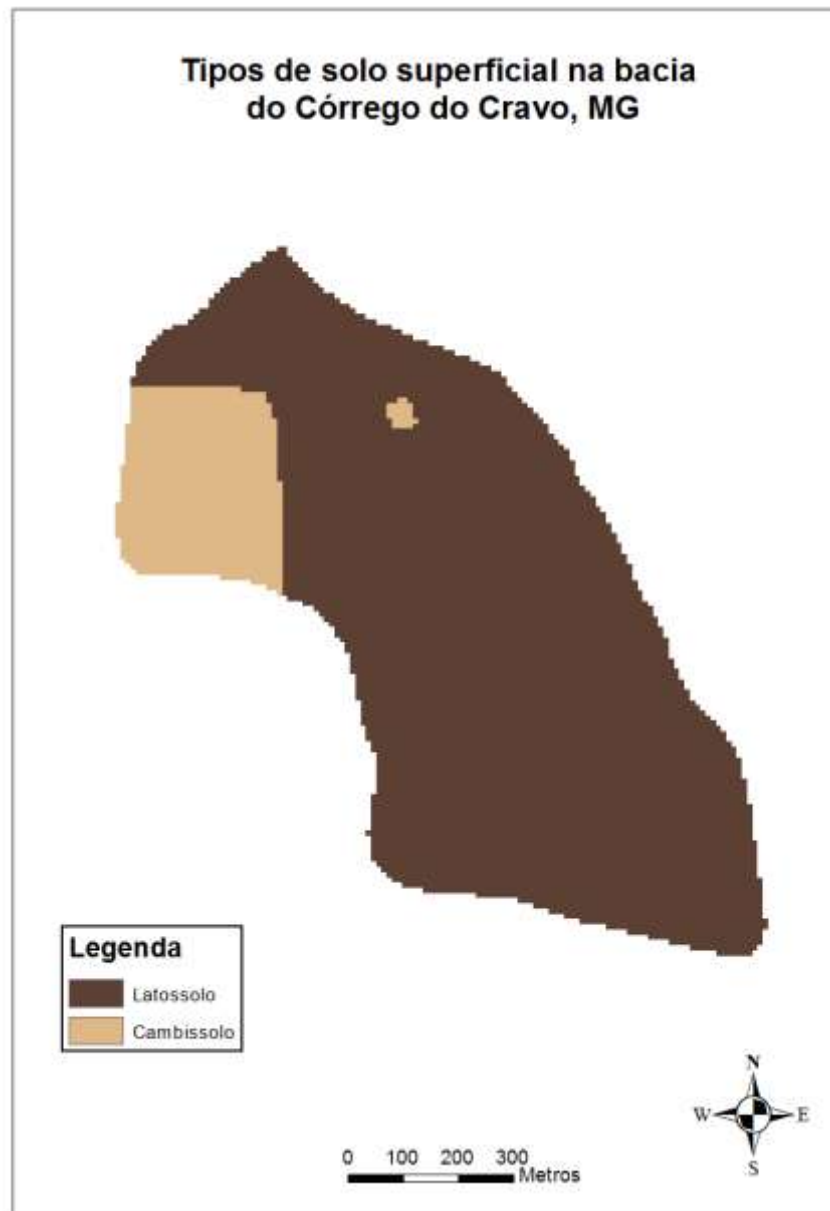


Figura 22: Tipos de solo superficial na bacia do Córrego do Cravo, MG

Entre os parâmetros de entrada no modelo, mesmo o silte não sendo um dado de entrada direto, ele é calculado internamente pelo WEPP através dos valores de areia e argila. Dessa forma, a distribuição granulométrica para o latossolo é de 22% de areia, 50% de argila e 28% de silte, com textura argilo-siltosa (SAMPAIO, 2014; CASSARO, 2015). Por essas características, utilizando o triângulo textural de localização de erosões

em áreas agrícolas, pelo mapa dos Estados Unidos e pelo triângulo de textura de solos (Figuras 8 e 9), e pela textura argilo- siltosa, o solo escolhido foi da classe textural clay. Portanto, o exemplo mais parecido com as características brasileiras escolhido para ser editado localiza-se no estado de Dakota do Sul. O valor de matéria orgânica utilizado foi o encontrado por Sampaio (2014), o que correspondeu a 5,4 % de matéria orgânica. A capacidade de troca catiônica usada foi 2,33 meq/100g (CASSARO, 2015). O valor de condutividade hidráulica usado foi de $1,68 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ determinado por Sampaio (2014), tal valor corresponde a $6,048 \text{ mm.h}^{-1}$, e foi considerado para todo o perfil da bacia.

Para a porção correspondente ao cambissolo, a distribuição granulométrica obtida por Sampaio (2014) e Cassaro (2015) foi de 35 % de areia, 4 % de argila e 61 % de silte, a capacidade de troca catiônica foi de 1,62 meq/100g (CASSARO, 2015) e o teor de matéria orgânica para os cambissolos foi de 2,4 % (SAMPAIO, 2014).

Para a profundidade, considerou-se 500 mm para o latossolo e 1300 mm para o cambissolo, uma vez que 500 mm foi um valor médio para os valores encontrados por Ferreira (2005) e como o WEPP só simula para 1800 mm, o restante da profundidade foi completado com cambissolo.

Com base na Tabela 1, o valor de albedo escolhido para a simulação no GeoWepp foi 0,23 correspondendo a uma média ponderada de acordo com os usos na Bacia do Córrego do Cravo. E para a saturação inicial, considerou-se o valor padrão fornecido pelo modelo WEPP que corresponde a 75%.

O arquivo de solo modelo foi alterado de modo que o perfil da voçoroca para simulação em nível de bacia, está indicado na Figura 23.

Soil Database Editor: Perfil_vocoroca.sol

Soil File Name: Perfil_vocoroca Soil Texture: Silty Clay Albedo: 0.23 Initial Sat. Level: (%) 75

Interrill Erodibility: (Kg*s/m**4) ☒ Have Model Calculate

Rill Erodibility: (s/m) ☒ Have Model Calculate

Critical Shear: (Pa) ☒ Have Model Calculate

Eff. Hydr. Conductivity: 6.048 (mm/h) ☐ Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/1	Rock(%)
1	500	22.0	50.0	5.400	2.3	0.0
2	1300	35.0	4.0	2.400	1.6	0.0
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

☐ Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio 25 Ksat (mm/h) 0

☐ English Units

Print Save As Save Cancel Help

Figura 23: Arquivo de solo (.SOL) para a bacia do Córrego do Cravo.

Para a simulação por taludes, os dados foram obtidos de Oliveira (2015), correspondendo a dois exemplos de taludes com escorregamentos e um estável. Para as informações que faltaram, o trabalho de Sampaio (2014) foi novamente utilizado. E da mesma forma que foi feito para o perfil da bacia, o arquivo modelo foi editado com as especificidades de cada talude. Para o talude direito, adotou-se que o perfil de alteração continha latossolo e cambissolo originado de granito-gnaiss, com textura siltosa e argilosa. No horizonte de latossolo, na profundidade de 0,5 m, a distribuição granulométrica adotada foi de 60 % para argila, 20 % areia, 20 % silte, capacidade de troca catiônica de 2,75 meq/100g, com 5,4 % de matéria orgânica. No horizonte de cambissolo, a profundidade foi de 1,3 m, com distribuição granulométrica de 4 % para argila, 78 % para silte e 18 % para areia, com 64,4 meq/100g de capacidade de troca catiônica e 2,4% de matéria orgânica (Figura 24).

Para o talude esquerdo, o perfil foi composto por 0,5 m de latossolo e 1,3 m de cambissolo, com textura siltosa. No horizonte de latossolo, a distribuição granulométrica adotada foi de 56 % para argila, 24 % areia, 20 % silte, capacidade de troca catiônica de 3,40 meq/100g, com 5,4% de matéria orgânica. No horizonte de cambissolo, a distribuição granulométrica adotada foi de 5 % para argila, 88 % para silte, 7 % para areia, com 74,18 meq/100g de capacidade de troca catiônica e 2,4% de matéria orgânica (Figura 25).

Para o talude da cabeceira, foi considerado que a encosta também era composta por textura siltosa. No horizonte de superior, a profundidade adotada foi de 0,5 m, com distribuição granulométrica de 5 % para argila, 11 % areia, 84 % silte, capacidade de troca catiônica de 17,66 meq/100g, com 5,4% de matéria orgânica. No horizonte inferior, a profundidade foi de 1,3 m, com distribuição granulométrica de 38 % para argila, 49 % para silte, 13 % para areia, com 5,04 meq/100g de capacidade de troca catiônica e 5,4% de matéria orgânica (Figura 26).

Soil Database Editor: Talude_direito.sol

Soil File Name: Talude_direito Soil Texture: Silty Clay Albedo: 0.23 Initial Sat. Level: (%) 75

Interrill Erodibility: (Kg*s/m**4) ☒ Have Model Calculate

Rill Erodibility: (s/m) ☒ Have Model Calculate

Critical Shear: (Pa) ☒ Have Model Calculate

Eff. Hydr. Conductivity: 6.048 (mm/h) ☐ Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/t)	Rock(%)
1	500.0	20.0	60.0	5.400	2.75	0.0
2	1300	18.0	4.0	2.400	64.4	0.0
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

☐ Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio 25 Ksat (mm/h) 0

☐ English Units

Print Save As Save Cancel Help

Figura 24: Arquivo de solo (.SOL) para o talude direito da bacia do Córrego do Cravo.

Soil Database Editor: Talude_esquerdo.sol

Soil File Name: Talude_esquerdo Soil Texture: Silty Albedo: 0.23 Initial Sat. Level: (%) 75

Interrill Erodibility: (Kg*s/m**4) ☒ Have Model Calculate

Rill Erodibility: (s/m) ☒ Have Model Calculate

Critical Shear: (Pa) ☒ Have Model Calculate

Eff. Hydr. Conductivity: 6.048 (mm/h) ☐ Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/1	Rock(%)
1	500.0	24.0	56.0	5.400	3.4	0.0
2	1300	7.0	5.0	2.400	74.18	0.0
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

☐ Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio 25 Ksat (mm/h) 0

☐ English Units

Print Save As Save Cancel Help

Figura 25: Arquivo de solo (.SOL) para o talude esquerdo da bacia do Córrego do Cravo.

Soil Database Editor: Talude_cabeceira.sol

Soil File Name: Talude_cabeceira Soil Texture: Silty Albedo: 0.23 Initial Sat. Level: (%) 75

Interrill Erodibility: (Kg*s/m**4) ☒ Have Model Calculate

Rill Erodibility: (s/m) ☒ Have Model Calculate

Critical Shear: (Pa) ☒ Have Model Calculate

Eff. Hydr. Conductivity: 6.048 (mm/h) ☐ Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/1	Rock(%)
1	500.0	11.0	5.0	5.400	17.66	0.0
2	1300	13.0	38.0	5.4	5.04	0.0
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

☐ Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio 25 Ksat (mm/h) 0

☐ English Units

Print Save As Save Cancel Help

Figura 26: Arquivo de solo (.SOL) para o talude da cabeceira da bacia do Córrego do Cravo.

Para os perfis de declividade da voçoroca, tanto para a bacia quanto para os taludes, a forma da encosta foi considerada côncava, e adotou-se os comprimentos medidos em ArcMap combinados com as informações dos trabalhos base. Os comprimentos obtidos no ArcMap foram: o comprimento do nível d'água afluente de 920 metros, a área de cabeceira tem comprimento de 620 metros, e a largura da bacia de aproximadamente 520 metros de modo que o lado direito apresenta 370 metros e o lado esquerdo 150 metros.

Assim, para o perfil da voçoroca em nível de bacia foi considerado 620 m com 12,6 % de inclinação para a região de cabeceira (obtidos de FERREIRA, 2005), 20 m com 188 % para o talude da feição erosiva (OLIVEIRA, 2015), e 900 m com 8% para a porção mais baixa da bacia (SAMPAIO, 2014). Para o talude direito, as divisões foram 63,6 m com 8 % de declive no topo, 399,7 m com 12,6 % para o início da erosão, 12,23 m com 188 % de declividade para a porção média da encosta, e 254,37 m com 8 % de desnível para a base. Para o talude esquerdo, adotou-se por 19,6 m com 8 % de declive no topo, 39,7 m com 12,6 % para o início da erosão, 12,23 m com 188 % para a porção média da encosta, e 78,47 m com 8 % de declividade para a base. Por fim, no talude da cabeceira, o perfil foi de 108,5 m com 8 % de declive no topo, 47,62 m com 12,6 % para o início da erosão, 30 m com 188 % de declividade para a porção média da encosta, e 433,88 m com 8% de desnível para a base (Figuras 27 a 30).

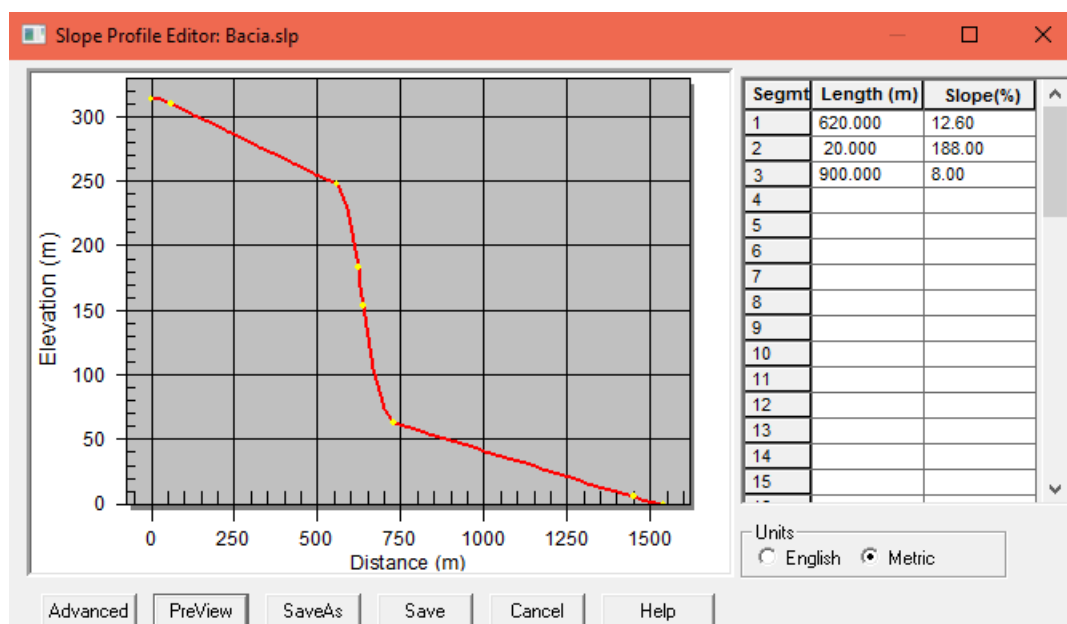


Figura 27: Perfil de declividade da bacia do Córrego do Cravo.

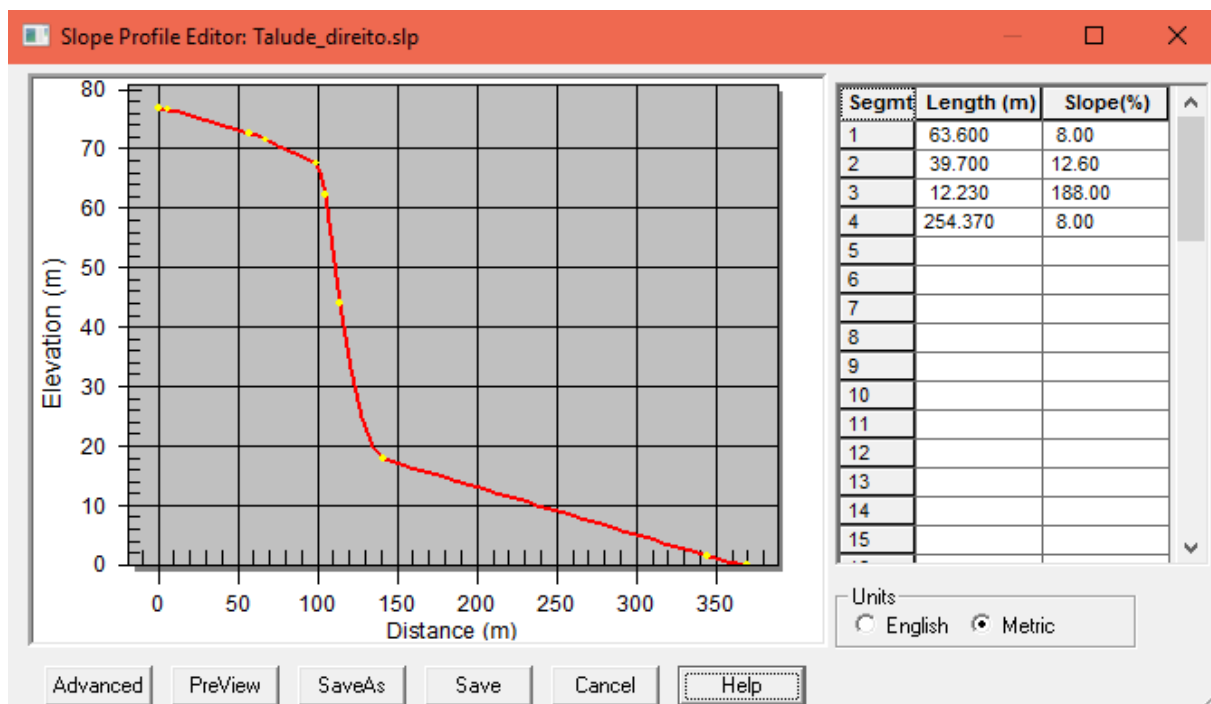


Figura 28: Perfil de declividade para o talude direito da bacia do Córrego do Cravo.

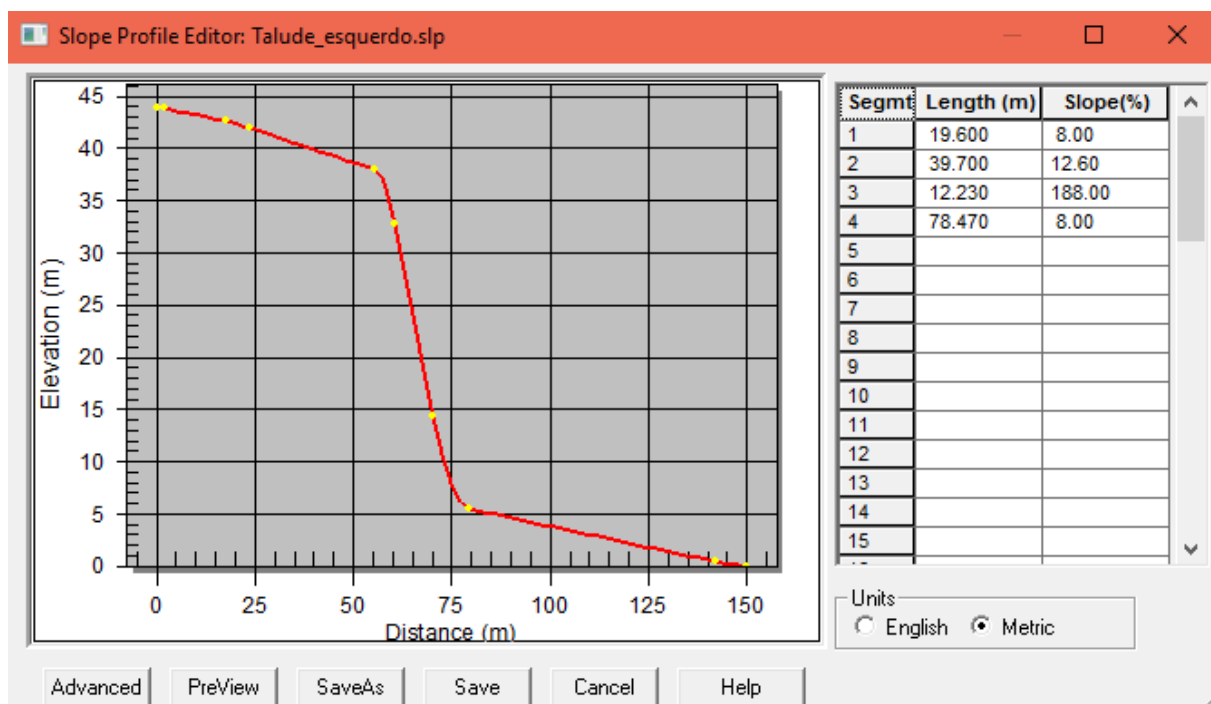


Figura 29: Perfil de declividade para o talude esquerdo da bacia do Córrego do Cravo.

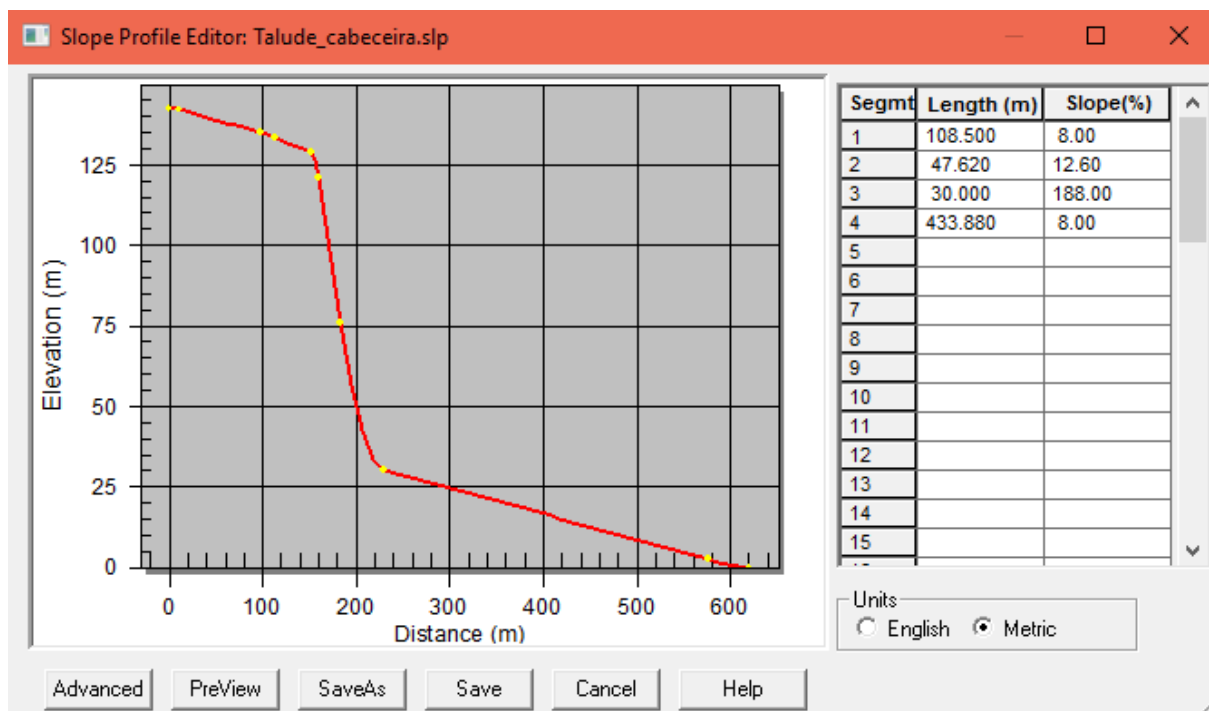


Figura 30: Perfil de declividade para o talude da cabeceira da bacia do Córrego do Cravo.

Para criação do arquivo de clima, os dados de entrada foram somente a latitude, longitude, altitude da estação meteorológica, e a série histórica de precipitação e temperaturas máximas e mínimas. Com esses parâmetros, a interface WEPP for Windows através do gerador CLIGEN 5.x criou o arquivo com todos os dados necessários à simulação no GeoWEPP (Figura 31).

View/Edit a CLIGEN Parameter File

Verify Parameter File

Name: BRAZIL Lavras Data File C:\TG\GeoWEPP_10_1_0_1\WEPP\Data\climates\cligen\BRAZ

Latitude -21 Longitude -45 Elevation(m) 917.753 Max 30 minute rate(mm) 48.514 Max 6 hour rate(mm) 89.408

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Average Monthly Precip(mm)	314.96	156.46	165.35	5.93	29.16	17.19	10.94	10.94	53.16	102.36	190.50	299.21
Number of Wet Days	31.00	28.00	31.00	3.33	28.70	22.56	21.53	21.53	26.16	31.00	30.00	31.00
Average Monthly Max Temp(C)	28.54	29.52	28.86	28.11	25.29	24.84	24.97	26.97	27.72	28.88	27.90	28.42
Average Monthly Min Temp(C)	18.41	18.21	17.91	16.42	13.18	11.72	11.29	12.44	14.37	16.64	17.33	18.26
Average Precip on Wet Days(mm)	10.16	5.59	5.33	1.78	1.02	0.76	0.51	0.51	2.03	3.30	6.35	9.65
Probability of wet day following wet day	1.00	1.00	1.00	0.92	0.92	0.67	0.67	0.56	0.89	1.00	1.00	1.00
Probability of wet day following dry day	0.99	0.99	0.99	0.01	1.00	1.00	0.75	1.00	0.75	0.99	0.99	0.99
Solar Radiation (Langley/Day)*	306.00	406.00	528.00	640.00	723.00	725.00	649.00	605.00	565.00	442.00	347.00	286.00
Maximum 30 minute Rainfall (mm)*	6.60	6.60	7.37	4.57	9.91	3.05	20.07	26.92	7.62	6.10	5.59	7.11

Monthly Averages .PAR File

☐ English Units Refresh Predicted Values Undo All Changes Predicted Yearly Precip(mm) 1356.16

Change values to match local conditions. Time to Peak Intensity values represent a cumulative distribution of Tp values based on 15 minute rainfall data. See cligen parameter documentation for more information

The average monthly precipitation and number of wet days are calculated from the probabilities for a wet day following a wet day and for a wet day following a dry day. To adjust approximate average monthly precipitation change the probabilities fields and click the Refresh button.

OK Cancel Apply Help

Figura 31: Arquivo de clima (.PAR) da estação de Lavras gerado pelo CLIGEN 5.x.

Finalizado todos os arquivos de entrada requeridos no GeoWEPP (modelo digital de elevação, tipo de solo, uso e ocupação, declividade e dados climáticos), a simulação foi feita para a bacia do Córrego do Cravo e para os taludes direito, esquerdo e de cabeceira(Figura 32). Aplicando o GeoWepp para o mde, tipo de solo e uso e ocupação, criou-se as sub-bacias do Córrego do Cravo.

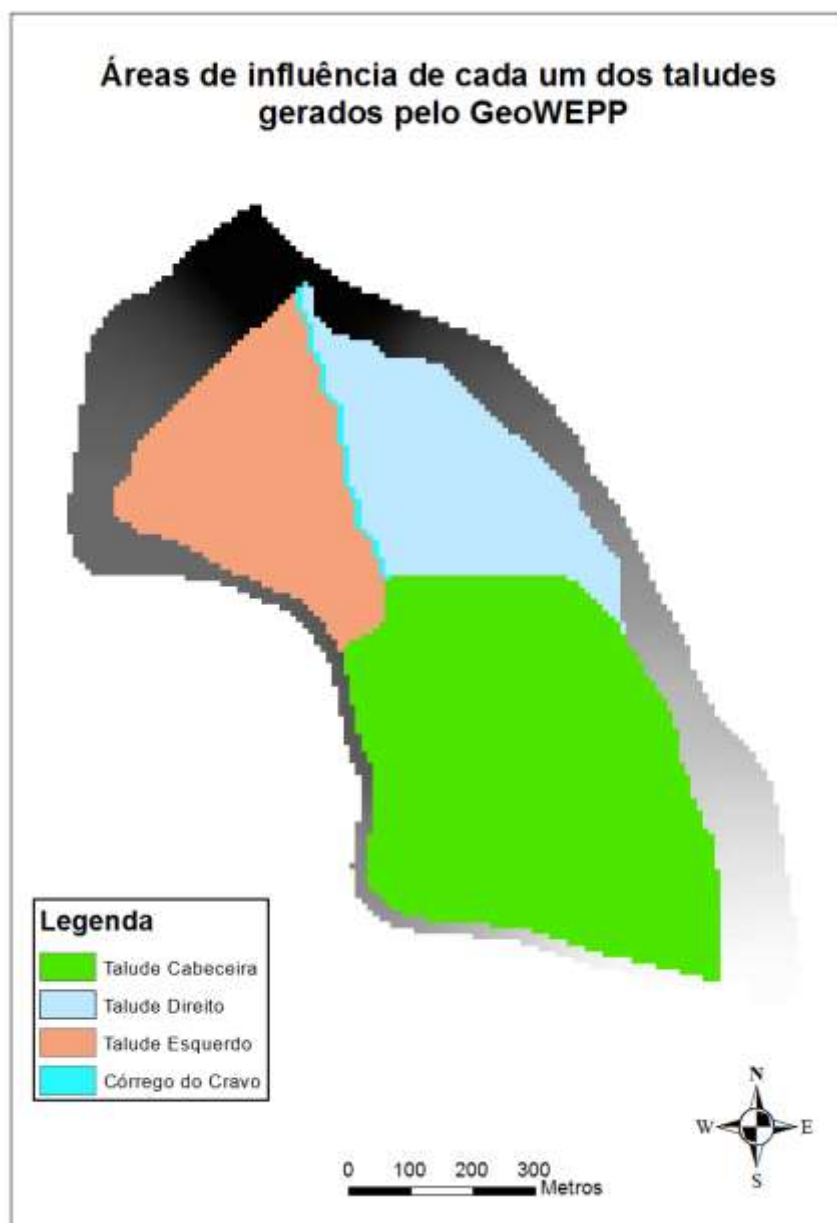


Figura 32: Áreas de influência de cada um dos taludes gerados pelo GeoWEPP.

Após a geração das bacias hidrográficas, o arquivo de solo foi adicionado, e então a primeira simulação foi gerada. Como a primeira simulação feita pelo *software* adota perda tolerável de solo de 1ton/ha, esses resultados foram desconsiderados, e o valor de perda natural foi adotado para que a simulação fosse novamente executada. Dessa forma, para a primeira simulação realizada em nível de bacia hidrográfica, o aplicativo gerou uma imagem (Figura 33) e um relatório de perda de solo em anexo.

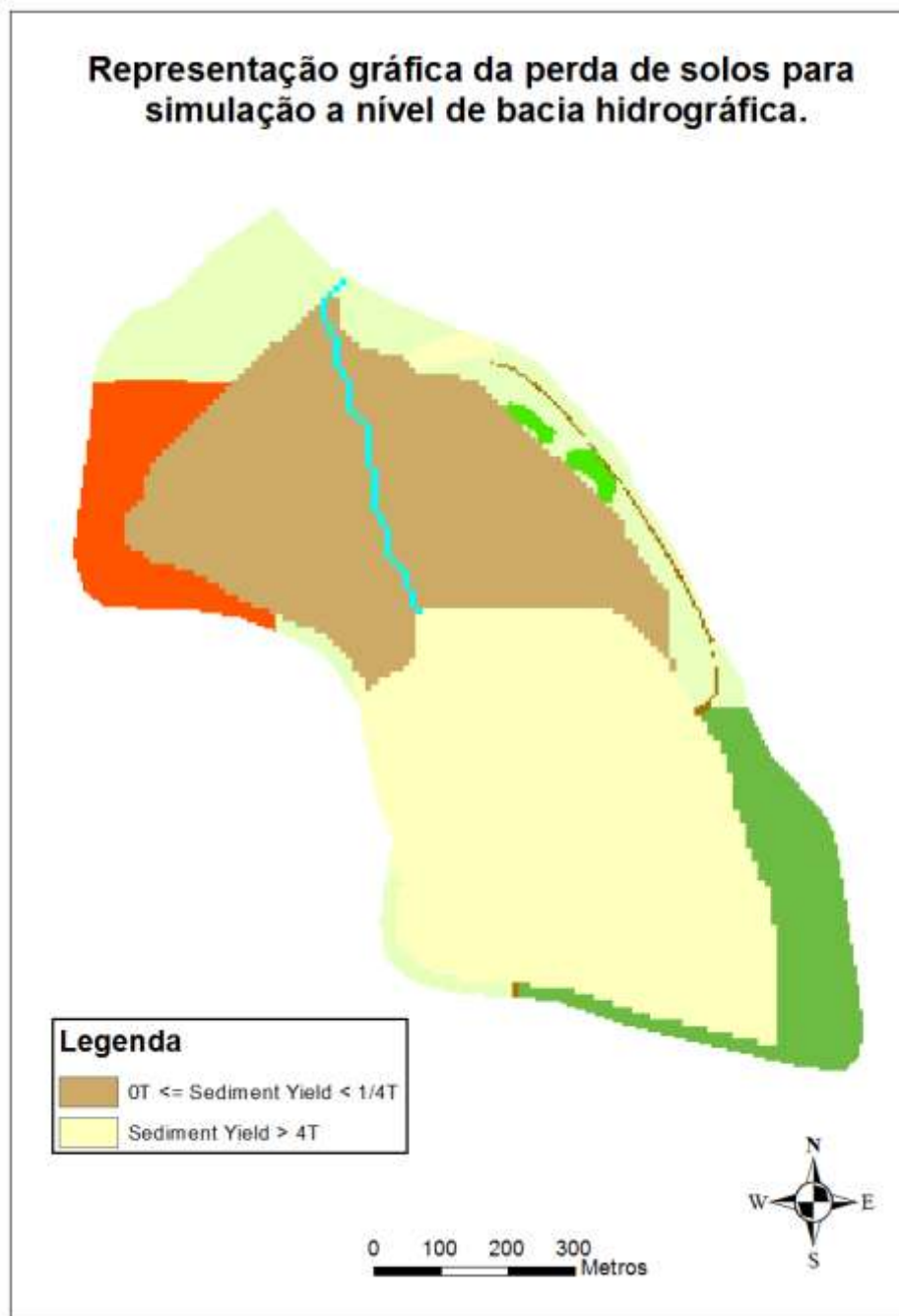


Figura 33: Representação gráfica da perda de solos para simulação a nível de bacia hidrográfica.

Na simulação em nível de bacia, os chamados *Hillslopes* referem-se às três sub-bacias integrantes do Córrego do Cravo. A *Hillslope* 3 corresponde à bacia de cabeceira e foi a que apresentou maior escoamento, perda de solo e produção de sedimentos. Este fato é compreensível uma vez que trata-se de uma região de cultivo com solo manejado e exposto, além da ocorrência de concentração de fluxo de água gerada pela estrada. Um

resultado interessante foi o da sub-bacia direita, uma vez que a perda de solo e produção de sedimentos foi zero. Tal resultado provavelmente contém erros de estimativa.

Nas simulações é possível constatar também a distribuição granulométrica dos sedimentos produzidos, sendo o silte o principal componente, correspondendo a 88% da fração.

O valor resultante de perda de solo na bacia do Córrego do Cravo, correspondeu a cerca de 526 ton no ano. É certo que nem todo solo é perdido, de modo que grande parte fica retido na bacia. Porém o valor obtido pela simulação é alto, considerando que a perda tolerável é de 9,4 ton/ha.ano, e que a área de contribuição para a estimativa foi de 52,82 ha, a perda aceitável estaria em torno de 496 ton/ano. Pela simulação, a bacia perde 30 ton de solo a mais que o natural, o que corresponde a uma perda de 10 ton/ha.ano que equivale a 0,6 ton/ha.ano de perda de solo a mais que o valor tolerável.

No entanto, se a comparação for feita com o valor de perda de solos mínima de 31 ton/ha.ano (GIAROLA, 1994), o resultado obtido pelo *software* encontra-se subestimado. Tal resultado pode ser entendido como um erro na estimativa, devido às considerações e dados de entrada, porém, entende-se que esse resultado é adequado. Isso porque a diminuição na taxa de perda de solo pode ser resultado de melhores políticas de manejo e cuidado do solo, aplicação de técnicas de controle de erosão e aumento da preocupação ambiental quanto aos processos erosivos.

Para as simulações em nível de talude, a interface WEPP for Windows foi utilizada e para cada talude, o modelo gerou perdas de solo e escoamento específicos (Figuras 35 a 37).



Figura 344: Simulação para talude da cabeceira do Córrego do Cravo.



Figura 355: Simulação para talude direito do Córrego do Cravo.



Figura 366: Simulação para talude esquerdo do Córrego do Cravo.

Observa-se que para o talude da cabeceira, a simulação forneceu resultados de escoamento anual médio de 58,41 mm, perda de solos anual média de 77,032 kg/m², e produção média de sedimentos de 22,232 t/ha. Para o talude direito, os resultados foram 98,64 mm de escoamento médio anual, 6,002 kg/m² de perda de solo média anual, e 60,015 t/ha de sedimentos produzidos. Por fim, para o talude esquerdo, o escoamento anual médio foi de 82,97 mm, a perda de solos anual média foi de 8,095 kg/m², e a produção média de sedimentos foi de 80,953 t/ha.

A perda de solo total dos taludes corresponde a 910 ton/ha, superando a estimativa para a bacia em 900 ton/ha no ano. Para essa simulação é possível considerar que a estimativa é muito alta. Tal resultado pode ser entendido como uma superestimativa porque os taludes foram considerados separadamente, com maior nível de detalhamento e requerimentos de informações, ao contrário da simulação em nível de bacia, uma vez que a simulação foi feita para todo o conjunto. Esse alto detalhamento pode ter sido o fator desencadeador do alto valor obtido na simulação, uma vez que quanto maior as informações necessárias, maiores serão as considerações, e maior será a probabilidade de erros de estimativa.

Além disso, considerando que Giarola (1994) estimou a perda máxima de solo na bacia do Rio Grande em 593 t/ha.ano, o valor encontrado na simulação dos taludes é muito superior ao resultado fornecido pela autora.

8. DISCUSSÃO

As dificuldades de aplicação do programa se deram, principalmente, pela falta de banco de dados brasileiros, e obstáculos na compatibilização das características brasileiras com os parâmetros americanos. Os parâmetros internos do programa estão relacionados às condições norte americanas, de modo que o levantamento das erosões em áreas agrícolas ocorreu na década de 80. Além disso, pela data de criação do programa, as atualizações não modificaram as novas unidades vigentes.

Outro empecilho na aplicação do programa, é que o *software* não é aplicável para voçorocas exclusivamente, de modo que o perfil máximo analisado pelo modelo é de 1,8 metros. Essa foi uma grande dificuldade, uma vez que os taludes da voçoroca atingiam mais de 20 metros. Considerou-se a voçoroca do córrego do Cravo como a bacia do Córrego do Cravo, de modo que apenas 3 vertentes foram consideradas, a de cabeceira, e as laterais. Não considerou-se os braços e ramificações da voçoroca.

É possível considerar os resultados da simulação para a bacia inteira como adequado, porque embora uma das sub-bacias foi estimada com perda de solos e produção de sedimentos igual a zero, a perda de solo total para a bacia foi de 0,6 ton/ha.ano a mais que o obtido por Giarola (1994). Esse aumento pode ser justificado, em decorrência do estudo realizado por Giarola ter sido em 1994, assim já se passaram mais de 20 anos, de modo que as condições de ocupação foram alteradas.

O fato do modelo não ser aplicado para a voçoroca, e a aproximação feita considerando a voçoroca como uma bacia, sem considerar os braços da bifurcação, pode ter ocasionado as diferenças nos valores observados, principalmente quando comparado os valores obtidos em nível de bacia e apenas para os taludes. A falta de padrões de comparação e experimentos em situação real dificultou uma melhor avaliação da adequabilidade do programa para áreas com voçoroca.

9. CONCLUSÕES

O modelo de predição de erosão WEPP é uma ferramenta que pode ser utilizada em áreas com clima tropical, porém os parâmetros de entrada devem ser o mais

adequado às condições da área de aplicação, uma vez que quanto maior o número de informações reais da área, menor é a propagação de erros pelo modelo.

Esse modelo pode ser aplicado para voçorocas, mas para isso, deve-se ter outras análises para que a comparação entre os dados possa ser realizada. No caso da voçoroca, conclui-se que é necessário simular a bacia e os taludes.

A simulação do GeoWEPP para a bacia hidrográfica foi considerada satisfatória, ao ponto que para os taludes os resultados de perda de solo e produção de sedimentos foram superestimados.

10. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se o estudo do modelo WEPP para áreas com clima tropical, desde que sejam realizados estudos em áreas experimentais, visando maior controle das informações.

No caso das voçorocas, recomenda-se que outros estudos sejam realizados na região de Nazareno, visando confirmar se este modelo é adequado ou não, uma vez que essa pesquisa foi o primeiro passo para tal estudo.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL. 2009. Disponível em: <
www.arc.agric.za> Acesso em 5 de Ago de 2016.

AMORIM, R.S.S. **Avaliação dos Modelos de Predição da Erosão Hídrica USLE, RUSLE e WEPP para Condições Edafoclimáticas Brasileiras**. 2004. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 10703. **Degradação do Solo – Terminologia**. São Paulo, 1989.

_____. NBR 13030. **Elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas pela mineração – Terminologia**. São Paulo, 1999.

Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em 5 de Ago de 2016.

BARROW, C. J. **Land Degradation: Development and Breakdown of Terrestrial Environments**. 1ª edição. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 295p.

BITAR, O. Y. (Coord). **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. São Paulo: ABGE-IPT, 1995. 247 p.

CASSARO, R. **Caracterização dos solos e avaliação de técnicas de recuperação na voçoroca do Córrego do Cravo (Nazareno-MG)**. São Carlos, 2015. 87p. Monografia de Trabalho de Graduação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

CECÍLIO, R. A.; RODRIGUEZ, R. G.; BAENA, L. G. N.; OLIVEIRA, F. G.; PRUSKI, F. F. **Aplicação dos Modelos RUSLE e WEPP para a Estimativa da Erosão Hídrica em Microbacia Hidrográfica de Viçosa (Mg)**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável. Mossoró, v.4, n.2, p. 39 - 45, abr./jun. 2009.

ELLIOT, W. J., LIEBENOW, A. M., LAFLIN, J. M., KOHL, K. D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988**. NSERL Report N° 3. Ohio State University and USDA Agricultural Research Service. Available from USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, In., 316 p. 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª Ed. Brasília, DF. 2013. 353p.

FENDRICH, R. Erosão urbana. In: FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCIAS, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4ª Ed. Champagnat, Curitiba. 1997. 481p.

FERREIRA, M. D. **Análise da Evolução dos Processos Erosivos Acelerados em Áreas Urbanas e das Técnicas de Controle e Recuperação: Córrego do Tucum (São Pedro/SP)**. 2004. 171 p. 2004. Dissertação (Mestrado em

Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

FERREIRA, R. R. M.; FERREIRA, V. M. **Apostila Técnica de Estabilização de Voçorocas**. Nazareno: Centro Regional Integrado de Desenvolvimento Sustentável, 2009. 20 p.

FERREIRA, V. M. **Voçorocas no município de Nazareno, MG: origem, uso da terra e atributos do solo**. 2005. 84 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Lavras (UFLA. Lavras. 2005.

FLANAGAN, D. C.; GILLEY, J. E.; FRANTI, T. G. **Water Erosion Prediction Project (Wepp): Development History, Model Capabilities, and Future Enhancements**. In: Transactions of the ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol. 50 (5); 2007. 1603 - 1612 p. Disponível em:<<https://www.ars.usda.gov/ARSTUserFiles/50201000/WEPP/weppHistory.pdf>>. Acesso em 30 de Nov de 2016.

Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 7; 2001. Goiânia. Resumos. Campinas: Instituto Agrônômico, 7 p. 2001.

GARCIA, A. R. **Uso do Modelo Wepp (Water Erosion Prediction Project) Modificado para Estimar Taxas de Erosão em Estradas Florestais**. 2001. 96 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2001.

GIAROLA, N.F.B. **Levantamento pedológico, perdas de solo e aptidão agrícola das terras na região sob influência do Reservatório de Itutinga/Camargos (MG)**. 1994. 226 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG. 1994.

GOMIDE, P. H. O.; SILVA, M. L. N.; SOARES, C. R. F. S. **Atributos Físicos, Químicos e Biológicos do Solo em Ambientes de Voçorocas do Município de Lavras – MG**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 567 – 577, mar/abr 2011.

- GONÇALVES, F. A. **Validação do Modelo WEPP na Predição de Erosão Hídrica para Condição Edafoclimática da Região de Viçosa-Mg.** 2008. 116 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2008.
- GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A. J. T. **Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia.** 1995. Cap. 4. p. 149 – 209.
- HORTA, I. D. M. F. **Levantamento dos solos e ocupação da superfície do município de Nazareno, MG.** 2006. 74 p. Dissertação de Mestrado. Pós graduação em Engenharia Florestal. Lavras. 2006.
- HORTA, I. M. F.; ARAÚJO, A. R. de; MARQUES, J. J.; PEREIRA, J. A. A.; OLIVEIRA, L. T. de; CARVALHO, L. M. T. **Caracterização dos solos do município de Nazareno –MG.** In: Congresso dos Pós-graduandos da UFLA, 14.; 2005. Lavras. Resumos. Lavras: Universidade Federal de Lavras, p. 6. 2005.
- HORTA, I. M. F.; PEREIRA, J. A. A.; MARQUES, J. J.; CARVALHO, L. M. T. **Levantamento De Reconhecimento Com Apoio Digital Dos Solos Do Município De Nazareno-Mg.** Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 33, Edição Especial, p. 1940-1947, 2009.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). 2010a. Disponível em: <<http://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais/bacia-do-rio-grande/gd1-cbh-do-alto-rio-grande/1172-conheca-a-bacia-gd1>>. Acesso em: 26 de Abr de 2016.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). 2010b. Disponível em <<http://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais/bacia-do-rio-grande/gd2-cbh-vertentes-do-rio-grande/1176-conheca-a-bacia-gd2>>. Acesso em: 26 de Abr de 2016.
- LAL, R. **Erosion measurement and evaluation.** In Soil Erosion in the Tropics: Principles and Measurement. New York: McGraw Hill; p. 183 – 223, 1990.
- LOSCHI, R. A.; PEREIRA, J. A. A.; OGUSUKU, L. M.; MACHADO, E. L. M. **Caracterização da regeneração natural de uma “Voçoroca” em Nazareno, MG.** 2014. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/237237483_Caracterizacao_da_regeneration_natural_de_uma_Vocoroca_em_Nazareno_MG>. Acesso em : 20 de Abr de 2016.

MARIA, I.C.; CHAVES, M.O.; DECHEN, S.C.F. **Comparação dos Resultados do Modelo WEPP com os Obtidos em Condições de Chuva Natural, Durante Sete Anos, em um Latossolo Vermelho Distroférrico Típico em Campinas, Sp.** In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 7; 2001. Goiânia. Resumos. Campinas: Instituto Agrônômico, 7 p. 2001.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and its control.** 2nd ed. Longman. New York. 198p. 1995.

OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de Engenharia.** 1ª edição. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. 586 p.

OLIVEIRA, F. P. **Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão Hídrica dm Bacia Rural em Arvorezinha, Rs, Utilizando o Wepp.** 2010. 151 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010.

OLIVEIRA, J. P. B.; CECÍLIO, R. **Estimativa das perdas de solo e água na microbacia do córrego Jaqueira, Alegre – Espírito Santo.** Research Gate. Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 1, p. 212 - 221, jan./mar. 2011

OLIVEIRA, M. P. P. **Caracterização geológico-geotécnica e propostas de intervenções para estabilização de taludes na Boçoroca do Córrego do Cravo - Nazareno/MG.** 2015. 143p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2015.

PAIVA, F. M. L.; SANTOS, L. L.; SRINIVASAN, V. S.; ARAGÃO, R.; SANTOS, C. A. G.; TAVEIRA, I. M. L. M. **Aplicação do Modelo WEPP em Parcelas e Microbacias no Semi-Árido Nordeste.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18.; 2009. Campo Grande. Resumos. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, p. 18. 2009.

PEJON, O. J; RODRIGUES, V. G. S; ZUQUETTE, L. V. Impactos Ambientais sobre o Solo. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental:**

Conceitos, Tecnologias e Gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013a. Cap 14. P. 317 - 343

PEJON, O. J; RODRIGUES, V. G. S; ZUQUETTE, L. V. Recuperação de Áreas Degradadas. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologias e Gestão.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2013b. Cap 23. P. 589 – 619.

PEREIRA, J. A. A.; BARROS, D. A.; SILVA, R. A.; LOSCHI, R. A. **Voçorocas em Nazareno (MG):** Análise perceptiva como subsídio para políticas ambientais. Revista Científica Anap Brasil, Lavras, v. 7, n. 9, p. 33 – 50, 2014.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera.** Conceitos, processos e aplicações. Editora: Manole Ltda. Barueri, SP. 2004. 478p.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. **Propriedades Físicas do Solo, Influenciadas pela Distribuição de Poros de Seis Classes de Solos da Região de Lavras-Mg.** Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167 - 1175, jul/ago 2006.

RODRIGUES, V. G. S.; FERREIRA, M. D.; ZUQUETTE, L. V. Estudos geológicos e geotécnicos de áreas degradadas por mineração e erosão. In: ZUQUETTE, L. V. **Geotecnia Ambiental.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015, cap. 10, p. 308 – 339.

ROTTA, C. M. S. **Estudo de Recuperação de Áreas Degradadas por Processo Erosivos: Procedimentos e Eficiência dos Métodos.** 2012. 168 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2012.

SALOMÃO, F. X. T. **Controle e Prevenção dos Processos Erosivos.** In: GUERRA, A. J .T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações. 6a Edição, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 340p. 2010.

SAMPAIO, L. F. **Estudo Geológico-Geotécnico dos Processos Erosivos e Proposta de Macrodrenagem: Voçoroca do Córrego do Cravo (Nazareno-MG).** 2014. 223p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2014.

- SILVA, A. F. **Mapeamento Geotécnico e Análise dos Processos Erosivos na Bacia do Córrego Tucum, São Pedro – SP, Escala 1:10.000.** 2003. 131 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.
- STROOSNIJDER, L. **Measurement of erosion: Is it possible?.** Elsevier, Wageningen, v. 64, p. 162 – 173, 2005.
- TEIXEIRA, W.; ÁVILA, C. A.; NUNES, L. C. **Nd-Sr Isotopic Geochemistry and U-Pb Geochronology of the Fé granitic gneiss and Lajedo granodiorite: Implications for Paleoproterozoic Evolution of the Mineiro Belt, southern São Francisco Craton, Brazil.** Geol. USP Sér. Cient., São Paulo. v. 8. n. 1. 2008. p. 53-74.
- VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. **Gully erosion: Impacts, factors and control.** Elsevier, Laos, v. 63, p. 132 – 153, 2005.
- VITTE, A.C.; MELLO, J.P. **Considerações sobre a erodibilidade dos solos e a erosividade das chuvas e suas consequências na morfogênese das vertentes: um balanço bibliográfico.** Climatologia e Estudos da Paisagem, 2007. p.107-133.
- WILLIAMS, D. D.; BUGIN, A.; REIS, J. L. B. C. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: Técnicas de revegetação.** Brasília: Minter/IBAMA, 1990. 96 p.

12. ANEXO

WEPP Watershed Simulation for Representative Hillslopes and Channels

Hillslopes		Runoff Volume (m ³)	Subrunoff Volume (m ³)	Soil Loss (kg)	Sediment Deposition (kg)	Sediment Yield (kg)
Hill	1	6362.17	88.33	0.00	0.00	0.00
Hill	2	6825.37	162.23	583.69	0.00	583.67
Hill	3	16189.86	131.48	525280.00	0.00	525285.15

Channels and Impoundments		Discharge Volume (m ³)	Sediment Yield (tonne)	Soil Loss (kg)	Upland Charge (m ³)	Subsurface Flo Volume (m ³)
Channel	1	29745.1	555.6	71735.8	29757.8	0.2

Average Annual Delivery From Channel Outlet:

Total contributing area to outlet	=	52.82 ha
Avg. Ann. Precipitation volume in contributing area	=	716857. m ³ /yr
Avg. Ann. irrigation volume in contributing area	=	0. m ³ /yr
Avg. Ann. water discharge from outlet	=	29745. m ³ /yr
Avg. Ann. total hillslope soil loss	=	525.9 tonnes/yr
Avg. Ann. total channel soil loss	=	71.7 tonnes/yr
Avg. Ann. sediment discharge from outlet	=	555.6 tonnes/yr
Avg. Ann. Sed. delivery per unit area of watershed	=	10.5 T/ha/yr
Sediment Delivery Ratio for Watershed	=	0.930

Sediment Particle Information Leaving Channel:

Class	Diameter (mm)	Specific Gravity	Particle Composition				Fraction In Flow Exiting
			% Sand	% Silt	% Clay	% O.M.	
1	0.002	2.60	0.0	0.0	100.0	108.0	0.014
2	0.010	2.65	0.0	100.0	0.0	0.0	0.782
3	0.030	1.80	0.0	94.4	5.6	6.1	0.097
4	0.300	1.60	40.2	8.2	51.6	55.7	0.067
5	0.200	2.65	100.0	0.0	0.0	0.0	0.040

Distribution of Primary Particles and Organic Matter in the Eroded Sediment:

type	fraction
clay	0.054
silt	0.879
sand	0.067
organic matter	0.058

Index of specific surface	=	47.11 m ² /g of total sediment
Enrichment ratio of specific surface	=	1.07