

MAX WELL DE OLIVEIRA RABELO

**MODELAGEM E GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS
CONSERVACIONISTAS
DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO E FERRAMENTA COMPUTACIONAL**

Goiânia, GO – Brasil

2016

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

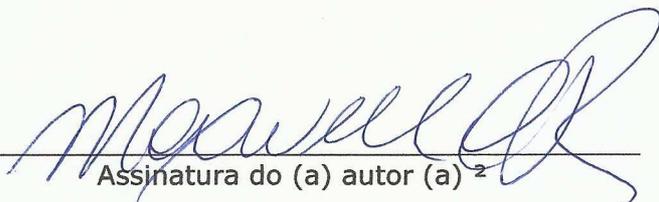
Nome completo do autor: Max Well de Oliveira Rabelo

Título do trabalho: Modelagem e geoprocessamento aplicado ao planejamento de sistemas agrícolas conservacionistas: Desenvolvimento de método e ferramenta computacional

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do (a) autor (a)²

Data: 26, 09, 2016

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

²A assinatura deve ser escaneada.

MAX WELL DE OLIVEIRA RABELO

**MODELAGEM E GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS
CONSERVACIONISTAS
DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO E FERRAMENTA COMPUTACIONAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração: Solo e Água.

Orientador:

Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler

Goiânia, GO – Brasil

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

de Oliveira Rabelo, Max Well
MODELAGEM E GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS
CONSERVACIONISTAS [manuscrito] : DESENVOLVIMENTO DE
MÉTODO E FERRAMENTA COMPUTACIONAL / Max Well de Oliveira
Rabelo. - 2016.
179 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia,
2016.
Bibliografia.

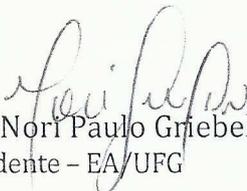
1. Planejamento Agrícola. 2. Perda de Solo. 3. Agricultura de
Precisão. I. Griebeler, Nori Paulo, orient. II. Título.

CDU 631/635



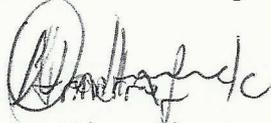
ATA DE DEFESA DE TESE

Aos onze dias do mês de julho do ano de dois mil e dezesseis (11.07.2016), às 09h00min, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler - Orientador/Presidente, Prof^a. Dr^a. Vladia Correchel, Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira, Prof. Dr. Elton Fialho dos Reis e Prof. Dr. Ricardo Santos Silva Amorim, para, em sessão pública realizada no auditório do PPGA da Escola de Agronomia da UFV, procederem à avaliação da defesa de Tese intitulada: **“Modelagem e geoprocessamento aplicado ao planejamento de sistemas agrícolas conservacionistas: Desenvolvimento de método e ferramenta computacional”**, de autoria de **Max Well de Oliveira Rabelo**, discente do curso de **Doutorado**, na área de Concentração em **Solo e Água**, do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Goiás. A sessão foi aberta pelo presidente, que fez a apresentação formal dos membros da Banca e deu início às atividades relativas à defesa da Tese. Passou a palavra ao doutorando que em quarenta minutos apresentou o seu trabalho. Após a apresentação o candidato foi arguido sucessivamente pelos membros da banca. Terminada a fase de arguição, procedeu-se à avaliação da defesa. De acordo com a Resolução nº 1051, de 09.09.2011 do CEPEC - Conselho de Ensino, Pesquisa, Extensão e Cultura, que regulamenta o Programa de Pós-Graduação em Agronomia, a Banca Examinadora considerou **“APROVADA”** a Tese, desde que procedidas às correções recomendadas, estando integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **DOUTOR** em Agronomia, na área de concentração em **SOLO E ÁGUA**, pela Universidade Federal de Goiás. O doutorando deverá efetuar as modificações sugeridas pela Banca Examinadora e encaminhar a versão definitiva da tese à Secretaria do PPGA, no prazo máximo de trinta dias após a data da Defesa. A conclusão do Curso e a emissão do Diploma dar-se-ão após o cumprimento do Artigo 69, § 1º e § 2º, da Resolução CEPEC nº 1051, de 09.09.2011. A Banca Examinadora recomendou a publicação de artigo(s) científico(s), oriundo(s) dessa tese, em periódicos de circulação nacional e, ou, internacional, depois de efetuadas as modificações sugeridas, bem como o registro do sistema apresentado. No caso do discente titulado não providenciar a publicação de seu trabalho final em forma de artigo(s) científico(s) no prazo de seis meses, após a data da defesa, serão aplicados os dispositivos do Artigo 70, § 1º e § 2º, da mesma Resolução. Para finalizar, o Presidente agradeceu os membros examinadores, congratulou-se com o doutorando e encerrou a sessão às 13h50min. E para constar, eu Welinton Barbosa Mota, secretário do PPGA, lavrei a presente Ata que depois de lida e aprovada, será assinada pelos membros da Banca Examinadora, em quatro vias de igual teor.


Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler
Presidente - EA/UFV


Prof^a. Dr^a. Vladia Correchel
Membro - Escola de Agronomia/UFV


Prof. Dr. Elton Fialho dos Reis
Membro - Engenharia Agrícola/UEG


Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira
Membro - Escola de Engenharia Civil e
Ambiental/UFV


Prof. Dr. Ricardo Santos Silva Amorim
Membro - Faculdade de Agronomia e
Zootecnia/UFMT

Aos meus avós e ao meu pai, que me nortearam durante toda vida, onde estivessem.
À minha família, pelo amor e apoio incondicionais.
À minha esposa, pelo companheirismo, carinho, compreensão e amor incondicionais.
Ao meu orientador, colega e amigo, pelo que ele é, fez e faz por mim.

Dedico.

“O Décimo Primeiro Mandamento”

Herdarás o solo sagrado e a sua fertilidade será transmitida de geração em geração.

Protegerás teus campos contra erosão e tuas florestas contra deslocação e impedirás que tuas fontes sequem e que teus campos sejam devastados pelo gado, para que teus descendentes tenham abundância para sempre.

Se falhares, ou alguém depois de ti, na eterna vigilância de tuas terras, teus campos abundantes se transformarão em solo estéril e pedregoso ou em grotões áridos, teus descendentes serão cada vez menos numerosos, viverão miseravelmente e serão eliminados da face da terra.

Walter C. Lowdermilk

Jerusalém, 1939.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Goiás, instituição em que me formei, aperfeiçoei, e que considero minha segunda casa.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás, pelo apoio à realização do Doutorado, e por ser a grande instituição de ensino, pesquisa e extensão, que me possibilita formar novos profissionais.

À Fundação de Apoio à pesquisa do Estado de Goiás, pela bolsa de Doutorado concedida.

À empresa SEMEAR Engenharia Agrônômica, pelo apoio fundamental ao desenvolvimento deste projeto, em especial ao engenheiro agrônomo Leonardo de Moura Borges.

À toda minha família, que sempre me apoiou na jornada da busca pelo conhecimento, em especial à minha esposa, minha mãe e minha irmã, as três mulheres que fazem sentido à minha existência.

Ao prof. Dr. Nori Paulo Griebeler, por tudo, e se fosse escrever não caberia nestas páginas.

Aos amigos jipeiros, em especial à equipe AMADORES 4x4, que sempre se prontificaram a ser uma excelente válvula de escape nos momentos de stress do doutorado.

À todas as pessoas que de forma direta ou indireta colaboraram para realização deste trabalho.

Meu sincero reconhecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
RESUMO GERAL	13
GENERAL ABSTRACT	14
1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1. EROSÃO DO SOLO	18
2.2. ESCOAMENTO SUPERFICIAL	20
2.3. MODELOS PARA ESTIMAR A PERDA DE SOLO	25
2.3.1. Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)	27
2.3.1.1. Fator erosividade (R)	27
2.3.1.2. Fator erodibilidade (K)	29
2.3.1.3. Fator uso e manejo (C)	30
2.3.1.4. Fator práticas conservacionistas (P)	31
2.3.1.5. Fatores comprimento de rampa (L) e declividade do terreno (S)	31
2.3.2. Equação Universal de Perda de Solo Revisada (EUPS-R)	32
2.3.3. Water Erosion Prediction Project (WEPP)	34
2.3.4. Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS)	35
2.3.5. Utilização e comparação dos modelos de estimativa de perda de solo	36
2.4. GEOPROCESSAMENTO E MODELOS DE PERDA DE SOLO	38
2.5. LIMITE DE PERDA DE SOLO	42
2.6. PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS	43
2.6.1. Terraceamento agrícola	43
2.6.2. Cálculo do espaçamento entre terraços	45
2.6.3. Estruturas alternativas de armazenamento de escoamento superficial	48
2.7. COLETA DE DADOS ALTIMÉTRICOS	49
2.8. ASPECTOS TÉCNICOS DO CULTIVO DE CANA DE AÇÚCAR	50
3. MATERIAL E MÉTODOS	53
3.1. QUALIDADE DE LEVANTAMENTOS ALTIMÉTRICOS REALIZADOS COM RECEPTOR GNSS RTK EMBARCADO EM QUADRICICLO	53
3.2. DIMENSIONAMENTO DE TALHÕES, LINHAS DE PLANTIO E SISTEMAS DE TERRACEAMENTO EM NÍVEL	57

3.2.1.	Desenvolvimento do método	57
3.2.1.1.	Dimensionamento de talhões	58
3.2.1.2.	Dimensionamento de sub-talhões	65
3.2.1.3.	Geração das linhas de plantio	65
3.2.1.4.	Cálculo de volume acumulado nas linhas de plantio	67
3.2.1.5.	Dimensionamento de terraços	68
3.2.2.	Desenvolvimento da ferramenta computacional.....	73
3.3.	UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL E COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES METODOLOGIAS DE DIVISÃO DE TALHÕES.....	78
3.3.1.	Dimensionamento dos talhões.....	79
3.3.2.	Geração das linhas de plantio	85
3.3.3.	Acúmulo de escoamento superficial em função da profundidade de sulco	86
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
4.1.	QUALIDADE DE LEVANTAMENTOS ALTIMÉTRICOS REALIZADOS COM QUADRÍCULO.....	88
4.2.	FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE TALHÕES, LINHAS DE PLANTIO E SISTEMAS DE TERRACEAMENTO EM NÍVEL	100
4.3.	ANÁLISE DE TALHOES E GERAÇÃO DE LINHAS DE PLANTIO.....	126
4.4.	VOLUME ACUMULADO NAS LINHAS DE PLANTIO	156
5.	CONCLUSÕES.....	165
6.	REFERENCIAS.....	166

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Componentes da equação para determinação do escoamento superficial máximo. (Pruski et al., 1997).....	21
Figura 2.	Mapa de localização da área experimental, no município de Bom Jesus de Goiás, Goiás.	54
Figura 3.	Suporte desenvolvido para acoplar o receptor GNSS ao quadriciclo.	55
Figura 4.	Croqui do levantamento de campo	55
Figura 5.	Fluxograma de obtenção do parâmetro A.....	59
Figura 6.	Esquema do cálculo do valor da declividade, adaptado de Burrough & Mcdonell (1998).	60
Figura 7.	Esquema do cálculo do valor de aspecto (Burrough & Mcdonell, 1998).....	60
Figura 8.	Fluxograma das etapas de obtenção do valor do fator LS da USLE.....	61
Figura 9.	Fluxograma dos procedimentos realizados para dimensionamento do talhão a partir da perda de solo da área.....	62
Figura 10.	Fluxograma dos procedimentos realizados para dimensionamento do talhão a partir da largura máxima informada.....	64
Figura 11.	Croqui ilustrando a obtenção de linhas de plantio com paralelas para cima (Verde) ou paralelas para baixo (Azul).....	66
Figura 12.	Esquema do funcionamento da operação Fill, adaptado de Tarboton et al. (1991)....	68
Figura 13.	Seção transversal da área de acúmulo do terraço.	70
Figura 14.	Seção triangular da área de acúmulo do terraço dividida pelos comprimentos correspondentes à declividade do terreno e à declividade da parede do terraço.....	71
Figura 15.	Fluxograma dos procedimentos realizados pelo <i>script</i> Talhão Final.....	76
Figura 16.	Fluxograma com as etapas realizadas para obtenção do MDE da área de estudo.	82
Figura 17.	Fluxograma com as etapas realizadas para obtenção dos talhões teóricos gerados pelo <i>script</i> “Talhões Automáticos” a partir da perda de solo da área e considerando 10000 metros como valor de largura máxima (Cenário A).	83
Figura 18.	Fluxograma com as etapas realizadas para obtenção dos talhões teóricos gerados pelo <i>script</i> “Talhões Automáticos” a partir da perda de solo da área e considerando 300 metros como valor de largura máxima.	84
Figura 19.	Fluxograma com as etapas realizadas para obtenção dos talhões a partir dos terraços gerados de acordo com a metodologia Lombardi et al. e com a metodologia de espaçamento arbitrado.	85
Figura 20.	Intervalos de confiança para as médias dos desvios verticais para as diferentes velocidades (Vel. 1, Vel. 2, Vel. 3), declividades (Dec. 0%, Dec. 5% e Dec. 10%) e sentidos (N, Ts, Td, Ps e Pd).	90
Figura 21.	Gráfico dos intervalos de confiança para as médias dos desvios verticais da interação entre declividade (00%, 05% e 10%) e sentido de deslocamento (N, Ts, Td, Ps e Pd).	91
Figura 22.	Distribuição dos valores de diferença vertical dos dados coletados na área com declividade 00%, sentido em nível (a), transversal descendente (b), transversal ascendente (c), perpendicular descendente (d) e perpendicular ascendente (e), nas diferentes velocidades.....	93
Figura 23.	Distribuição dos valores de diferença vertical dos dados coletados na área com declividade 05%, sentido em nível (a), transversal descendente (b), transversal ascendente (c), perpendicular descendente (d) e perpendicular ascendente (e), nas diferentes velocidades.....	94

Figura 24.	Distribuição dos valores de diferença vertical dos dados coletados na área com declividade 10%, sentido em nível (a), transversal descendente (b), transversal ascendente (c), perpendicular descendente (d) e perpendicular ascendente (e), nas diferentes velocidades.....	95
Figura 25.	Frequência dos valores de diferença vertical dos dados considerando as velocidades 1, 2 e 3; com valores de 2,02, 3,89 e 6,54 m.s ⁻¹ , respectivamente.	96
Figura 26.	Frequência dos valores de diferença vertical dos dados considerando as diferentes declividades.	96
Figura 27.	Frequência dos valores de diferença vertical dos dados considerando os diferentes sentidos.	97
Figura 28.	Frequência acumulada dos valores de diferença vertical para as velocidades 1, 2 e 3; com valores de 2,02, 3,89 e 6,54 m.s ⁻¹ , respectivamente.	98
Figura 29.	Frequência acumulada dos valores de diferença vertical para as diferentes declividades.	98
Figura 30.	Frequência acumulada dos valores de diferença vertical para os diferentes sentidos..	99
Figura 31.	Instalação da ferramenta computacional desenvolvida, no <i>software</i> ArcGis.	101
Figura 32.	Visualização dos <i>scripts</i> que compõem a ferramenta computacional instalada no <i>software</i> ArcGis.....	102
Figura 33.	Tela do <i>script</i> Cria Projeto.....	103
Figura 34.	Caixa de diálogo com o relatório do <i>script</i> Cria Projeto.	103
Figura 35.	Verificação das pastas e sub-pastas do projeto, criadas pelo <i>script</i> Cria Projeto.	104
Figura 36.	Tela do <i>script</i> Limpa Terraço.	104
Figura 37.	Detalhe dos pontos após filtragem realizada pelo <i>script</i> Limpa Terraço.....	105
Figura 38.	Tela do <i>script</i> MDE.	106
Figura 39.	Modelo digital de elevação criado pelo <i>script</i> MDE.	106
Figura 40.	Tela do <i>script</i> USLE.	107
Figura 41.	Raster de saída do <i>script</i> USLE, com os valores de perda de solo.	108
Figura 42.	Tela do <i>script</i> Talhão Isolado.	109
Figura 43.	Arquivos vetoriais gerados pelo <i>script</i> Talhao Isolado.	110
Figura 44.	Caixa de diálogo com o relatório do <i>script</i> Talhao Isolado.	111
Figura 45.	Tela do <i>script</i> Talhoes Automaticos.....	112
Figura 46.	Caixa de diálogo com o relatório do <i>script</i> Talhoes Automaticos.....	113
Figura 47.	Tela do <i>script</i> Talhao Manual.....	114
Figura 48.	Tela do <i>script</i> Talhao Final.....	115
Figura 49.	Visualização dos arquivos vetoriais utilizados para alimentar o <i>script</i> Talhao Final	116
Figura 50.	Caixa de diálogo com o relatório do <i>script</i> Talhao Final.....	117
Figura 51.	Sub-talhões gerados pelo <i>script</i> Talhao Final.....	118
Figura 52.	Tela do <i>script</i> Gera Linha.....	119
Figura 53.	Caixa de diálogo com o relatório do <i>script</i> Gera Linha.....	120
Figura 54.	Tela do <i>script</i> Gera Linha Final.....	121
Figura 55.	Caixa de diálogo com o relatório do <i>script</i> Gera Linha Final.....	122
Figura 56.	Tela do <i>script</i> Terraco.....	123
Figura 57.	Caixa de diálogo com o relatório do <i>script</i> Terraco.	124
Figura 58.	Tela do <i>script</i> Relatorio Final.....	124
Figura 59.	Caixa de diálogo do <i>script</i> Relatorio Final.....	125
Figura 60.	Mapa com a subdivisão inicial da área de estudo.....	126
Figura 61.	Mapa dos sub-talhões dimensionados considerando a USLE.....	127
Figura 62.	Mapa dos sub-talhões dimensionados pela metodologia USLE+L.....	128
Figura 63.	Relatório do <i>software</i> Terraço 4.0 com os resultados dos terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al.	129

Figura 64.	Relatório do <i>software</i> Terraço 4.0 com os resultados dos terraços dimensionados pela metodologia Espaçamento arbitrado.....	130
Figura 65.	Mapa dos sub-talhões dimensionados a partir dos terraços obtidos pela metodologia Lombardi Neto et al.....	131
Figura 66.	Mapa dos sub-talhões dimensionados a partir dos terraços obtidos pela metodologia espaçamento arbitrado.	132
Figura 67.	Mapa das linhas de plantio do cenário inicial.....	145
Figura 68.	Mapa das linhas de plantio geradas para baixo, dos talhões obtidos com a USLE. ..	146
Figura 69.	Mapa das linhas de plantio geradas para cima, dos talhões obtidos com a USLE.....	146
Figura 70.	Mapa com a combinação dos melhores resultados das linhas de plantio geradas nos talhões obtidos com a USLE.....	147
Figura 71.	Mapa das linhas de plantio geradas para baixo, dos talhões obtidos considerando a USLE+L.....	148
Figura 72.	Mapa das linhas de plantio geradas para cima, dos talhões obtidos considerando a USLE+L.....	148
Figura 73.	Mapa com a combinação dos melhores resultados das linhas de plantio geradas nos talhões obtidos considerando a USLE+L.....	149
Figura 74.	Mapa das linhas de plantio geradas para baixo, dos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al.....	149
Figura 75.	Mapa das linhas de plantio geradas para cima, dos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al.....	150
Figura 76.	Mapa com a combinação dos melhores resultados das linhas de plantio geradas nos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al.	150
Figura 77.	Mapa das linhas de plantio geradas para baixo, dos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Espaçamento arbitrado.	151
Figura 78.	Mapa das linhas de plantio geradas para cima, dos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Espaçamento arbitrado.	151
Figura 79.	Mapa com a combinação dos melhores resultados das linhas de plantio geradas nos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Espaçamento arbitrado.....	152
Figura 80.	Percentual de linhas de plantio dos melhores resultados de cada dimensionamento, para cada classe de comprimento.	154
Figura 81.	Localização dos terraços e talhões em nível dimensionados considerando a USLE.	157
Figura 82.	Localização dos terraços e talhões em nível dimensionados considerando a USLE+L	157
Figura 83.	Mapa com os valores de volume acumulado na linha de plantio considerando o talhão 2 dimensionado pela USLE, com sentido de geração das linhas para baixo e profundidade de sulco de 0,30 m.	158
Figura 84.	Representação dos perfis das linhas de plantio em diferentes profundidades de sulco.	159
Figura 85.	Variação de altura dos terraços dimensionados pela USLE em função das diferentes profundidades de sulco.	163
Figura 86.	Variação de altura dos terraços dimensionados considerando USLE+L, em função das diferentes profundidades de sulco.....	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Tolerância de perda de solo ($\text{Mg.ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para as principais ordens de solos, obtidos por Oliveira et al. (2008)	42
Tabela 2.	Valores de declividade de parede de terraços (D2) , adaptado de Codasp (1994).....	71
Tabela 3.	Estatística descritiva dos valores de diferença vertical observados considerando as diferentes velocidades, sentidos de levantamento e declividades.....	89
Tabela 4.	Resultados do teste de comparação de média dos resultados da interação entre declividade e sentido de levantamento.	90
Tabela 5.	Frequência acumulada dos desvios para as diferentes velocidades.	99
Tabela 6.	Frequência acumulada dos desvios para as diferentes declividades.	99
Tabela 7.	Frequência acumulada dos desvios para os diferentes sentidos.....	100
Tabela 8.	Resultados de quantidade de talhões, área média de talhões, área total dos talhões e área de carregadores dos dimensionamentos realizados.	133
Tabela 9.	Resultados de quantidade, comprimento médio e comprimento total de terraços dimensionados.	134
Tabela 10.	Resultados das linhas geradas para os talhões do cenário inicial da área de estudo..	134
Tabela 11.	Resultados das linhas geradas no sentido para baixo para os talhões dimensionados considerando a USLE.	135
Tabela 12.	Resultados das linhas geradas no sentido para cima para os talhões dimensionados considerando a USLE.	135
Tabela 13.	Combinação dos melhores resultados das linhas geradas no sentido para cima e para baixo para os talhões dimensionados considerando a USLE.....	135
Tabela 14.	Resultados das linhas geradas no sentido para baixo para os talhões dimensionados considerando a USLE+L.....	136
Tabela 15.	Resultados das linhas geradas no sentido para cima para os talhões dimensionados considerando a USLE+L.....	136
Tabela 16.	Combinação dos melhores resultados das linhas geradas no sentido para cima e para baixo para os talhões dimensionados considerando a USLE+L.	137
Tabela 17.	Resultados das linhas geradas no sentido para baixo para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Lombardi Neto et al.....	138
Tabela 18.	Resultados das linhas geradas no sentido para cima para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Lombardi Neto et al.....	139
Tabela 19.	Combinação dos melhores resultados das linhas geradas no sentido para cima e para baixo para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Lombardi Neto et al.	140
Tabela 20.	Resultados das linhas geradas no sentido para baixo para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Espaçamento Arbitrado.	141
Tabela 21.	Resultados das linhas geradas no sentido para cima para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Espaçamento Arbitrado.	142
Tabela 22.	Combinação dos melhores resultados das linhas geradas no sentido para cima e para baixo para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Espaçamento Arbitrado.	143
Tabela 23.	Quantidade de linhas de plantio dos melhores resultados de cada dimensionamento, para cada classe de comprimento.	153
Tabela 24.	Percentual de linhas de plantio dos melhores resultados de cada dimensionamento, para cada classe de comprimento.	153
Tabela 25.	Comparação da totalização quantitativa e relativa entre os melhores resultados dos dimensionamentos de linha de cada cenário e do cenário antigo.	154

Tabela 26.	Volume acumulado (m^3) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados pela USLE, com linhas geradas para baixo, em diferentes profundidades de sulco.	159
Tabela 27.	Volume acumulado (m^3) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados pela USLE, com linhas geradas para cima, em diferentes profundidades de sulco.	159
Tabela 28.	Volume acumulado (m^3) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados considerando a USLE+L, com linhas geradas para baixo, em diferentes profundidades de sulco. .	160
Tabela 29.	Volume acumulado (m^3) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados considerando a USLE+L, com linhas geradas para cima, em diferentes profundidades de sulco. ..	160
Tabela 30.	Volume acumulado por hectare ($m^3.ha^{-1}$) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados pela USLE, com linhas geradas para baixo, em diferentes profundidades de sulco.	161
Tabela 31.	Volume acumulado por hectare ($m^3.ha^{-1}$) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados pela USLE, com linhas geradas para cima, em diferentes profundidades de sulco.	161
Tabela 32.	Volume acumulado por hectare ($m^3.ha^{-1}$) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados considerando a USLE+L, com linhas geradas para baixo, em diferentes profundidades de sulco.	161
Tabela 33.	Volume acumulado por hectare ($m^3.ha^{-1}$) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados considerando a USLE+L, com linhas geradas para cima, em diferentes profundidades de sulco.	162
Tabela 34.	Altura dos terraços (metros) dimensionados pela USLE, considerando o armazenamento das linhas geradas para baixo, nas diferentes profundidades de sulco.	162
Tabela 35.	Altura dos terraços (metros) dimensionados pela USLE, considerando o armazenamento das linhas geradas para cima, nas diferentes profundidades de sulco.....	162
Tabela 36.	Altura dos terraços (metros) dimensionados pela USLE+L, considerando o armazenamento das linhas geradas para baixo, nas diferentes profundidades de sulco.	162
Tabela 37.	Altura dos terraços (metros) dimensionados pela USLE+L, considerando o armazenamento das linhas geradas para cima, nas diferentes profundidades de sulco.	163

RESUMO GERAL

RABELO, M. W. O. **Modelagem e geoprocessamento aplicado ao planejamento de sistemas agrícolas conservacionistas: Desenvolvimento de método e ferramenta computacional**. 2016. 179 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.¹

A deficiência na gestão das áreas agrícolas acarreta problemas de ordem econômica e ambiental. Muitas vezes os métodos de dimensionamento de terraços têm resultados com espaçamento horizontal reduzido, desestimulando sua adoção e ocasionando problemas de erosão, e conseqüente perda de solo, água e nutrientes. Os modelos de cálculo de perda de solo podem ser utilizados para dimensionamento destas estruturas, considerando o deslocamento de solo inferior à sua taxa de formação natural, controlando o processo erosivo. Entretanto o uso destes modelos é dificultado pela ausência de bases de dados e de ferramentas que simplifiquem sua utilização. Concomitantemente o planejamento conservacionista pode ser integrado à gestão agrônômica, possibilitando a otimização do uso da área agrícola e dos equipamentos, conciliando os aspectos econômicos e ambientais. Neste sentido o presente trabalho teve por objetivos avaliar a qualidade cartográfica de levantamentos altimétricos realizados com receptor GNSS RTK embarcado em quadriciclo; desenvolver um método de cálculo de espaçamento entre terraços em nível a partir da perda de solo calculada pela USLE; um modelo de dimensionamento de sistemas agrícolas, envolvendo a utilização dos terraços como carregadores, divisão de talhões, e geração de linhas de plantio; analisar o acúmulo de escoamento superficial nas linhas de cana de açúcar em função de diferentes profundidades de sulco e da variabilidade espacial do relevo; e finalmente, desenvolver de uma ferramenta computacional para utilização do método e modelo. Os dados altimétricos coletados com quadriciclo atenderam ao padrão de exatidão cartográfico atingindo a classe A para elaboração de produtos cartográficos com equidistância vertical de 0,30m. O método de cálculo de espaçamento entre terraços reduziu em até 83,0% o comprimento total de terraços; o modelo de dimensionamento de sistemas agrícolas possibilitou redução de até 51,6 % no número de manobras, bem como aumento do comprimento médio das linhas de plantio e redução da área destinada ao uso de carregadores, o que aumenta a eficiência de máquinas e do uso da área agrícola. A avaliação do acúmulo do volume de escoamento superficial nas linhas de plantio em função da profundidade do sulco verificou grande capacidade de armazenamento, atingindo valores de até 158,1 m³ ha⁻¹, com média de 95,8 m³ ha⁻¹ para sulcos com 0,3m de profundidade, ocasionando em uma redução de até 10,1 centímetros na altura dos terraços. A ferramenta computacional desenvolvida mostrou-se de fácil utilização, e realizou com sucesso o dimensionamento dos talhões, linhas de plantio e terraços.

¹ Orientador: Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler. EA-UFG.

GENERAL ABSTRACT

RABELO, M. W. O. **Modeling and Geoprocessing applied to the planning of conservationist agricultural systems: Development of method and computational tool.** 2016. 179 f. Thesis (Doctor in Agronomy: Soil and Water) – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. ²

The deficiency in the management of agricultural areas causes problems of economic and environmental order. Many times the terraces dimensioning methods have results with reduced horizontal spacing, discouraged their adoption and causing erosion problems, and consequently loss of soil, water and nutrients. The soil loss calculation models can be used for the design of these structures, considering the displacement of soil lower than its natural formation rate, controlling the erosive process. However, the use of these models is hampered by the lack of data bases and tools that simplify their use. Concomitantly conservation planning can be integrated into agronomic management, enabling the optimization of the use of agricultural land and of the equipments, conciliating the economic and environmental aspects. In this sense the present study aimed to evaluate the cartographic quality of altimetric surveys carried with GNSS RTK receiver onboard in quadricycle; develop a terrace in level spacing calculation method, using the soil loss calculated by USLE; a model of dimensioning agricultural systems, involving the use of terraces as rural roads, plots division, and generation and planting lines; analyze the accumulation of runoff on sugar cane lines for different furrow depths and the spatial variability of relief; and finally, develop a computational tool using the method and model. The altimetric data collected with quadricycle met the Class A pattern of cartographic accuracy, for the preparation of cartographic products with vertical equidistance of 0.30m. The terrace spacing calculation method reduced by up to 83.0% the total length of terraces; the agricultural systems dimensioning model enabled a reduction of up to 51.6% in the number of operations as well as increasing the average length of the lines and reducing the area for the use of rural roads, which increases the efficiency in the machinery use and in the use of agricultural area. The evaluation of the runoff volume accumulation in the planting lines due to the furrow depth found large storage capacity, reaching values of up to 158.1 m³ ha⁻¹, averaging 95.8 m³ ha⁻¹ to furrows with 0.3m depth, resulting in a reduction of up to 10.1 centimeters at the height of the terraces. The developed computational tool proved to be easy to use, and successfully completed the design of the plots, planting rows and terraces.

² Adviser: Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler. EA-UFG.

1. INTRODUÇÃO

A erosão é um processo natural de formação e evolução dos solos. Entretanto, com a utilização do solo além de sua capacidade suporte, o processo erosivo pode se acentuar ocasionando graves problemas como perdas de solo e nutrientes e, causar o assoreamento e a contaminação de cursos d'água, gerando impactos negativos ao setor agrícola e vários outros segmentos da sociedade (Morais, 2012). Dechen et al. (2015), salientam que os custos associados à erosão hídrica em áreas agrícolas podem ultrapassar 100 US\$ ha⁻¹ ano⁻¹, e estimam-se para o Brasil, perdas de 616,5 milhões de toneladas de terra ao ano em áreas agrícolas. Leite (2007) ressalta cerca de 1,5 bilhão de hectares, o que corresponde a aproximadamente 10% da superfície terrestre, já foram degradados por processos de erosão intensa.

Desta forma, as práticas conservacionistas, além de garantir a preservação dos recursos naturais, são importantes para assegurar a sustentabilidade ambiental e econômica das áreas agrícolas.

O agronegócio movimenta grande parte da economia brasileira, sendo o setor suco energético responsável por uma grande parcela deste mercado, movimentando 70 bilhões de reais, correspondendo a 1,3% do PIB nacional (Ramos & Nachiluk, 2015), em uma área plantada de 8,9 milhões de hectares na safra 2014/15, o que corresponde à 13,32% da área agrícola no Brasil (Conab, 2015). Este é um setor cada vez mais tecnificado, com uso de sistemas de plantio e colheita mecanizados, e com crescente utilização de sistemas de orientação e direcionamento por satélites nas máquinas agrícolas. Os altos custos de produção, aliados à característica semi-perene da cultura, exigem o planejamento e o controle dos processos envolvendo o sistema de produção. Diferente de países com predominância de regiões agrícolas planas, no Brasil o cultivo de cana-de-açúcar pode ser encontrado em áreas com declives acentuados, o que dificulta a mecanização e oferece risco de tombamento de máquinas, problemas de conservação do solo e dificulta o planejamento das áreas, em virtude da ondulação da superfície topográfica, ressaltando a importância do monitoramento dos processos erosivos e perdas de solo nas áreas agrícolas (Zamuner Filho, 2015).

Os modelos de perda de solo, capazes de estimar a quantidade de sedimentos produzida em uma área, também podem ser utilizados para avaliação de sistemas de conservação do solo. Uma possibilidade de uso destes modelos é a simulação de cenários, verificando as consequências da implantação de práticas de uso, manejo e conservação do solo, e até mesmo permitindo o dimensionamento de estruturas de conservação do solo (Sales, 1998). Neste contexto, destaca-se a *Universal Soil Loss Equation* (USLE), que no Brasil tem relativa facilidade de obtenção de seus parâmetros, quando comparada com modelos mais recentes, e apresenta bons resultados quando utilizada juntamente com modelos distribuídos adaptados às condições tropicais (Amorim et al., 2010).

Vários trabalhos, como Spekken & Bruin (2013) e Spekken et al. (2015) vêm sendo realizados com o objetivo de desenvolver ferramentas para planejamento do uso e sistematização das áreas agrícolas, observando aspectos como comprimento médio e total de linhas, melhor aproveitamento de área, menor número de manobras e menor tempo ou custo de implantação. Muitos destes trabalhos não levam em consideração as questões relacionadas à conservação do solo.

O uso de ferramentas de sistemas de informações geográficas (SIG) auxilia a utilização dos modelos de estimativa de perda de solo, bem como a realização dos dimensionamentos de terraços, talhões e linhas de plantio. Ferramentas computacionais podem ser desenvolvidas neste sistema, automatizando os processos e facilitando sua utilização e adoção por parte dos profissionais envolvidos no agronegócio.

Obviamente, para se ter maior fidelidade dos modelos em relação à realidade, várias informações são necessárias, como características do clima, solo, práticas agrícolas e do relevo. Com relação ao relevo, verifica-se a baixa disponibilidade de dados altimétricos detalhados nas áreas agrícolas, e estes sempre foram muito demandados para o planejamento e a implantação de obras, como construção de barragens, sistematização de terrenos, planejamento de estruturas para controle da erosão e conservação de estradas não pavimentadas. Além disso, o crescente aumento de áreas com adoção de agricultura de precisão aumentou esta demanda, pois os dados altimétricos também são utilizados para o planejamento das linhas de plantio, carregadores, divisão de talhões e geração de zonas de manejo.

A topografia convencional, além do seu alto custo, demanda grande quantidade de tempo para o levantamento e o processamento dos dados, o que muitas vezes torna a obtenção de dados altimétricos inviável economicamente para os produtores. Com o

desenvolvimento das tecnologias de posicionamento por satélite com correção em tempo real (GNSS RTK), a coleta de dados teve seu tempo reduzido. Não é incomum que proprietários rurais tenham essa tecnologia disponível em seus equipamentos, como tratores ou colhedoras, sobretudo em áreas de agricultura empresarial, permitindo assim que a coleta de dados altimétricos possa ser realizada sem a necessidade de investimentos ou equipamentos adicionais. Outro equipamento, menos impactante às áreas agrícolas, em virtude, principalmente de suas dimensões e peso, é o quadriciclo, muito utilizado para aumentar a agilidade em coleta de amostras de solo.

Neste trabalho, teve-se por objetivo geral, o desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de sistemas agrícolas, que de forma mais específica, envolve um método de dimensionamento de terraços a partir da perda de solo calculada pela USLE, o planejamento e dimensionamento de talhões, carregadores e de linhas de plantio; a avaliação do acúmulo de escoamento superficial nas linhas de plantio de cana-de-açúcar em função da profundidade dos sulcos; o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para utilização do modelo; e a avaliação a qualidade dos dados altimétricos coletados com receptor GNSS RTK embarcado em quadriciclo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. EROSÃO DO SOLO

A erosão do solo consiste no processo de desprendimento, arraste e deposição de partículas do solo (Sperandio et al., 2012). Na área agrícola, este processo pode ocorrer pela ação dos ventos, sendo chamado de erosão eólica, ou pela ação das chuvas ocasionando a erosão hídrica (Morais, 2012). De acordo com Camapum De Carvalho et al. (2006) a erosão também é classificada em natural ou geológica, quando atua nos processos pedogenéticos como forma natural de evolução do relevo; e antrópica ou acelerada, quando, em função da ocupação das terras pela ação humana, o equilíbrio natural é rompido e a remoção do solo é superior à sua velocidade natural de formação.

A erosão hídrica inicia-se com a incidência das chuvas, que incide sobre a vegetação ou tem impacto direto na superfície do solo, provocando aumento da umidade e redução das forças coesivas; o impacto das gotas da chuva sobre o solo ainda causa desagregação e fracionamento de partículas. O volume precipitado infiltra-se no solo, e quando a intensidade da precipitação é superior à capacidade de infiltração, inicia-se o acúmulo de água nas depressões da superfície do solo, volume este conhecido como abstrações iniciais; completada a capacidade de acúmulo superficial da água, inicia-se o escoamento superficial. O escoamento superficial ao percorrer uma encosta em sentido descendente adquire volume e velocidade, e quanto a tensão cisalhante associada ao escoamento superficial supera a tensão crítica de cisalhamento do solo, o escoamento superficial começa a não só transportar as partículas do solo, mas também desprender partículas do mesmo, transportando as partículas do solo para cotas mais baixas (Pruski, 2009d).

A erosão hídrica tem sido subdividida em três diferentes formas: laminar, em sulcos e em voçorocas. Segundo Pruski (2009d), a erosão laminar constitui a fase inicial da erosão hídrica, caracterizando-se pela remoção de finas camadas da superfície do solo, sendo quase imperceptível e muitas vezes sendo notada apenas no decorrer do tempo devido à quantidade de solo removido e à verificação dos depósitos de sedimentos transportados pelo

escoamento superficial. A erosão em sulcos se caracteriza pela formação de pequenos canais ou valas, ocorrendo em virtude da concentração do escoamento superficial o que resulta em aumento da força cisalhante do escoamento superficial. Diferentemente da erosão laminar, esta forma é facilmente perceptível em campo. Quando os sulcos atingem maiores proporções, com profundidade superior a 0,30 metros e largura superior a 1 metro, já se considera erosão em voçoroca, que consiste na fase mais avançada do processo erosivo, com grande concentração do escoamento superficial, grandes deslocamentos de solo e sérios problemas ao deslocamento de máquinas agrícolas. Essa forma de erosão pode atingir dimensões muito grandes, a ponto de inviabilizar o uso do solo.

O maior problema causado pela erosão é a degradação do solo, principalmente quanto à remoção de partículas e, conseqüentemente, de nutrientes químicos e da matéria orgânica do solo, causando redução da capacidade produtiva e refletindo em aumento dos custos de produção (Wadt, 2003). A degradação do solo causa grandes impactos financeiros e sua recuperação é uma operação bastante onerosa, conforme já destacava Galetti (1987) indicando que os processos erosivos ocasionavam uma perda de 194 milhões de toneladas de solo por ano nas áreas agrícolas do estado de São Paulo, gerando perdas de 187.791 toneladas de nitrogênio, 5.074 toneladas de fósforo e 19.523 toneladas de potássio. Além disso, Barroso & Silva (1992) destacam os problemas ocasionados pelo transporte de partículas do solo, como a contaminação dos cursos d'água, assoreamento de mananciais e redução da capacidade de armazenamento de reservatórios.

Dechen et al. (2015) avaliaram as perdas de nutrientes por erosão hídrica, chegando a perdas totais de 1,84, 3,88 e 22,46 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de Fósforo, Potássio e Cálcio, respectivamente, na condição de solo sem cobertura vegetal, totalizando uma perda com nutrientes calculada em 107,75 US\$ ha⁻¹ ano⁻¹. Trabalhos como este ressaltam não somente os prejuízos ambientais decorrentes do processo erosivo, mas os prejuízos diretos com a perda de nutrientes e os indiretos, ocasionados pela redução na produtividade em decorrência da perda de nutrientes. Deste modo, justifica-se financeiramente a adoção de sistemas conservacionistas, mesmo considerando seu custo de implantação.

Os fatores que interferem no processo erosivo são a chuva, o solo, a topografia e o uso e manejo do solo (Valle Júnior et al., 2010). Segundo Pruski (2009c), o volume de precipitação da chuva, bem como sua intensidade, duração e frequência influenciam na capacidade de promover a erosão. Esta capacidade da chuva em provocar erosão é denominada erosividade. Já a susceptibilidade do solo à erosão é denominada de

erodibilidade e depende da capacidade de armazenamento e infiltração da água no solo, e das forças de resistência do solo à ação da chuva e do escoamento superficial. Quanto ao relevo, Beskow et al. (2009), salientam que este influencia fortemente na erosão hídrica, de acordo com as variações do comprimento da encosta e da sua declividade. O uso e o manejo do solo interferem na sua cobertura, protegendo-o do impacto direto da chuva, bem como alteram a agregação e influenciam na rugosidade de sua superfície, interferindo no impacto das gotas da chuva, na infiltração da água no solo e no deslocamento do escoamento superficial. Ainda relacionado ao uso e ao manejo do solo, Castro (1993) destaca ainda a grande influência do preparo do solo e do sistema de plantio direto no processo erosivo, com destaque para as vantagens do sistema de plantio direto quanto à proteção do solo e redução das perdas por erosão.

2.2. ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial é a fase do processo erosivo responsável pelo transporte do solo e nutrientes para fora da propriedade. Desta forma, para um adequado controle da erosão e das perdas de solo, é fundamental o conhecimento do escoamento superficial no que diz respeito ao seu volume e também à vazão, sendo essencial para o projeto de estruturas de controle de erosão. Para o dimensionamento de estruturas de armazenamento do escoamento superficial, o volume escoado é o principal elemento a ser determinado (Silva et al., 2006). Existem vários procedimentos para realizar o cálculo do volume de escoamento superficial, dentre eles destacam-se o método do número da curva e o método do balanço de água na superfície do solo.

O método do número da curva foi desenvolvido em 1954 pelo Serviço Nacional de Conservação do Solo dos Estados Unidos e aprimorado ao longo dos anos (Soil Conservation Service, 1973). Segundo Machado (2006) este método é uma das ferramentas mais populares para o cálculo do escoamento superficial devido à sua relativa facilidade de uso, simplicidade e requerimento de poucos dados. A lâmina de escoamento superficial pode ser estimada a partir das equações 1 e 2 (Pruski et al., 2001a), e os valores de número da curva (CN) adaptados às condições brasileiras em função do uso e manejo da terra, grupo de solo, condição hidrológica e umidade antecedente do solo, podem ser obtidos em Pruski et al. (2004).

$$ES = \frac{(PT - 0,2 * S)^2}{(PT + 0,8 * S)} \quad \text{Equação 1}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

ES = escoamento superficial, em mm;

PT = precipitação total, em mm;

S = infiltração potencial, em mm;

CN = Número da curva (Pruski et al., 2004), adimensional.

Em 1997, Pruski et al. (1997) desenvolveram o método do balanço da água na superfície do solo, a partir de fundamentos físicos e que determina a lâmina máxima de escoamento superficial a partir da intensidade, duração e frequência das chuvas, a taxa de infiltração estável da água no solo (Tie), e considerando que o solo esteja com umidade próxima à saturação. Na Figura 1 são apresentados os componentes da equação 3, com as informações necessárias para a determinação do escoamento superficial máximo.

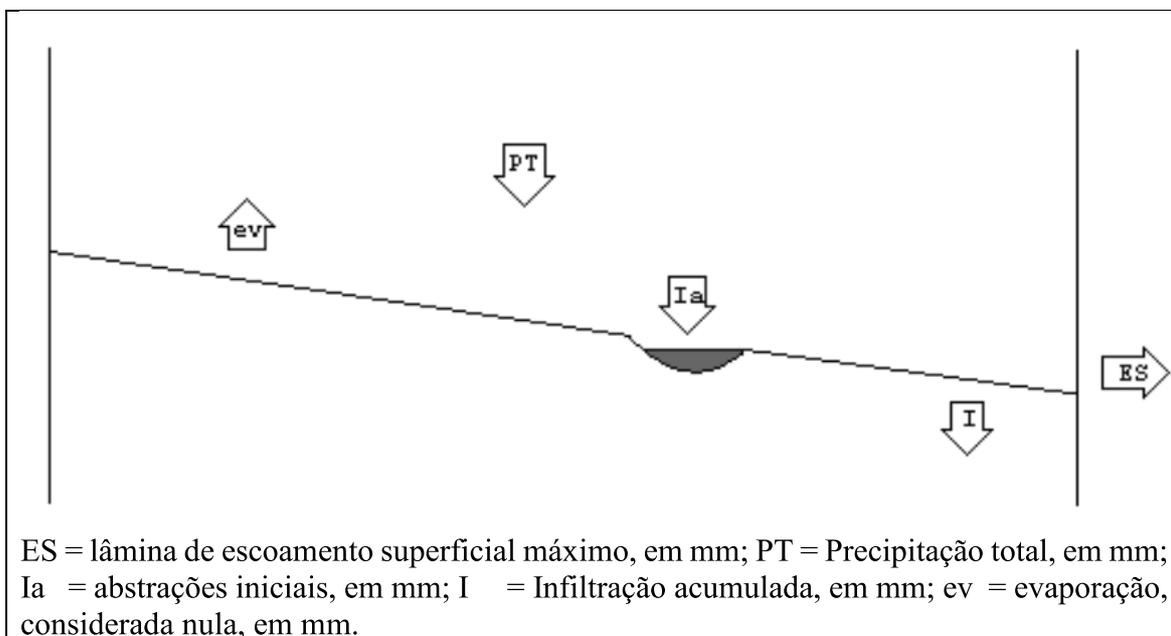


Figura 1. Componentes da equação para determinação do escoamento superficial máximo. (Pruski et al., 1997).

$$ES = PT - I_a - I - ev \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

ES = lâmina de escoamento superficial máximo, em mm;

PT = Precipitação total, em mm;

I_a = abstrações iniciais, em mm;

I = Infiltração acumulada, em mm;

ev = evaporação, considerada nula, em mm.

Conforme desenvolvido por Pruski et al. (1997), e utilizado nos trabalhos de Griebeler et al. (2001) e Pruski et al. (2001a), a precipitação total pode ser determinada pela equação 4.

$$PT = \frac{Im \cdot t}{60} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

Im = Intensidade máxima média da precipitação, em mm h^{-1} ;

t = duração da precipitação para a máxima lâmina de escoamento superficial, em minutos.

A intensidade máxima média por sua vez pode ser obtida pela equação 5.

$$Im = \frac{K \cdot T^a}{(t + b)^c} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

K, a, b, c = parâmetros da equação de chuvas intensas, adimensionais.

T = período de retorno, em anos.

Substituindo a equação 5 na equação 4 e derivando em relação ao tempo, obtém-se a intensidade da precipitação instantânea (I_i), em mm h^{-1} no instante “ t ”, obtendo a equação 6:

$$Ii = Im \left(1 - \frac{c \cdot t}{t + b} \right) \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

Ii = Intensidade da precipitação instantânea, em mm.h^{-1}

De acordo com Pruski et al. (1997) o escoamento superficial máximo ocorre no momento em que a intensidade de precipitação instantânea (Ii) se iguala à taxa de infiltração estável da água no solo (Tie), uma vez que a intensidade máxima instantânea tem comportamento exponencial decrescente em relação ao tempo. Assim, por meio do método de convergência de Newton-Raphson, determina-se o tempo de duração da chuva até que a intensidade instantânea seja igual à taxa de infiltração estável da água no solo (equação 7). Em seguida utilizando-se a equação 5, calcula-se a intensidade máxima média da precipitação (Im), e com a equação 4, o valor da precipitação total (PT).

$$Im \left(1 - \frac{c \cdot t}{t + b} \right) - Tie = 0 \quad \text{Equação 7}$$

As abstrações iniciais, segundo Pruski et al. (2004), correspondem à precipitação ocorrida até o início do escoamento superficial, e dependem da interceptação da chuva pelas plantas, do armazenamento nas pequenas depressões do solo e da infiltração que antecede o escoamento superficial. Para seu cálculo pode ser utilizado o número da curva, conforme a equação 8.

$$Ia = 50,8 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad \text{Equação 8}$$

O intervalo de tempo compreendido entre o início da chuva e o início do escoamento superficial corresponde ao tempo associado à ocorrência das abstrações iniciais. A aplicação do método de convergência de Newton-Raphson na equação 9 permite encontrar este valor de tempo.

$$\frac{1}{60} * \frac{K * T^a * t_{ia}}{(t_{ia} + b)^c} = Ia \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

t_{ia} = tempo compreendido entre o início da chuva e o início do escoamento superficial, em minutos;

As abstrações iniciais já consideram a infiltração ocorrida até o início do escoamento superficial, deste modo esta infiltração não é considerada no cálculo da infiltração total. A duração da infiltração (t_{inf}) é obtida subtraindo-se o tempo das abstrações iniciais (t_{ia}) do valor de duração da precipitação para a máxima lâmina de escoamento superficial (t). Assim, a infiltração total pode ser calculada a partir da equação 10, e possibilitando o cálculo da lâmina de escoamento superficial máximo (ES).

$$I = \frac{Tie * t_{inf}}{60} \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

t_{inf} = duração da infiltração, em minutos.

A rugosidade do solo ou micro relevo, incluindo a provocada por implementos agrícolas durante o preparo do solo tem grande influência na quantidade de água que pode ser mantida no solo como lâmina armazenada superficialmente; além disto esta propriedade é dinâmica e sofre grande influência do uso e manejo do solo (Rodrigues, 1999). As abstrações iniciais já consideram esta lâmina armazenada superficialmente, em função dos valores de número da curva que já levam em consideração o uso e o manejo do solo, dentre outros fatores. De acordo com Pruski et al. (2001a), quando do desenvolvimento do método do número da curva, as abstrações iniciais representam aproximadamente 20% da capacidade máxima de infiltração da água no solo.

A sistematização do terreno influencia diretamente no micro relevo, podendo aumentar a capacidade de armazenamento superficial e influenciar a lâmina de escoamento superficial máximo. Segundo Silva et al. (2006) o cálculo do volume de armazenamento superficial é dificultoso, e esta dificuldade levou ao desenvolvimento do método do número da curva por parte do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. O desenvolvimento de novas tecnologias como sistemas de medição de relevo com resoluções espaciais da ordem de milímetros, conforme trabalhos desenvolvidos por Huang & Bradford (1992), aliadas à metodologias de planejamento de sistematização de áreas agrícolas, como em trabalhos realizados por Lionço et al. (2010) e interferências planejadas no micro relevo,

como em trabalhos desenvolvidos por Planchon et al. (2002) e Kamphorst et al. (2000), possibilitam o cálculo de volume de armazenamento superficial resultante de alterações planejadas no manejo do solo que podem reduzir a lâmina de escoamento superficial máximo.

Outra influência do cálculo da lâmina de escoamento superficial máximo foi analisada por Pruski et al. (2001b). Os autores verificaram a influência da interceptação da chuva pela cobertura vegetal no volume de escoamento superficial. Além disso, também realizaram o cálculo do armazenamento superficial a partir do método empírico proposto por Onstad (1984), considerando a rugosidade randômica estimada pela equação proposta por Alberts et al. (1995).

2.3. MODELOS PARA ESTIMAR A PERDA DE SOLO

Modelos para estimar a perda de solo tem como finalidade calcular a perda de solo em determinadas condições, também chamadas de agentes controladores do processo erosivo, e permitem determinar um limite de perda de solo e verificar em quais situações este limite será atingido, ou calcular qual será a perda de solo da área de estudo para determinada situação (Guerra, 1998).

Os modelos de perda de solo normalmente integram características relacionadas ao tipo de solo e sua forma de utilização, bem como características do relevo e do clima. Alguns integram também variáveis relacionadas às características químicas e a quantidade de água contida no solo. Podem ser classificados basicamente em três tipos: empíricos ou estatísticos, conceituais e físicos. Um método de modelagem de perda de solo pode apresentar módulos que se enquadrem a diferentes tipos de modelo (Amorim et al., 2009).

Os modelos empíricos são baseados primeiramente em análise de observações buscando representar as respostas dos dados observados. Buscam um relacionamento estatístico entre os resultados coletados e o conjunto de variáveis dependentes, a priori, sem relação com os processos físicos envolvidos no processo erosivo. São menos exigentes em termos computacionais e de dados, assim estes modelos incorporam um pequeno número de variáveis. Segundo Pereira (2010) os modelos empíricos são limitados pela homogeneidade das variáveis na área de estudo, pois desconsideram a heterogeneidade das contribuições e das características locais (como precipitação, tipo de solo, uso do solo e declividade). Além

disso os modelos empíricos consideram que a condição estudada permanece imutável durante o período de estudo.

Quando são baseados na compartimentação de uma bacia hidrográfica, incorporando a transferência do escoamento e dos sedimentos entre compartimentos subjacentes, gerando caminhos de sedimentos na bacia, os modelos são considerados como conceituais (Amorim et al., 2009). Estes modelos buscam descrever matematicamente as características estruturais e os processos que interferem na erosão.

Os modelos físicos baseiam-se na solução de equações físicas que descrevem a geração de escoamento e sedimentos, com um modelo matemático que descreva os sub processos de desagregação pelo impacto da gota, desagregação pela enxurrada, transporte pelas gotas (salpico) e transporte pela enxurrada. São modelos mais complexos, e incorporam um grande número de variáveis. Segundo Merritt et al. (2003) as equações utilizadas em tais modelos são as equações de conservação da massa e momentum para o escoamento superficial e a equação de conservação de massa para produção de sedimento.

Os modelos podem considerar uma situação pontual, com um conjunto de parâmetros considerados constantes para a área de estudo ou, podem considerar a variação espacial dos parâmetros e dos resultados, sendo classificados como modelos distribuídos. Estes modelos possibilitam ainda relacionar a morfologia do terreno com os parâmetros de escoamento definidores da erosão (Oliveira, 2011).

Quando há limitação na disponibilidade de dados, os modelos de maior complexidade tendem a apresentar resultados inferiores aos modelos mais simples. Da mesma forma, os modelos conceituais ou empíricos, quando utilizados em condições próximas às que foram desenvolvidos, tendem a apresentar melhores resultados.

Como exemplos de modelos para estimativa de perda de solo, tem-se a USLE (Wischmeier & Smith, 1972a), RUSLE (Renard et al., 1997), WEPP (Flanagan et al., 1995), KINEROS (Woolhiser et al., 1990; Smith et al., 1995), LISEM (De Roo & Offermans, 1995), e SWAT (Arnold et al., 1998). Em sequência, são apresentados detalhes de alguns modelos para estimativa de perda de solo utilizados no Brasil, com destaque para a USLE, objeto de estudo do presente trabalho.

2.3.1. Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)

Segundo Amorim (2004), a Equação Universal de Perda de solo (EUPS), ou *Universal Soil Loss Equation* (USLE) foi desenvolvida em 1950 por W. H. Wischmeier, D. D. Smith e outros pesquisadores do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e publicada no “Agricultural Handbook n.282” (Wischmeier & Smith, 1972b). É um modelo empírico, utilizado para estimar as perdas por erosão, a partir de valores que representam o clima, a topografia e o tipo, o uso e o manejo do solo.

Como características da USLE, destaca-se seu grande uso para planejamento de uso de áreas, pois tem como resultado o valor de perda de solo anual expresso em $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, bem como o número reduzido de informações necessárias para alimentar o modelo. Entretanto por se tratar de um modelo empírico, este obtém melhores resultados se utilizado em condições próximas às que os fatores que alimentam o modelo foram determinados. Além disso, não contempla os processos de deposição, chuvas isoladas e erosão em sulcos mais avançadas. Sua aplicação é mais voltada para planejamento de encostas, de modo que seu uso em bacias hidrográficas é limitado (Amorim et al., 2009). O modelo pode ser descrito pela equação 11.

$$A = R.K.L.S.C.P$$

Equação 11

Em que:

A = taxa média anual de perda de solo, em $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$;

R = fator erosividade da chuva, em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$;

K = fator erodibilidade do solo, em $\text{Mg ha}^{-1}/(\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1})$;

L = fator de comprimento de encosta, m;

S = fator de declividade de encosta, %, graus ou m m^{-1} ;

C = fator de uso e manejo do solo, adimensional, e

P = fator de práticas conservacionistas, adimensional.

2.3.1.1. Fator erosividade (R)

A erosividade expressa a capacidade que a chuva que ocorre em uma dada localidade, tem de causar erosão (Bertoni & Lombardi Neto, 2010a). De acordo com Pedroso

et al. (2003), quando todos os fatores da equação, com exceção da erosividade, são mantidos constantes, as perdas de solo são proporcionais à esta. Segundo Nogueira et al. (2007), a erosividade pode ser medida a partir da precipitação total, intensidade da chuva, momento e energia cinética.

Wischmeier & Smith (1958) consideram o índice de intensidade da chuva (EI_{30}), obtido a partir da energia cinética total da chuva (E_c) e da intensidade máxima em 30 minutos (I_{30}) como o parâmetro que mais expressa o seu potencial erosivo. Segundo os autores, o índice de intensidade da chuva é capaz de expressar de 72 a 97% das perdas de solo causadas pelas chuvas, além de considerar as fases de impacto da gota, turbulência do escoamento, desagregação e o transporte de partículas de solo. Entretanto em regiões tropicais o índice de intensidade da chuva pode subestimar a erosividade (Lal, 1976), o que levou ao desenvolvimento de outros índices que podem ser associados à erosividade, como o índice $KE > 25$, desenvolvido por Hudson (1965) pra chuvas com intensidade superior à 25 mm h^{-1} .

De acordo com Bertoni & Lombardi Neto (2010a) os dados pluviográficos para elaboração do índice EI_{30} são bastante escassos em várias regiões do mundo. Os autores salientam que, no Brasil, além de escassos, quando os dados estão disponíveis, em sua maioria são provenientes de estações pluviométricas, disponibilizando apenas a precipitação mensal ou diária e não raramente apresentam intervalos sem registro. Em consequência, vários trabalhos propuseram equações de índice de intensidade de chuva utilizando dados pluviométricos, como trabalhos desenvolvidos por Bertoni & Lombardi Neto (2010a), Lombardi Neto & Moldenhauer (1992), Silva et al. (1997b), Val et al. (1986), Morais et al. (1991) entre outros.

A escolha do modelo de cálculo do EI_{30} a partir de dados pluviométricos é determinada pelas características fisiográficas da região. Em Goiás, Silva (2004) recomenda a utilização da equação 12 para obtenção do índice mensal, e da equação 13 para obtenção do índice anual, propostas por Morais et al. (1991)

$$EI_{30} = 36,849 * \left(\frac{M_x^2}{P} \right)^{1,0852} \quad \text{Equação 12}$$

$$R = \sum_{i=1}^{12} (EI_{30})_i \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

EI_{30} = média mensal do índice de erosão, em $MJ\ mm.ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$;

M_x = Precipitação média mensal, em mm;

P = precipitação média anual, em mm;

R = Estimativa do fator erosividade, em $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$.

2.3.1.2. Fator erodibilidade (K)

A erodibilidade representa a resistência do solo à erosão hídrica, expressa em $Mg\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}.mm^{-1}$ e sofre variações de acordo com as características do solo, como as mineralógicas, químicas, físicas e morfológicas (Amorim et al., 2009). De acordo com Wischmeier & Smith (1978b) estas características são as que afetam a taxa de infiltração da água no solo, a permeabilidade, a capacidade total do armazenamento de água, a resistência à dispersão do solo, salpico, abrasão e o seu transporte pelo escoamento.

O valor da erodibilidade pode ser obtido através de métodos diretos e métodos indiretos. Para obtenção da erodibilidade com métodos diretos, são implantadas parcelas experimentais padronizadas com preparo de solo convencional morro abaixo, e mantido descoberto, de maneira que os fatores da USLE tenham os seguintes valores: comprimento de rampa de 22,1m, declividade de 9%, fator uso do solo com valor 1, manejo do solo com valor 1, de modo que o fator K seja ajustado em função do índice de erosividade, que pode ser resultado de chuvas naturais medidas ou de chuvas simuladas, e dos valores de perda de solo (Amorim et al., 2009). Estes métodos demandam altos custos e vários anos de coleta de dados, e em virtude disto, vários autores desenvolveram modelos de estimativa da erodibilidade do solo (Mannigel et al., 2002).

O primeiro modelo de estimativa da erodibilidade foi desenvolvido por Wischmeier et al. (1971), que consiste em um nomograma baseado na combinação das propriedades físicas dos solos e na percentagem de matéria orgânica. Entretanto alguns modelos não apresentaram bons resultados quando aplicados em solos tropicais, devido às diferenças texturais e à grande heterogeneidade do comportamento dos solos tropicais (Poloni, 2010). Neste sentido, diversos autores vêm trabalhando no desenvolvimento e verificação de modelos de estimativa de erodibilidade ajustados aos solos tropicais e aos

solos brasileiros, como Lombardi Neto & Bertoni (1975), Baptista & Eid (2000), Mannigel et al. (2002), Silva et al. (2000), e Denardin (1990).

Demarchi et al. (2014) obtiveram os valores de erodibilidade de solos de uma bacia hidrográfica na região centro-oeste do estado de São Paulo, bem como os valores de tolerância de perda destes solos. Assim, estes autores geraram dados que podem ser utilizados para estimar e avaliar a perda de solo na região a partir da USLE, favorecendo o planejamento de uso e ocupação do solo. Seguindo a linha de trabalhos envolvendo a geração de base de dados para utilização dos modelos de perda de solo, Baptista & Eid (2000) compararam quatro métodos de determinação da erodibilidade dos grandes grupos de solos do Distrito Federal. Segundo os autores, o método do nomograma de Wischmeier foi o que gerou resultados mais próximos dos valores obtidos experimentalmente.

2.3.1.3. Fator uso e manejo (C)

O fator C representa o grau de proteção médio à erosão fornecido pelo uso e pelo manejo do solo. Os primeiros trabalhos elucidando este fator foram realizados por Wischmeier & Smith (1958), que dividiram o estágio de desenvolvimento das culturas em cinco períodos: Período D (preparo do solo), que compreende o estágio do preparo do solo até o plantio; Período 1, que compreende os 30 dias após o plantio; Período 2, que compreende o intervalo entre os dias 30 e 60 após o plantio; período 3 que compreende o período dos 60 dias após o plantio até a colheita e período 4, que compreende o período entre a colheita e o próximo preparo do solo.

Cada período tem uma razão de perda de solo para cada cultura, e estes são combinados com a porcentagem de distribuição do índice de erosão (EI_{30}) para determinado local. Desta forma, pode-se determinar o fator C levando em consideração diferentes culturas, a rotação de culturas, e a influência do manejo do solo, considerando a variação temporal do índice de erosão, conforme detalhado em Bertoni & Lombardi Neto (2010b).

Amorim et al. (2009) destacam que devido a complexidade de obtenção de valores de referência do fator C, poucos são os trabalhos envolvendo a determinação deste para as diferentes culturas, como os trabalhos de Bertoni & Lombardi Neto (2010b), Renard et al. (1997) e Renard & Ferreira (1993).

2.3.1.4. Fator práticas conservacionistas (P)

O fator P expressa a relação entre a intensidade esperada das perdas com determinada prática conservacionista e aquela esperada quando a cultura está plantada no sentido da declividade da encosta. As práticas mais comuns são o plantio morro abaixo, o plantio em contorno, sistemas de terraceamento e o uso de cordões de vegetação permanente. Para áreas terraceadas, o valor de P deverá ser o mesmo do plantio em contorno, uma vez que reduzindo a extensão da rampa, a perda de solo é reduzida pela raiz quadrada do seu comprimento (Bertoni & Lombardi Neto, 2010b).

2.3.1.5. Fatores comprimento de rampa (L) e declividade do terreno (S)

A distância percorrida pelo escoamento superficial, bem como a declividade da encosta na qual o escoamento superficial se desloca têm influência na intensidade da erosão hídrica. Deste modo, o fator LS é adimensional, e expressa a intensidade com a qual estas características da encosta influenciam no processo erosivo, podendo ser considerados conjuntamente ou calculados de forma isolada (Amorim, 2004).

Wischmeier & Smith (1978b) desenvolveram a equação 14 para o cálculo do fator LS:

$$LS = \left(\frac{L}{22,13} \right)^{ms} * (65,41 \sin^2 S + 4,56 \sin S + 0,065) \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

L = Comprimento do declive (Fator L), em metros;

S = Declividade (Fator S), em graus;

ms = coeficiente de ajuste dependente da declividade do terreno, admitindo-se 0,5 para declividade maior ou igual a 5%; 0,4 para declividade de 3,5 a 4,5%; 0,3 para declividade de 1 a 3% e 0,2 para declividade menor que 1%.

Em seguida, Foster et al. (1981) converteram a equação para o uso do sistema internacional de unidades métrico e eliminaram a necessidade de um coeficiente de ajuste dependente da declividade do terreno, obtendo a equação 15:

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{100} [1,36 + (0,97 * S) + (0,1385 * S^2)] \quad \text{Equação 15}$$

No Brasil, Bertoni (1959) determinou duas equações para calcular as perdas médias de solo, uma em diferentes declives (equação 16) e outra para diferentes comprimentos de rampa (equação 17). Para as condições-padrão, a partir destas equações, pode-se calcular o fator LS com uso da equação 18 (Bertoni & Lombardi Neto, 2010b).

$$T1 = 0,145 * D^{1,18} \quad \text{Equação 16}$$

$$T2 = 0,166 * C^{1,63} \quad \text{Equação 17}$$

$$LS = 0,00984 * C^{1,63} * D^{1,18} \quad \text{Equação 18}$$

Em que:

T1 = perdas de solo, em Kg (unidade de largura)⁻¹ (unidade de comprimento)⁻¹;

T2 = perdas de solo, em Kg (unidade de largura)⁻¹;

D = declividade do terreno, em porcentagem;

C = comprimento de rampa, em metros.

De acordo com Bertoni & Lombardi Neto (2010b) o uso de um gradiente médio pode subestimar as perdas de solo em declives convexos e superestimar aquelas em declives côncavos. Para declive côncavo, a deposição do material ocorre na parte inferior, devendo-se utilizar como comprimento e grau de declive a parte superior a partir do ponto onde o solo começa a depositar. Em áreas com variação de declividade, a parte mais declivosa deve ser utilizada para representar o declive de todo comprimento. Segundo Amorim (2004) o fator LS pressupõe declives essencialmente uniformes, desconsiderando a ocorrência de encostas côncavas ou convexas, constituindo numa das grandes limitações da USLE.

Atualmente existem modelos que calculam o fator LS considerando a variabilidade espacial do relevo, bem como o efeito de declives côncavos ou convexas e a variação do declive de uma área. Este assunto será abordado posteriormente no item 2.4.

2.3.2. Equação Universal de Perda de Solo Revisada (EUPS-R)

Devido à base totalmente empírica da USLE, sua aplicação é limitada aos ambientes com condições edafoclimáticas próximas às condições nas quais o modelo foi desenvolvido. Na década de 1970 foram incorporados conceitos de modelagem da erosão baseados na descrição do processo físico, originando a Equação Universal de Perda de Solo

Revisada (EUPS-R) ou *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE), desenvolvida por Renard et al. (1997), que embora incorpore processos físicos, ainda é considerada uma equação de base empírica (Amorim et al., 2010).

Embora mantenha os mesmos fatores da USLE, na RUSLE os métodos de obtenção dos fatores foram alterados. No fator R foram incluídos valores para áreas com relevo suave em regiões de elevado índice pluviométrico, e a distribuição sazonal do índice de erosividade passa a considerar 24 períodos, correspondentes ao primeiro e décimo sexto dia de cada mês. O fator K passou a contemplar novos tipos de solos com dados de erodibilidade de diferentes partes do mundo, e como consequência da erosividade quinzenal. O fator K também incorporou estas alterações de intervalo de tempo para o valor do K anual. O fator LS passa a permitir o seccionamento da encosta, possibilitando o cálculo da perda de solo considerando a irregularidade da encosta, como côncava, convexa ou complexa (Amorim, 2004).

O fator C sofreu grandes modificações na RUSLE, sendo definido como a média da razão das perdas de solo, caracterizadas como o uso prévio do solo, a cobertura do solo pela copa da cultura, cobertura da superfície do solo por resíduos, rugosidade da superfície do solo e a sua umidade (Renard et al., 1997). No fator C, também foi considerada a influência de fragmentos de rochas na superfície do solo. Deste modo, possibilitou-se a utilização do modelo em situações não contempladas pela USLE, bem como expressar a variabilidade temporal do fator C.

Amorim et al. (2009) destacam que o fator P sofreu alterações principalmente ao considerar o efeito dos terraços agrícolas em criar uma grande variedade de condições de cultivo, o cultivo em contorno como uma função da altura dos camalhões, do número de sulcos e da erosividade da chuva. Estas alterações foram fundamentadas na teoria do desprendimento e transporte de sedimentos.

Verifica-se que a RUSLE incorporou conceitos de base física para determinação de alguns de seus componentes, obtendo resultados mais próximos à realidade, porém esta metodologia ainda apresenta base empírica, limitando sua aplicação para outras condições edafoclimáticas, e embora considere o desprendimento e o transporte de sedimentos, a RUSLE não considera o processo de deposição de sedimentos, limitando sua atuação em grandes áreas.

2.3.3. Water Erosion Prediction Project (WEPP)

O *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) é um projeto iniciado em 1985, com o objetivo de desenvolver uma nova geração de tecnologia para previsão de perda de solo, capaz de estimar a perda, transporte e deposição de sedimentos baseado em processos físicos (Flanagan et al., 2007). O WEPP inclui os processos hidrológicos de precipitação, infiltração, escoamento superficial, desprendimento, transporte e deposição de sedimentos, tanto em encostas quanto em bacias hidrográficas (Flanagan et al., 1995).

De acordo com Amorim et al. (2009), o WEPP apresenta seis componentes, são eles:

a. O componente erosão do solo quantifica os processos de desprendimento, transporte e deposição de partículas utilizando a equação da continuidade constante de sedimentos.

b. O componente hidrológico calcula as forças e energias envolvidas nos processos hidrológicos, envolvendo o clima (a partir de dados diários ou dados gerados por um gerador climático estocástico); a hidrologia de superfície e sub superfície, que calcula a infiltração, o excesso de precipitação e acúmulo de água em depressões; e a hidrologia de inverno, que engloba o congelamento do solo, acúmulo e derretimento de neve.

c. O crescimento diário da cobertura vegetal, bem como a produção de resíduos são calculados pelo componente crescimento de planta e de decomposição de resíduos, utilizando como parâmetros a altura e cobertura da copa, biomassa vegetal acima e abaixo da superfície do solo, índice de área foliar, entre outras.

d. O componente balanço hídrico é fundamental para a determinação da infiltração, escoamento superficial e do valor de tensão cisalhante do escoamento superficial; para este componente, são necessários dados provenientes dos outros componentes, utilizando a equação descrita por Savabi & Williams (1995) para calcular o conteúdo de água no solo na zona radicular do dia estudado.

e. O componente hidráulico do escoamento superficial calcula a tensão de cisalhamento do escoamento superficial, influenciado pelos resíduos na superfície do solo, pela cobertura vegetal, pelo tipo de solo, entre outros, obtendo o valor da energia do escoamento superficial capaz de causar o desprendimento de partículas.

f. O componente solo considera as propriedades do solo e suas variações temporais, como a rugosidade randômica, densidade, condutividade hidráulica, tensão crítica de cisalhamento e erodibilidade no sulco e entressulcos (Laflen et al., 1991).

O WEPP permite prever os valores de desprendimento, transporte e deposição de sedimentos de forma bastante precisa, inclusive com cálculos diários. Além disso, uma grande vantagem deste modelo é a possibilidade de se trabalhar tanto em encostas quanto em bacias hidrográficas. Por ser um modelo baseado nos princípios físicos do processo de erosão, sua aplicação em situações diferentes das quais foi desenvolvido se torna mais confiável que os modelos empíricos. Entretanto o modelo necessita de um grande número de parâmetros, o que dificulta sua aplicação em áreas com carência de disponibilidade de dados (Amorim et al., 2009).

2.3.4. Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS)

O KINEROS é um modelo físico orientado a eventos que descrevem os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão em pequenas bacias hidrográficas (Pereira, 2010). Neste modelo, a bacia hidrográfica é subdividida em um conjunto de encostas e canais, porém encostas irregulares não podem ser simuladas uma vez que o modelo assume a regularidade das encostas subdivididas. Por outro lado, as variações espaciais da precipitação, infiltração, escoamento e dos parâmetros da erosão podem ser consideradas.

Segundo Silva (2002) uma característica importante deste modelo é a utilização de ondas cinemáticas para simular o escoamento superficial, quando a intensidade da precipitação torna-se superior à capacidade de infiltração, ocorrendo o empoçamento e após o preenchimento do armazenamento superficial. O modelo também utiliza o modelo de ondas cinemáticas para representar o escoamento no canal, e estes por sua vez podem receber contribuição lateral de escoamento superficial em um ou nos dois lados.

Uma versão atualizada do Kineros é o Kineros2, ou K2, que tem como modificação a redistribuição da umidade do solo durante a chuva e a capacidade de comportar mais de um pluviógrafo. Este modelo conta ainda com o desenvolvimento de uma ferramenta baseada em software de geoprocessamento, o que automatiza a parametrização da bacia hidrográfica e sua segmentação em diversas encostas e canais (Goodrich et al., 2012).

Embora este modelo dependa de muitos dados para calcular a perda de solo, este necessita de uma quantidade menor de informações do que o WEPP, o que pode facilitar utilização, bem como o fato de ser um modelo de base física, o que proporciona bons resultados mesmo se utilizado em ambientes diferentes dos quais foi desenvolvido. Sua utilização em grandes bacias é limitada devido à dificuldade na segmentação e divisão de encostas e canais em grandes áreas, porém este aspecto sofreu grande melhora com o uso de sistemas de informação geográficas e a automatização do processo de segmentação da bacia com o desenvolvimento do KINEROS2.

2.3.5. Utilização e comparação dos modelos de estimativa de perda de solo

Diversos trabalhos compararam os resultados dos diferentes modelos de estimativa de perda de solo. Devido à baixa disponibilidade de dados no Brasil, verifica-se maior ocorrência de trabalhos avaliando os resultados da USLE, e quando se tem dados suficientes, alguns trabalhos utilizaram os resultados dos modelos USLE, RUSLE e WEPP. Também é importante ressaltar o crescente número de trabalhos cujo objetivo é gerar dados que possam ser utilizados pelos modelos, principalmente os modelos mais recentes que demandam maior quantidade de informações.

Paes et al. (2010) realizaram a espacialização da perda de solo calculada pela USLE, nas bacias hidrográficas do município de Santa Rita do Sapucaí, estado de Minas Gerais, e compararam os resultados com os valores de potencial natural de erosão dos solos da região, demonstrando a importância do uso destas ferramentas para o planejamento regional. Verificou-se grandes áreas com alto potencial de perda de solo, ocupadas com uso e manejo do solo inadequados o que proporcionou perdas de solo significativas. Os autores verificaram que 45% das áreas apresentaram perda de solo abaixo de $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, porém em 21% das áreas verificou-se perda de solo muito alta, acima de $200 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Valle Júnior et al. (2010) utilizaram a USLE para verificar o potencial de erosão em uma bacia hidrográfica no município de Uberaba, Minas Gerais. Verificou-se que 37% das áreas da bacia hidrográfica sofreram perda de solo acima do limite de tolerância, sendo 12% solos profundos e 25% em solos muito profundos. Os autores destacaram ainda que a utilização destas ferramentas favorece a adoção de ações efetivas quanto à conservação dos solos da bacia hidrográfica.

Augusto et al. (2012) utilizaram a USLE para estimar a perda de solo e identificar áreas susceptíveis à erosão em uma sub-bacia hidrográfica no município de Montes Claros, Minas Gerais, e obtiveram perda de solo média de $33,62 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Os autores puderam verificar a influência de regiões com alta declividade, uso do solo com baixa cobertura por vegetação e solos mais susceptíveis ao processo erosivo, no aumento das perdas de solo.

Pereira (2010) aplicou o modelo SWAT utilizando ferramentas de geoprocessamento em uma bacia hidrográfica no município de Santa Rita do Sapucaí, estado de Minas Gerais, obtendo os valores de perda de solo por erosão hídrica mensal. O autor avaliou 17 cenários, 12 cenários mensais, 2 considerando diferentes tipos de solo como únicos na bacia hidrográfica, e 3 variações de uso do solo, nas diferentes unidades de resposta hidrológica da bacia hidrográfica. O autor verificou grande incremento nas perdas de solo nos meses de maior precipitação, bem como maiores perdas considerando o uso do solo como milho, se comparado à pastagem, e os menores valores foram obtidos considerando o uso do solo como mata.

Corrêa et al. (2007) avaliaram os resultados do uso da RUSLE para estimativa de erosão em estradas florestais, em diferentes condições de solo e relevo, em quatro perfis de solo. A análise estatística verificou alta correlação entre os tratamentos avaliados e os valores estimados pela RUSLE, indicando o uso da RUSLE para estimativa de perdas de solo em estradas. A RUSLE superestimou a perda de solo em quase todas as áreas, e nas duas áreas em que ocorreu subestimativa da perda de solo, esta variação não foi significativa. Os menores índices de correlação entre perda de solo real e estimada foram referentes às perdas de solo nas áreas de contribuição de escoamento superficial das estradas, enquanto as perdas de solo considerando a estrada mais a área de contribuição obtiveram maior índice de correlação.

Ihlenfeld (1996) obteve os parâmetros básicos do modelo WEPP para um Latossolo Vermelho Escuro argiloso, com implantação de parcelas padrão no município de Ponta Grossa, Paraná. O autor obteve os valores de referência de diversos parâmetros do modelo, destacando a erodibilidade entre sulcos, a erodibilidade em sulcos e a tensão crítica de cisalhamento do solo, que obtiveram valor de $562,500 \text{ Kg s}^{-1} \text{ m}^{-4}$, $0,0236 \text{ s m}^{-1}$ e $1,19 \text{ Pa}$ respectivamente, com eficiência de calibração de 0,786. Este trabalho mostra a necessidade de se gerar dados de referência para utilização dos modelos de perda de solo mais recentes, já que a falta de dados representa a maior barreira para sua utilização.

Cecílio et al. (2009) avaliaram a estimativa de perda de solo calculada pela RUSLE e pelo WEPP, em uma microbacia hidrográfica com área de 3,99 hectares no município de Viçosa, Minas Gerais. Para a perda de solo calculada pelo WEPP, foram utilizadas duas condições, uma considerando a condutividade hidráulica do solo igual à taxa de infiltração estável (cenário A) e outra calculada por procedimentos internos do WEPP (cenário B). A perda de solo medida foi de $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a bacia; e a perda de solo calculada pela RUSLE foi a que obteve valor mais próximo, com $140 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; o cenário A do WEPP obteve o valor de $0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e o cenário B superestimou a perda de solo, com $300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Estes resultados mostram que os procedimentos internos do WEPP devem ser cuidadosamente utilizados para condições brasileiras.

Amorim et al. (2010) avaliaram o desempenho dos modelos de estimativa de perda de solo USLE, RUSLE e WEPP em diferentes regiões do Brasil. Os autores verificaram que em 46% das regiões o WEPP apresentou estimativas mais precisas, seguido pela RUSLE com 42% e a USLE com 12% de regiões com melhor precisão. Além disso, os indicadores estatísticos apontaram melhor desempenho do WEPP quando comparados aos demais, nas diferentes regiões, o que reforça o maior potencial deste modelo, quando se tem base de dados disponível, em realizar estimativas de perda de solo, principalmente devido ao fato de ser embasado em processos físicos, diferente dos outros modelos. A RUSLE apresentou eficiência de 49%, valor próximo ao obtido pelo WEPP, que obteve 50%, enquanto a USLE apresentou apenas 27%. Constatou-se também que todos os modelos apresentaram médias de estimativas estatisticamente superiores à média de perda de solo obtida experimentalmente, o que qualifica a utilização dos modelos para o planejamento de práticas conservacionistas, mesmo que estas estejam superdimensionadas.

2.4. GEOPROCESSAMENTO E MODELOS DE PERDA DE SOLO

O crescente acesso às ferramentas computacionais de geoprocessamento, possibilitou o aumento dos estudos considerando a variabilidade espacial dos fatores e variáveis utilizados pelos modelos de perda de solo. Alguns modelos foram desenvolvidos utilizando a distribuição espacial de dados como chuva, tipo de solo, uso do solo e características topográficas, como declividade, aspecto, comprimento de rampa e curvatura.

O uso de modelos distribuídos possibilita estudar a continuidade dos dados, e a transferência de eventos, como o escoamento superficial, influenciando em seu volume e

velocidade. De acordo com Lacroix et al. (2002), a discretização determinará a incorporação da variação espacial das características significantes do ponto de vista hidrológico dentro da bacia hidrográfica.

Mesmo modelos inicialmente desenvolvidos de forma pontual, sem considerar a variabilidade espacial dos fatores, como a USLE, que envolve parâmetros mais simples, podem ser utilizados no ambiente SIG, de forma que o cálculo pontual seja realizado com dados matriciais, aonde cada célula é considerada um evento. Desta forma, um SIG pode dividir grandes áreas heterogêneas em pequenas unidades hidrológicamente homogêneas, permitindo o uso de modelos empíricos localizados, em áreas maiores.

Os tipos de dados e ferramentas utilizados no geoprocessamento mais utilizados em modelos de estimativa de perda de solo, estão associados à modelagem da superfície topográfica, a obtenção de parâmetros como aspecto da superfície e declividade, e a verificação de linhas de fluxo e fluxo acumulado. Estas informações por sua vez podem ser utilizadas em equações ajustadas a dados espacializados, que possibilitam realização de estimativa de perda de solo em ambiente SIG mesmo em modelos que a priori não são distribuídos, como a USLE.

Para utilização de dados relativos à superfície topográfica, diversas ferramentas do geoprocessamento podem ser utilizadas para trabalhar com os Modelos Digitais de Elevação (MDE), bem como diferentes interpoladores. Neste contexto, destaca-se o modelo ANUDEM (Hutchinson, 2011), baseado no estudo de Hutchinson & Dowling (1991). Segundo Valentin (2008), o ANUDEM realiza a interpolação dos dados altimétricos empregando uma interpolação com base na interação por diferenças finitas, combinando a eficiência de uma interpolação local com métodos de interpolação global que utilizam uma superfície de continuidade, conservando as características locais do relevo e a continuidade do entorno. O modelo ANUDEM está incorporado em uma ferramenta do *software* SIG ArcGIS, denominada *Topo to Raster* (Childs, 2004).

Os fatores L e S da USLE podem ser determinados em ambiente SIG, e sempre se faz necessário um MDE para calculá-los, seja de forma conjunta ou isolada. Desmet & Govers (1996) desenvolveram uma equação (equação 19) para o cálculo do fator L em regiões com topografias complexas, capaz de capturar curvaturas do relevo que outros métodos não conseguiram, como áreas de convergência ou divergência.

A partir dos valores espacializados de declividade em graus (θ) e aspecto (ϕ), que representa a direção de inclinação do relevo, calcula-se o valor de α (equação 20), que

corresponde ao coeficiente função da direção de fluxo para a grade de células e β (equação 21), que corresponde à razão entre erosão em sulcos e erosão entre sulcos. Em seguida calcula-se o valor de m (equação 22), que corresponde ao coeficiente em função da declividade para grade de células; possibilitando o cálculo do fator L da USLE.

$$L = \frac{(A + D^2)^{m+1} - A^{m+1}}{\alpha^m * D^{m+2} * 22,1^m} \quad \text{Equação 19}$$

$$\alpha = |\sin\phi| + |\cos\phi| \quad \text{Equação 20}$$

$$\beta = \frac{(\sin\theta / 0.0896)}{[3 (\sin\theta)^{0.8} + 0.56]} \quad \text{Equação 21}$$

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad \text{Equação 22}$$

Em que:

L = Fator L da USLE;

A = área de contribuição da célula, m²;

D = tamanho da célula, m;

θ = Declividade, graus

ϕ = Direção de inclinação do relevo, graus

m = coeficiente em função da declividade para grade de células;

α = coeficiente função da direção de fluxo para grade de células

β = razão entre erosão em sulcos e erosão entre sulcos

Com relação ao fator de declividade do terreno (S), a equação 23 desenvolvida por Nearing (1997) destaca-se por se adequar ao cálculo do fator S em diferentes condições de relevo.

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + e^{[2.3 - 6.1(\sin\theta)]}} \quad \text{Equação 23}$$

Nestas equações para o cálculo do fator L e S da USLE, verifica-se a necessidade do valor de fluxo acumulado, que é obtido a partir do valor de direção de fluxo das células de um MDE. A direção de fluxo utiliza o MDE e a partir de uma rede de fluxo unidimensional, conectando cada célula com outras do raster até a cota mais baixa, por onde

se encontra todo escoamento superficial caso a área em questão corresponda à uma bacia hidrográfica (Oliveira et al., 2012a).

Os métodos de direção de fluxo podem ser classificados de duas formas: direção de fluxo única, e direção de fluxo composto. O'callaghan & Mark (1984) desenvolveram o método de direção de fluxo única chamado *Deterministic 8*, no qual o fluxo de escoamento de uma célula do MDE é determinado pela diferença de altitude da célula em relação às suas 8 células vizinhas, a direção será no sentido da célula vizinha que apresentar menor altitude e maior declividade em relação à célula central, e pode assumir 8 valores estabelecidos no ambiente SIG. Em seguida o fluxo acumulado corresponde à soma da quantidades de células cujo fluxo convergiu para a célula analisada (Jenson & Domingue, 1988).

Tarboton (1997) desenvolveu um método de direção de fluxo composto denominado *Deterministic Infinity*, que considera a direção de fluxo para mais de uma célula vizinha à célula analisada do MDE. O fluxo direcionado para as células vizinhas é determinado de acordo com a direção da inclinação mais íngreme e proporcionalmente para as células vizinhas associadas à inclinação mais íngreme. Atualmente este método está disponível em um *software* denominado TauDEM (Tarboton et al., 2015).

Almeida (2015) comparou as metodologias *Deterministic 8* e *Deterministic Infinity*, verificando a grande vantagem do método *Deterministic Infinity* para obtenção da direção de fluxo, por conseguir modelar o escoamento divergente, que evita a superestimação das classes mais baixas do fator LS e a subestimação das classes mais altas do mesmo fator. Oliveira et al. (2012a), Rampi et al. (2014) e López-Vicente et al. (2014) também realizaram trabalhos que confirmaram a maior precisão e superioridade do método *Deterministic Infinity* em relação ao método *Deterministic 8*.

Diversos autores utilizaram ferramentas SIG para calcular a perda de solo baseada na USLE. Almeida (2015) espacializou a perda de solo na bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite, em Goiás, utilizando a USLE e ferramentas SIG. Além disso, o autor avaliou diferentes modelos de cálculo de fluxo acumulado como *Deterministic 8* e *Deterministic Infinity*, verificando a superioridade do segundo modelo.

Arraes et al. (2010), Paes et al. (2010), Galdino et al. (2003) e Augusto et al. (2012) também utilizaram geotecnologias para estimar a perda de solo em bacia hidrográficas pela USLE. Os autores verificaram a viabilidade do uso da equação de cálculo de perda de solo que mesmo a priori sendo um modelo não distribuído, se utilizada em conjunto com métodos que permitam espacializar seus componentes, obteve bons resultados.

2.5. LIMITE DE PERDA DE SOLO

Para avaliação dos resultados dos modelos de estimativa de perda de solo, podem-se realizar diversas classificações, como Carvalho (2008), que classifica a perda de solo abaixo de 15 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ como nula a moderada, entre 15,1 e 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ como média, entre 50,1 e 120 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ como média a forte, e acima de 120 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ como forte a muito forte. A classificação proposta pela F.A.O. (1967), classifica a perda de solo calculada abaixo de 10 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ como baixa, entre 10 e 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ como moderada, entre 50 e 200 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ como alta, e acima de 200 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ como muito alta.

Outra avaliação dos resultados dos modelos é a verificação de regiões com ocorrência de perda de solo acima do limite máximo de perda do solo existente na área de estudo. O limite de perda de solo pode ser definido a partir de diversas metodologias, como Denardin (1990), Mannigel et al. (2002), Lombardi Neto & Bertoni (1975) e Bertol & Almeida (2000). A tabela 1 apresenta os valores de tolerância de perda de solo obtidos por Oliveira et al. (2008).

Tabela 1. Tolerância de perda de solo (Mg.ha⁻¹ ano⁻¹) para as principais ordens de solos, obtidos por Oliveira et al. (2008)

Ordens de solo	Tolerância de perda (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Argissolos	7,03
Cambissolos	9,03
Latossolos	12,30
Luvissolos	4,05
Neossolos	5,21
Planossolos	4,80

A tolerância para diferentes de classe de solos é uma importante referência para definir um critério de monitoramento da eficácia de sistemas de manejo e conservação do solo para redução da erosão (Bertol & Almeida, 2000). De acordo com Skidmore (1982) a combinação de práticas agrícolas avaliadas por meio da USLE podem resultar em perdas de solo menores que o limite tolerável, controlando o processo erosivo. Segundo o mesmo

autor, o valor de limite de perda de solo, associado à perda de solo calculada por modelos de perda de solo pode ser utilizado para o dimensionamento de sistemas conservacionistas e mais especificamente de práticas mecânicas de conservação do solo, como o terraceamento.

2.6. PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS

As técnicas utilizadas para controlar ou reduzir a erosão do solo são denominadas práticas conservacionistas, e podem ser classificadas como práticas edáficas, mecânicas ou vegetativas. (Bertoni & Lombardi Neto, 2010a). As práticas edáficas são aquelas que protegem o solo por meio de modificações no sistema de cultivo, melhorando características físicas ou químicas do solo, como adubação, correção da acidez. As vegetativas por sua vez utilizam-se da vegetação como ferramenta de proteção do solo contra a ação direta das gotas de chuva, aumento da rugosidade superficial, que reduz a velocidade do escoamento superficial, como cultivo em cordões e o sistema de plantio direto. E por fim as práticas mecânicas, que consistem na utilização de estruturas construídas artificialmente com o intuito de armazenar ou conduzir o escoamento superficial de modo a reduzir ou controlar o processo erosivo, como a construção de canais escoadouros, terraços e bacias de acumulação em estradas não pavimentadas (Griebeler, 1998).

As práticas mecânicas têm grande vantagem em relação à facilidade de dimensionamento, possibilitando uma intervenção com maior segurança. Diversos são os trabalhos envolvendo metodologias de dimensionamento de práticas mecânicas de conservação do solo, como Bertol et al. (2000), Miranda et al. (2004), Griebeler et al. (2005c), Cunha et al. (2011) e Scaloppi & Garcia (2015) em estudos envolvendo o dimensionamento de terraços; Griebeler et al. (2005a) e Oliveira et al. (2011) que trabalharam com dimensionamento de estruturas mecânicas para conservação de estradas não pavimentadas e Rabelo & Griebeler (2012) que trabalharam com o dimensionamento integrado de terraços e o volume de escoamento superficial proveniente de estradas não pavimentadas.

2.6.1. Terraceamento agrícola

A utilização de terraços é a prática mecânica de conservação do solo mais difundida entre os produtores rurais (Miranda et al., 2004). De acordo com Resck (2002) o

terraceamento é tido como a prática mais importante para controle da erosão do solo, constituído basicamente por estruturas compostas por um dique e um canal em sentido transversal à declividade do terreno formando obstáculos físicos com o objetivo de reduzir a velocidade do escoamento superficial, ordenar o movimento da água sobre a superfície, e dividir ou armazenar o volume do escoamento superficial ao longo da encosta.

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (2010a) os terraços podem ser classificados quanto à sua função, construção, dimensão e forma. Os terraços podem ter a função de armazenar e proporcionar a infiltração do volume proveniente do escoamento superficial, se construídos em nível, ou a função de seccionar e conduzir lentamente o escoamento superficial para fora da área protegida, se construído em gradiente. Quanto à construção, em função da movimentação de terra, podem ser do tipo Nichols, se a movimentação de terra é somente de cima para baixo, ou Manghum, se a movimentação de terra será realizada tanto de cima para baixo como de baixo para cima.

Quanto à dimensão, Pruski et al. (2009) especificam que os terraços podem ser de base estreita, se a faixa de movimentação de terra for inferior a 3 metros de largura; base média, se a faixa de movimentação de terra for entre 3 e 6 metros de largura; e base larga, se a faixa de movimentação for entre 6 e 12 metros de largura, o que implica em menor perda de área plantada, uma vez que todo terraço pode ser cultivado por culturas anuais, porém os terraços de base larga são limitados à áreas com declives inferiores à 12%. E quanto à forma, podem ser denominados como terraço comum, usado em declividades inferiores à 18%, terraço embutido, quando o talude do terraço à jusante fica praticamente na vertical, murundum, quando da construção de terraços com grandes dimensões e grandes movimentações de terra, e terraço em patamar, utilizado em áreas com declividade superior à 18% associado à construção de plataformas sobre um talude estabilizado.

Especificamente sobre os terraços comuns, e observando sua função, Oliveira et al. (2012b) avaliaram o desempenho de terraços em nível, gradiente uniforme e gradiente crescente. Os autores verificaram que os terraços em nível são os mais efetivos no favorecimento da infiltração, embora requeiram maior altura de construção, se comparados aos terraços em gradiente e terraços mistos. Ainda sobre a avaliação de terraços, Oliveira (2009) avaliou o nivelamento de terraços em nível locados com nível óptico, verificando que estes após sua implantação, recente ou não, muitas vezes apresentam desnível na crista do terraço superior à sua altura, o que diminui drasticamente sua capacidade de armazenamento; o autor observou desnível de crista dos terraços com variações de 0,18m até 0,60m, obtendo

um valor médio de 0,37m. Miranda et al. (2012) também avaliaram a uniformidade de altura da crista de terraços e a eficiência de armazenamento destes, encontrando grande variação da altura de crista de terraços em nível, atingindo eficiência de armazenamento até 0,5%, o que ressalta a importância da correta implantação dos sistemas de terraceamento. Rabelo (2011a) avaliou a locação de terraços em nível com uso de tratores equipados com piloto automático orientado por receptor GNSS RTK, obtendo variação vertical nos terraços entre 0,13 e 0,35 m com variação média de 0,24 m, a locação teve rendimento de 0,42 h km⁻¹ de terraço, e 9,23 ha h⁻¹ para os terraços dimensionados na área de estudo.

Uma função auxiliar dos terraços é o armazenamento do escoamento superficial proveniente das estradas rurais, conforme destacado por Griebeler (2002). Paraná (1994) ressalta que uma das principais causas de rompimento de terraços é a convergência para estas, de águas advindas de estradas e carregadores sem o devido planejamento. Neste sentido, Rabelo & Griebeler (2012) desenvolveram um modelo que possibilita calcular o incremento na altura dos terraços para que estes possam acumular o volume de escoamento superficial das áreas agrícolas e das estradas rurais.

2.6.2. Cálculo do espaçamento entre terraços

O espaçamento entre terraços é o comprimento crítico de rampa para o qual o escoamento superficial não alcance energia suficiente para proporcionar perdas de solo acima do tolerável. Como metodologias para cálculo do espaçamento entre terraços, destacam-se as metodologias Bentley (Oliveira et al., 1992), PARANA (Paraná, 1994), Lombardi Neto et al. (1994) e o uso a USLE (Pruski et al., 2009).

No Brasil, Marques (1950) apresenta a primeira tabela de espaçamento de terraços baseada em dados de perda por erosão em diferentes tipos de solo. Em seguida, Bertoni (1959), propôs uma metodologia relacionando as perdas de solo com a declividade e comprimento de rampa do terreno. Lombardi Neto et al. (1994) adaptaram esta metodologia considerando o uso e manejo do solo no seu cálculo.

Bertol (1995) propôs o método do cálculo de espaçamento de terraços pelo comprimento crítico, partindo do conceito da perda de eficácia do resíduo cultural no controle da erosão hídrica, ou seja, o ponto do terreno onde é evidenciado transporte de cobertura do solo é aquele em que a enxurrada começa a provocar erosão em sulcos. Bertol

et al. (2000) avaliaram o método do comprimento crítico em dois preparos conservacionistas. Segundo os autores, utilizando como critério a falha do resíduo cultural, o menor comprimento de rampa foi obtido no tratamento sem preparo do solo com resíduo de trigo, com 106 a 130 metros, e o maior comprimento foi obtido no tratamento sem preparo do solo com resíduo de trigo, com 328 a 483 metros.

Na metodologia Bentley (Oliveira et al., 1992), são considerados o tipo de solo e a declividade do terreno, utilizando a equação 24.

$$EV = \left(2 + \frac{D}{X}\right) * 0,305 \quad \text{Equação 24}$$

Em que:

EV = espaçamento vertical entre terraços, em metros;

D = declividade do terreno, em %;

X = fator tipo de solo (2,5 para solos argilosos, 3,0 para solos de textura média, e 3,5 para solos arenosos)

A metodologia PARANA (Paraná, 1994) utiliza o tipo de solo e a declividade do terreno, limitada a 20% para obter os valores de espaçamento vertical e horizontal em uma tabela de referência.

Lombardi Neto et al. (1994) desenvolveram uma metodologia para cálculo do espaçamento entre terraços a partir de dados experimentais, e considera a declividade, a cobertura vegetal, o sistema de preparo do solo, manejo dos restos culturais e a erodibilidade de classes de solo, utilizando a equação 25. Este é um modelo bastante utilizado no Brasil, cuja implantação foi facilitada com o desenvolvimento do *software* Terraço (Griebeler et al., 2005b) que facilitou as operações de dimensionamento de terraços, inclusive com a implantação de dimensionamento utilizando um modelo digital de elevação, considerando a variabilidade espacial da declividade em uma encosta.

$$EV = \frac{0,4518 * k * D^{0,58} * (u + m)}{2} \quad \text{Equação 25}$$

Em que:

EV = espaçamento vertical entre terraços, em metros;

D = Declividade da encosta, em %;

K = parâmetro que depende do tipo de solo, adimensional;

u = fator de uso do solo, adimensional;

m = fator de manejo do solo, adimensional

Sales (1998) e Pruski et al. (2009) destacam o espaçamento entre terraços utilizando a USLE como referência, mais especificamente a utilização do fator LS associado ao limite de perda de solo. Isolando o fator LS, tem-se a equação 26. Para obter o valor de espaçamento horizontal entre terraços, Sales (1998) utilizando a equação para cálculo do fator LS proposta por Wischmeier & Smith (1978a), obtendo a equação 27. Assim, para uma encosta com declividade uniforme pode-se calcular o espaçamento entre terraços.

$$LS = \frac{T}{K * R * C * P} \quad \text{Equação 26}$$

$$EH = \left(\frac{T}{R * K * 0,00984 * S^{1,18} * C * P} \right)^{\frac{1}{0,63}} \quad \text{Equação 27}$$

Em que:

LS = fator de comprimento de encosta e declive; adimensional

T = tolerância de perda de solo por unidade de área, em Mg ha⁻¹ ano⁻¹;

R = erosividade da chuva, em MJ ha⁻¹ mm.h⁻¹;

K = erodibilidade do solo, em Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹;

C = fator uso e manejo do solo, adimensional;

P = fator práticas conservacionistas, adimensional;

EH = espaçamento horizontal entre terraços, metros.

S = fator declividade da encosta, %.

A utilização de parâmetros espacializados da USLE, como os fatores L e S, propostos por Desmet & Govers (1996) e Nearing (1997) respectivamente, possibilita a substituição do cálculo do fator LS proposto por Wischmeier & Smith (1978a), permitindo o cálculo do espaçamento para encostas com declividade variável e o desenvolvimento de ferramentas SIG para o cálculo de espaçamento entre terraços pela USLE. Sales (1998) destaca as possibilidades de automatização do dimensionamento com o uso de ferramentas computacionais.

Sales (1998) comparou o espaçamento de terraços calculados pela USLE e pela metodologia proposta por Lombardi Neto et al. (1994), obtendo maiores espaçamentos nos

terraços calculados pela USLE, constituindo uma ótima alternativa para o cálculo, e com resultados mais próximos à realidade, por considerar um maior número de fatores em seu dimensionamento. O autor verificou ainda que em determinadas situações, como em declives mais acentuados, as perdas de solo entre os terraços dimensionados pela segunda metodologia poderiam ser superiores aos limites de perda de solo, inviabilizando sua utilização.

2.6.3. Estruturas alternativas de armazenamento de escoamento superficial

Além da construção de terraços, podem ser dimensionadas estruturas alternativas para controle da erosão hídrica, como pequenos sulcos para armazenamento do escoamento superficial distribuídos ao longo da área agrícola, ou pequenas bacias de acumulação distribuídas estrategicamente para acumular o volume proveniente do escoamento superficial.

Pruski et al. (2009) citam a utilização de pequenas barragens para contenção da água decorrente do escoamento superficial, bem como uma metodologia para determinação das características geométricas destas barragens. Entretanto, mais estudos são necessários para determinar exatamente a melhor posição para disposição destas barragens no terreno, para que estas possam controlar satisfatoriamente o processo erosivo, e estejam localizadas nas linhas de fluxo acumulado do escoamento superficial. O geoprocessamento torna-se uma importante ferramenta para este tipo de dimensionamento, uma vez que com dados de qualidade necessária à disposição, o escoamento superficial pode ser simulado e a localização dos pontos em que se faz necessária a construção de pequenas barragens pode ser determinada com grande precisão.

Williams et al. (2012) avaliaram a capacidade de armazenamento de sulcos construídos com sulcadores de 10 linhas com 0,20 m de profundidade, em áreas com declividade abaixo de 5%. Os autores verificaram que seria necessária a implantação de sulcos correspondentes à 2% da área, para que estes fossem capazes de armazenar o escoamento superficial de uma chuva intensa com período de retorno de 100 anos. Este é um sistema muito utilizado nos Estados Unidos, devido à tecnologia disponível para levantamentos altimétricos em áreas agrícolas, e sistemas de piloto automático para implantação dos sulcos. Trabalhos como este mostram que é possível aliar o acúmulo do escoamento superficial nas linhas de plantio à conservação do solo e até mesmo à eliminação

da necessidade de terraços, favorecendo o trânsito de máquinas e diminuindo a perda de áreas agrícolas para construção de estruturas mecânicas de conservação do solo.

Recentemente, Zamuner Filho (2015) avaliou um método de dimensionamento de microterraços, que são pequenos terraços dispostos entre os terraços de infiltração em nível, de modo a aumentar o espaçamento entre estes. Segundo o autor, a adoção dos microterraços diminuiu a necessidade de terraços de filtração, que tem custo de implantação mais elevado, além do ganho na ordem de 2,7% na área efetiva de plantio, e ganho de rendimento operacional de colheita de 8,4%. Para realizar o dimensionamento, foi necessário construir toda base de dados, incluindo dados altimétricos de alta precisão, e o dimensionamento foi realizado com uso de sistemas de informação geográficas.

Para o dimensionamento das estruturas alternativas, e até mesmo dos sistemas de terraceamento, é necessária uma base de dados altimétricos, atualmente inexistente no Brasil em escala que permita realizar estes dimensionamentos. Neste sentido, é necessário realizar o levantamento altimétrico das áreas agrícolas.

2.7. COLETA DE DADOS ALTIMÉTRICOS

Em virtude da falta de uma base de dados altimétricos que possibilite realizar o dimensionamento de terraços, torna-se necessária sua coleta em campo. Diversos autores vêm estudando formas mais eficientes de coleta de dados altimétricos, bem como a qualidade dos dados coletados por meio das novas técnicas ou equipamentos. Corseuil & Robaina (2003) avaliaram a qualidade de dados altimétricos com receptores DGPS pós-processado monofrequência, com diferentes intervalos de coleta de dados, com 5, 10, 15 e 30 minutos, usando como referência um levantamento pelo método de levantamento trigonométrico com poligonal fechada, realizado com estação total. Após o processamento dos dados, verificaram-se precisões centimétricas nos levantamentos com coleta superior a 10 minutos.

Cremonini (2002) avaliou a acurácia de mapas altimétricos obtidos a partir de dados coletados com dois tipos de receptores DGPS acoplados em colhedoras de cereais, um com correção de sinal por pós processamento e outro com correção em tempo real via satélite a partir do percurso realizado em dois alinhamentos, um com declividade de 3,4% e outro com declividade de 1,9%, nas velocidades de $1,1 \text{ m s}^{-1}$, $2,2 \text{ m s}^{-1}$, e $3,3 \text{ m s}^{-1}$, usando como referência um levantamento altimétrico realizado com nível óptico em um nivelamento geométrico com pontos estaqueados a cada 5 metros. Nos perfis avaliados, o receptor com

correção de sinal pós-processada apresentou melhores resultados que o receptor com correção em tempo real via satélite. Os levantamentos com correção em tempo real via satélite tiveram 70% dos dados com erro altimétrico abaixo de 2,5 metros, e chegando a erros de até 8 metros, enquanto os levantamentos com correção pós-processada tiveram 70% dos erros abaixo de 2 metros, com erros máximos de 5 metros.

Rabelo (2011b) avaliou a qualidade de dados altimétricos de receptores GNSS RTK acoplados em tratores agrícolas, nas velocidades de $1,1 \text{ m s}^{-1}$, $2,2 \text{ m s}^{-1}$, e $3,3 \text{ m s}^{-1}$. O levantamento altimétrico apresentou após a correção, erro máximo de dez centímetros em 95,36%; 96,25% e 94,44% da área, e erro médio de 0,0400m, 0,0347m e 0,0404m para as respectivas velocidades. Estes trabalhos corroboram com a grande demanda por este tipo de dados, bem como com a necessidade de pesquisas avaliando a qualidade altimétrica de dados coletados por meio das novas tecnologias que foram desenvolvidas nos últimos anos.

Comparando o uso de tecnologias de posicionamento por satélites com metodologias convencionais de levantamentos altimétricos, Busnello & Conte (2015) avaliaram levantamentos altimétricos realizados com estação total e com receptor GNSS RTK operado manualmente, observando variações de distância horizontal entre as curvas de nível com equidistância de 2 metros entre os dois tipos de levantamento. Verificaram-se discrepâncias horizontais de 1,5 a 3 metros nas curvas em regiões de declividade entre 0% a 5%, e 2 a 3,5m em declividades de 5% a 10%. Assim, observa-se a influência do fator declividade na qualidade dos dados altimétricos, fator este que é objeto de estudo do presente trabalho.

2.8. ASPECTOS TÉCNICOS DO CULTIVO DE CANA DE AÇÚCAR

O planejamento do cultivo de cana de açúcar é uma ferramenta cada vez mais utilizada pelas empresas do setor. A implantação de uma cultura semi-perene, sem o devido planejamento, com a disposição das linhas de plantio em campo determinadas simplesmente pelo operador no momento do plantio, como ainda é realizado em muitas áreas, despreza a maximização do potencial de uso da área, a conservação do solo e a otimização do número de manobras. Para o correto planejamento, faz-se necessário o conhecimento dos diversos aspectos técnicos da cultura, principalmente no que se refere às características dos equipamentos utilizados, como giro de manobra e capacidade de transporte; características de cultivo, como espaçamento entre linhas; e características de uso, manejo e práticas

conservacionistas, como dimensionamento de terraços, largura de carregadores e preparo do solo (Penatti, 2006).

Lionço et al. (2010) avaliaram a sistematização de áreas para implantação de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Os autores destacam que as áreas para colheita mecanizada devem ser aquelas com declive inferior à 12%, e o espaçamento entre linhas com 1,5 metros é o mais indicado, observando o paralelismo entre as linhas para aumentar a eficiência da colhedora. Em espaçamentos menores, como 1,4m, verificou-se o pisoteio da linha de cana pela colhedora e pelo transbordo.

Segundo Benedini & Conde (2008), o comprimento ideal de sulcos nos talhões deve ser em torno de 500 a 700 metros para otimizar a capacidade de transporte do transbordo e otimizar a utilização de carretel enrolador para aplicação de vinhaça, e o talhão com largura entre 150 a 400 metros, proporcionando maior segurança no combate a incêndios e possibilitando uma malha viária ocupando de 2,5% a 4% da área agrícola. Quanto aos carregadores, os autores destacam que os carregadores secundários devem ter largura de 5 metros, e os principais devem ter largura de 7 a 8 metros, devido ao maior fluxo de máquinas. Os autores também comentam sobre o uso de terraços de base larga como carregadores, facilitando o trânsito de máquinas e reduzindo o número de manobras e ruas mortas. Neste caso, a largura dos talhões é planejada de acordo com o espaçamento horizontal dos terraços, destacando o problema para trânsito de máquinas caso existam terraços localizados na área interna do talhão, e o comprimento dos terraços é planejado com carregadores em desnível, que podem ser primários ou secundários, em sentido perpendicular ou transversal em relação aos terraços.

Trabalhos recentes abordando a otimização de rotas em áreas agrícolas, como o desenvolvido por Spekken & Bruin (2013), mostraram a influência do direcionamento das linhas de plantio em relação à configuração do perímetro da área. Os autores também observaram o ângulo e raio de giro no final das linhas e sua influência no desempenho operacional das máquinas, bem como a otimização de rotas com a variação da sequência das linhas a serem plantadas, culminando no desenvolvimento de um algoritmo para o planejamento do sentido e sequência de implantação das linhas. Verificou-se a direção das linhas que possibilita menor tempo de manobra não proporciona necessariamente o menor tempo de implantação; deve-se observar simultaneamente o tempo de manobra e a otimização das rotas para que se obtenha o menor tempo de implantação das linhas na área agrícola, condição que foi atendida pelo algoritmo desenvolvido.

Spekken et al. (2015) avaliaram o custo das manobras na cultura da cana de açúcar, verificando que sulcos com comprimento entre 700 e 1000 metros possibilitam redução de até 9,38 US\$ ha⁻¹. Os autores também verificaram que o ângulo formado entre o sulco e o carreador influencia no raio e tempo de manobra, com menor tempo para as linhas mais próximas à perpendicularidade com os carreadores, e que em linhas com comprimento inferior à 62 metros a produção de cana não cobre o respectivo o custo da manobra. Para o plantio mecanizado, foi obtido o tempo médio de manobra de 80,5 segundos, com custo de 0,02 US\$ s⁻¹.

Aparecido & Brandão (2015) realizaram um trabalho abordando o planejamento de sulcos em áreas de cana de açúcar em áreas com implantação de terraços. Os autores destacam o papel fundamental dos terraços quanto à conservação do solo, mesmo em áreas com colheita mecanizada de cana de açúcar e manutenção da palhada sobre a superfície do solo. Os autores recomendam o uso de terraços de base larga em áreas com até 8% de declividade, pois concluíram que este tipo de terraço proporciona melhor adequação do projeto de plantio e possibilita melhor aproveitamento da área. A partir da sistematização dos talhões, verificou-se aumento no rendimento operacional em até 40%, com a redução do número de linhas curtas e redução do número de manobras.

Outras estruturas podem ser utilizadas para o controle da erosão, como os micro-terraços, que são pequenos canais dispostos entre algumas linhas de plantio de modo a seccionar o escoamento superficial e controlar o processo erosivo. Zamuner Filho (2015) constatou que o uso de micro-terraços pode aumentar significativamente o espaçamento entre os terraços tradicionais e em alguns casos até eliminá-los, tendo como resultado o aumento na área efetiva de plantio e aumento no rendimento operacional das máquinas. Entretanto, para o correto dimensionamento deste tipo de estrutura, é exigido um grande número de informações sobre a área agrícola, bem como um grande conhecimento técnico multidisciplinar por parte do projetista, o que dificulta sua implementação.

Estes trabalhos ressaltam a importância do planejamento dos sulcos e carreadores nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, e mostram o quanto a observância de detalhes pode ter um grande impacto no número de manobras e no custo e tempo de implantação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em quatro etapas:

- i. Validação da coleta de dados altimétricos com receptor GNSS RTK embarcado em quadriciclo, para integrar a base de dados exigida pelos modelos de perda de solo.
- ii. Desenvolvimento da metodologia de dimensionamento de terraços, talhões e linhas de plantio considerando o acúmulo de escoamento superficial no micro relevo dos sulcos da cultura da cana de açúcar e a perda de solo calculada pela USLE considerando a variabilidade espacial do relevo.
- iii. Desenvolvimento uma ferramenta computacional para facilitar a distribuição e implementação do método.
- iv. Avaliação do método proposto e da ferramenta computacional desenvolvida por meio de um estudo de caso.

3.1. QUALIDADE DE LEVANTAMENTOS ALTIMÉTRICOS REALIZADOS COM RECEPTOR GNSS RTK EMBARCADO EM QUADRICICLO

O experimento foi realizado na cidade de Bom Jesus de Goiás – GO, em uma área cultivada com cana de açúcar com canavial implantado a dois anos (Figura 2). Foi utilizado um par do receptor GNSS RTK modelo GR3 da marca Topcon, com precisão, horizontal de 10mm + 1ppm e vertical de 15mm + 1ppm, de acordo com o fabricante, configurado para operar em modo RTK cinemático com coleta automática de pontos com intervalo de 1 metro. O equipamento foi acoplado a um quadriciclo modelo Fourtrax TRX 420 da marca Honda, com tração nas 4 rodas, 420 cilindradas com 26,9 cavalos de potência, suspensão dianteira do tipo bifurcação dupla e traseira do tipo trailing, ambas com 170mm de curso (Honda, 2014). Para acoplar o receptor GNSS ao quadriciclo, foi desenvolvido um suporte equipado com base nivelante para fixação da antena, cuja altura foi medida com uso de nível óptico e mira (Figura 3).

Para avaliação da qualidade dos dados altimétricos em diferentes situações, foram selecionadas áreas com declividades próximas a 0%, 5% e 10%, e com plantio realizado em nível. Em cada área, o levantamento foi realizado em modo cinemático em cinco direções: em nível (segundo o alinhamento da linha de plantio), transversal à linha de plantio ascendente, transversal à linha de plantio descendente, perpendicular à linha de plantio ascendente e perpendicular à linha de plantio descendente, e estas direções foram denominadas como N, Ts, Td, Ps e Pd, respectivamente, conforme ilustra a figura 04.

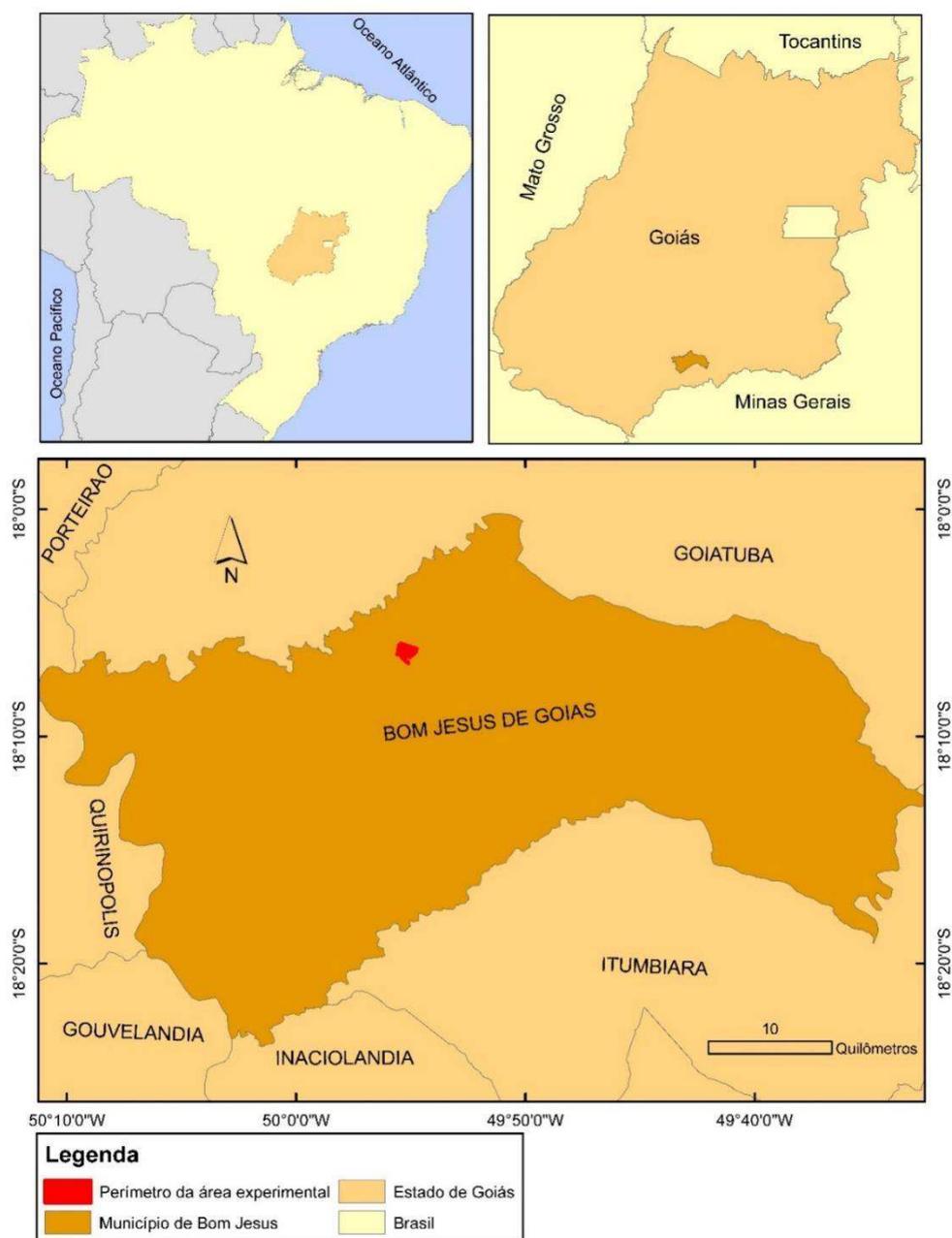


Figura 2. Mapa de localização da área experimental, no município de Bom Jesus de Goiás, Goiás.



Figura 3. Suporte desenvolvido para acoplar o receptor GNSS ao quadriciclo.

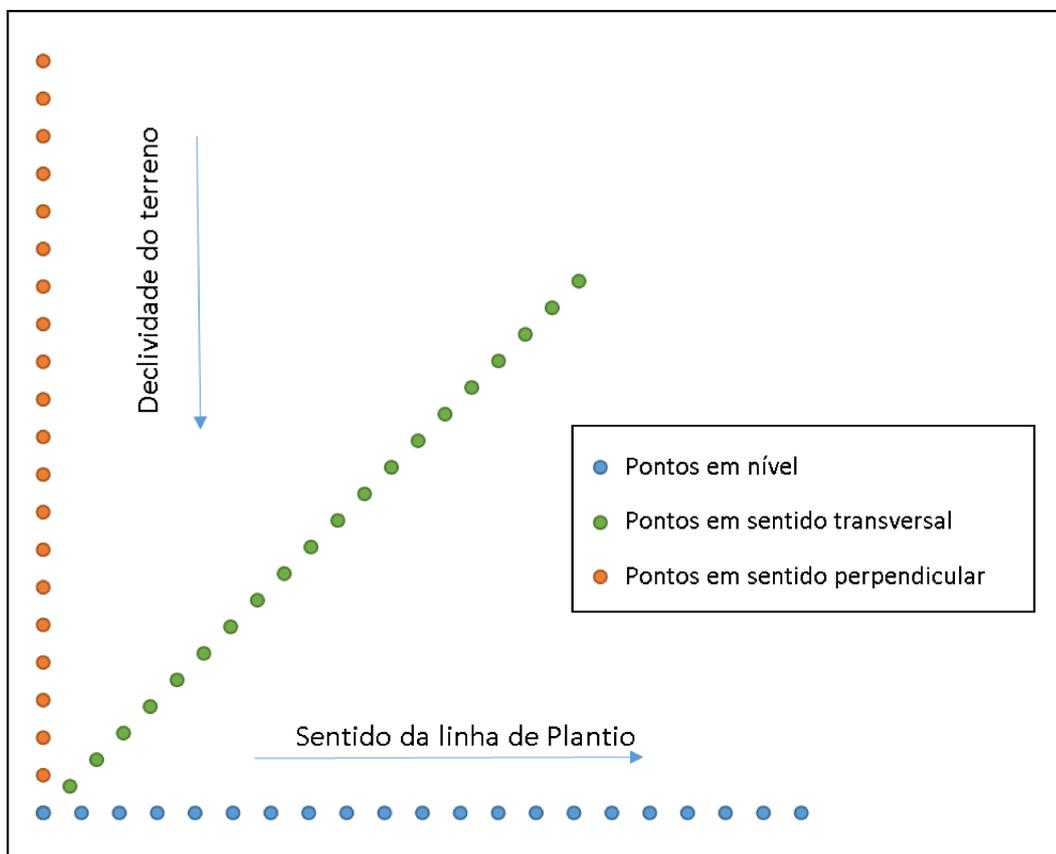


Figura 4. Croqui do levantamento de campo

Os alinhamentos de levantamento cinemático consistiram em um trecho de 20 metros com piquetes cravados ao nível do solo a cada metro, totalizando 21 pontos por alinhamento. Todos os levantamentos foram realizados em três velocidades considerando primeira, segunda e terceira marcha 4x4, com velocidades aferidas em campo, uma vez que o quadriciclo não é equipado com velocímetro. A aferição foi realizada com três tomadas de tempo para cada marcha, em um trecho demarcado de 30 metros em nível.

Para que houvesse uma abrangência de levantamentos em diferentes condições de satélites visíveis, geometrias de satélites e condições atmosféricas, em cada combinação de declividade, alinhamento e velocidade, foram realizados 5 levantamentos em horários e dias distintos. Deste modo, o experimento foi realizado em esquema fatorial 3x5x3 sendo três declividades, cinco sentidos e três velocidades, e para cada combinação foram realizados 5 levantamentos compostos por 21 pontos amostrais cada, totalizando 105 repetições. Para a obtenção das coordenadas de referência dos levantamentos RTK, foram implantadas bases de apoio imediato, com distância inferior a 50 metros de cada área, e realizado rastreamento por 6 horas utilizando um receptor Topcon GR3 operando em modo estático com intervalo de gravação de 15 segundos. Em seguida os dados foram processados pelo método de processamento por ponto preciso, disponibilizado pelo IBGE.

Após da coleta dos dados com receptor GNSS RTK embarcado em quadriciclo, procedeu-se a medição dos valores de referência de altitude dos 21 pontos estaqueados a cada metro em cada alinhamento por meio de nivelamento geométrico simples, tomando como referência a leitura na base de apoio imediato de cada área, utilizando um nível óptico modelo RL-32 da marca RUIDE, com precisão de 1 mm km⁻¹. Para a obtenção das coordenadas horizontais de cada ponto estaqueado, foi coletado um ponto em cada piquete utilizando o receptor GNSS RTK operando em modo estático com uso de bastão equipado com nível de bolha para fixação da antena. Estes pontos foram denominados pontos de referência.

Em seguida, os dados foram processados, com a geração de perfis dos levantamentos realizados em modo cinemático em cada alinhamento, bem como os perfis dos levantamentos de referência. Utilizando um *software* SIG, para cada ponto do perfil de referência foi gerada uma linha vertical, cuja distância corresponde ao desvio vertical entre o levantamento de referência e o levantamento altimétrico com receptor GNSS RTK embarcado em quadriciclo.

Deste modo, foram obtidos os 105 valores de desvio para cada combinação de declividade, sentido e velocidade, totalizando 4725 valores, permitindo a análise estatística descritiva dos dados com a obtenção dos valores de frequência e frequência acumulada dos desvios em módulo, bem como a análise de variância e o teste t de comparação de médias. Foi também avaliado o padrão de qualidade cartográfica dos dados (Brasil, 1984), considerando a equidistância entre curvas de nível de 0,30m, de modo que o erro padrão avaliado fosse de 0,10m, que é o recomendado para levantamentos altimétricos para planejamento de obras hidroagrícolas, conforme Pruski et al. (2006).

3.2. DIMENSIONAMENTO DE TALHÕES, LINHAS DE PLANTIO E SISTEMAS DE TERRACEAMENTO EM NÍVEL

Para o dimensionamento de talhões, linhas de plantio e sistemas de terraceamento em nível, planejou-se inicialmente a subdivisão do processo em etapas baseado em um método, e posteriormente procedeu-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, adotando-se as seguintes premissas:

- A taxa de infiltração da água no solo saturado é uniforme para toda a área;
- A área deve compreender apenas um tipo de solo;
- A área de estudo deve ser caracterizada como uma encosta, deste modo o modelo não se aplica a área caracterizadas como bacias.
- Os terraços dimensionados são do tipo em nível.
- Os terraços podem ser utilizados como carregadores, e como divisores da área agrícola em talhões.
- O deslocamento de solo entre os terraços é admitido, porém sempre inferior à tolerância de perda de solo considerada.

3.2.1. Desenvolvimento do método

O método foi desenvolvido em quatro etapas, sendo elas:

- i. Dimensionamento de talhões.
- ii. Dimensionamento das linhas de plantio
- iii. Cálculo de volume acumulado nas linhas de plantio
- iv. Dimensionamento de terraços.

3.2.1.1. Dimensionamento de talhões

O dimensionamento dos talhões considera que um talhão pode ter uma área de tal forma que a perda de solo calculada pela USLE atinja o limite máximo de tolerância de perda de solo. Entretanto, em algumas situações o talhão pode ter largura superior ao recomendado, fazendo-se necessário inserir um limite máximo de largura para o talhão. O talhão dimensionado tem seu limite inferior baseado em uma curva de nível, e os parâmetros de avaliação são a área total do talhão dimensionado, sua largura e o comprimento da curva de nível do limite inferior do talhão. Em situações que a curva de nível tenha um comprimento muito elevado, ou a área tenha valores acima do esperado pelo usuário, pode-se dividir o talhão com carregadores em desnível, gerando sub-talhões.

O dimensionamento dos talhões necessita das seguintes informações: Modelo digital de elevação (MDE) da área, perímetro da área, fator de uso e manejo da USLE (fator CP), fator erosividade (fator R), fator erodibilidade (fator K), limite de perda de solo, raio mínimo de manobra e largura máxima do talhão.

O MDE é gerado previamente a partir de pontos cotados em quantidade mínima de 100 pontos por hectare, atendendo à especificação da NBR 13133 (A.B.N.T., 1994) para trabalhos na escala 1:500 com geração de curvas de nível com 1m de equidistância vertical. Para a interpolação dos dados altimétricos, utilizou-se a extensão “Topo to Raster” do *software* ArcGis, que é baseada no modelo Anudem (Hutchinson, 2011), largamente utilizado para geração de MDEs para aplicações hidrológicas, conforme trabalhos desenvolvidos por Valentin (2008), Arun (2013), Almeida (2015) e Carmo et al. (2015).

Inicialmente, o modelo de dimensionamento de talhões calcula a perda de solo de toda a área, utilizando a USLE com os fatores C, P, R e K fornecidos pelo usuário. O fator LS é calculado a partir do MDE, de acordo com as equações descritas por Desmet & Govers (1996) para cálculo do fator L e a equação descrita por Nearing (1997) para o fator S. Estas equações necessitam como parâmetros de entrada a área de contribuição (A), área de célula (D), declividade (θ) e aspecto (ϕ).

O parâmetro D representa a área da célula do MDE gerado anteriormente, em metros. O parâmetro A corresponde à área de contribuição ou fluxo acumulado, obtido a partir do método de direção de fluxo D_{∞} (Tarboton, 1997) calculado pela extensão TauDEM (Tarboton et al., 2015) para o *software* ArcGIS utilizando as ferramentas *D-Infinity flow direction* e em seguida a ferramenta *D-Infinity Contributing Area*, originando assim uma

matriz cujo valor de célula corresponde ao parâmetro A. Na Figura 5 é apresentado um fluxograma para obtenção do parâmetro A.

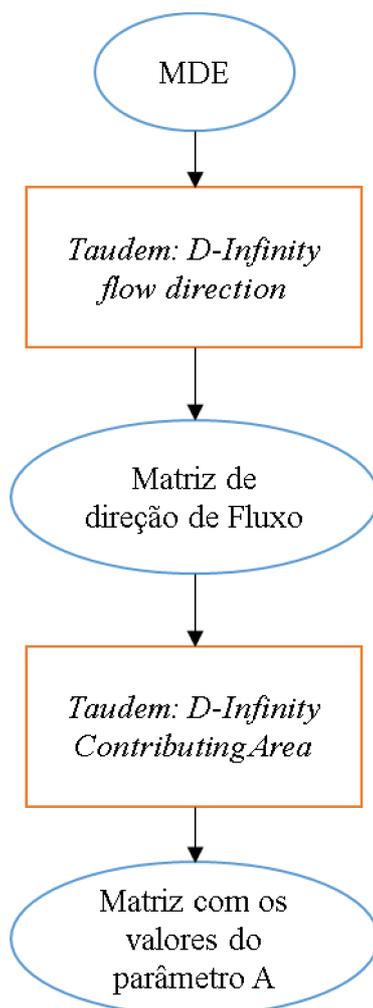


Figura 5. Fluxograma de obtenção do parâmetro A.

O parâmetro θ corresponde ao valor da declividade em graus, calculado para cada célula do MDE a partir das células vizinhas, conforme a Figura 6. Este parâmetro foi utilizado para cálculo do fator S e utilizado pelas equações α e m , que são parâmetros de entrada do cálculo do fator L. O parâmetro aspecto (ϕ) é necessário para cálculo da equação α , e corresponde ao azimute da inclinação do terreno, obtido a partir da diferença de cota de uma célula central e suas 8 células vizinhas, calculado para cada célula da matriz do MDE, conforme ilustra a figura 7.

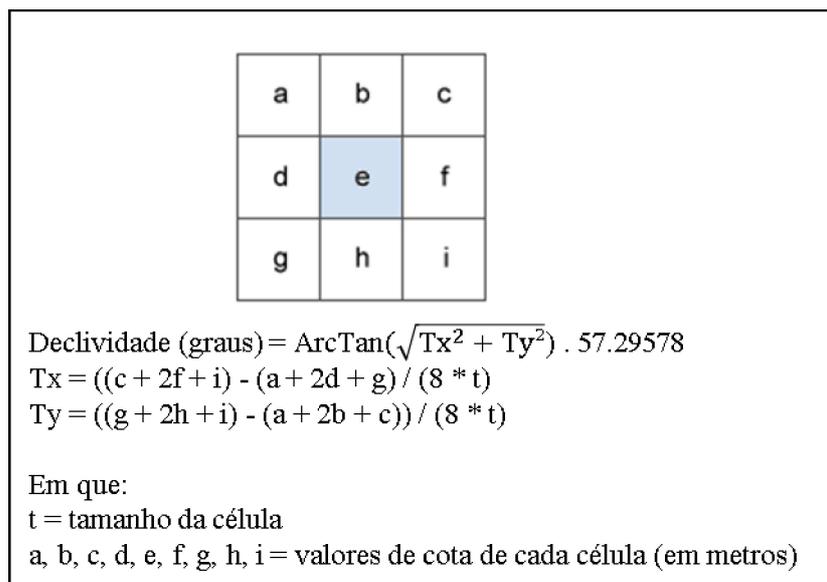


Figura 6. Esquema do cálculo do valor da declividade, adaptado de Burrough & Mcdonell (1998).

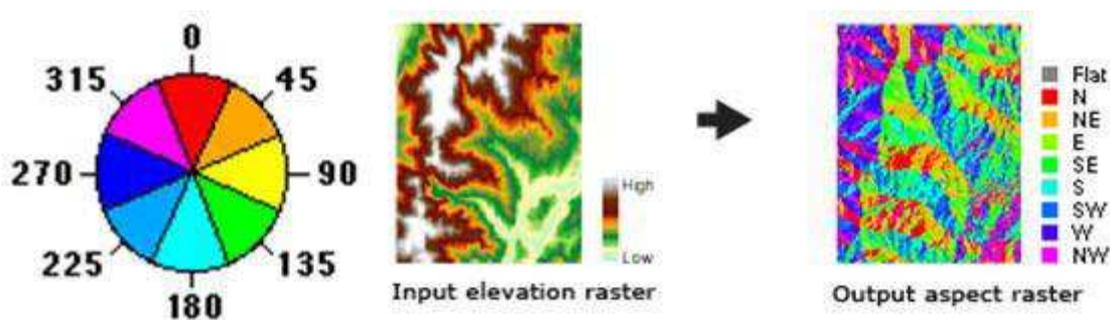


Figura 7. Esquema do cálculo do valor de aspecto (Burrough & Mcdonell, 1998).

De posse dos parâmetros A , D , ϕ e θ , calculam-se as equações α e β , em seguida a equação m e finalmente as equações L e S para obtenção do valor do fator LS , conforme fluxograma apresentado na Figura 8.

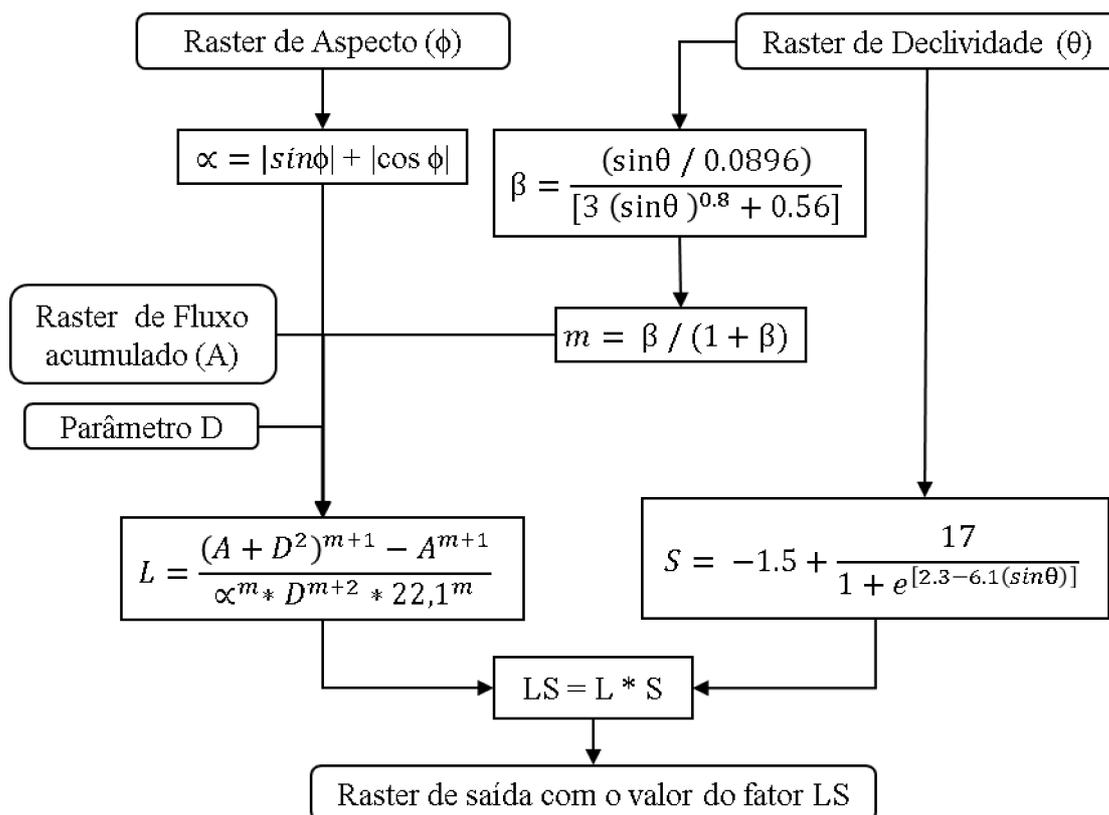


Figura 8. Fluxograma das etapas de obtenção do valor do fator LS da USLE.

Uma vez calculado o raster de perda de solo de toda a área, verificou-se a existência de alguma célula com valor superior ao limite de tolerância de perda de solo. Constatando-se tal situação, o modelo de dimensionamento de talhões procede a identificação da cota da isolinha de geração do talhão. Cria-se uma máscara a partir do raster de perda de solo da área, com as células de todos os valores acima do limite de tolerância de perda de solo, e recorta-se o MDE com esta máscara. Identifica-se em seguida o valor máximo de cota do MDE recortado, que corresponde à cota mais alta em que a perda de solo supera o limite informado, ou seja, acima da cota identificada a perda de solo é inferior ao limite.

Com o valor da cota identificado, gera-se uma isolinha a partir do MDE, e esta isolinha corresponde à linha inferior do talhão que está sendo dimensionado. A fim de facilitar a implantação do projeto a campo, e evitar a ocorrência de vértices abruptos, conforme descrito por Rabelo (2011a), realizou-se a suavização da isolinha por meio do método Paek (Bodansky et al., 2002), utilizando como tolerância de suavização o valor informado como raio mínimo de manobra. A isolinha suavizada é utilizada para dividir a

área total, gerando um polígono com o talhão dimensionado. Na Figura 9 é apresentado o fluxograma para geração dos talhões a partir da perda de solo da área.

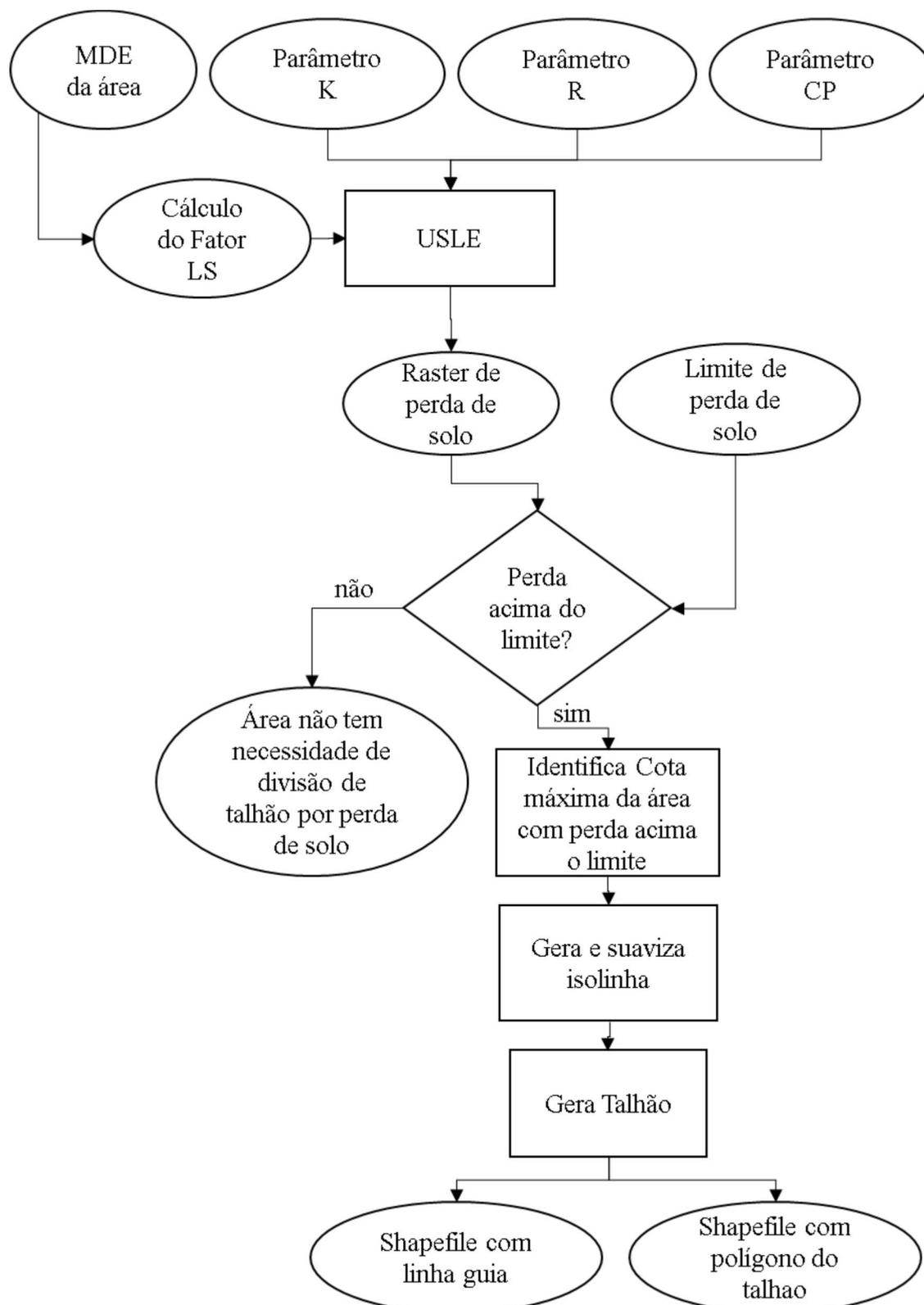


Figura 9. Fluxograma dos procedimentos realizados para dimensionamento do talhão a partir da perda de solo da área.

Posteriormente, executa-se a verificação de largura do talhão. Para verificação da largura do talhão, gera-se um arquivo raster de distância euclidiana a partir da isolinha suavizada e em seguida, este arquivo raster é recortado pelo polígono do talhão gerado, e o maior valor do arquivo raster de distância euclidiana após o recorte é considerado como largura do talhão. Caso o valor seja inferior à largura máxima, conserva-se o polígono do talhão gerado, caso a largura seja superior à largura máxima informada, executa-se o dimensionamento do talhão a partir do parâmetro de largura informado.

Para o dimensionamento do talhão a partir da largura máxima informada, inicialmente subtrai-se o valor de largura máxima informado, do maior valor do arquivo matricial de distância euclidiana. Em seguida, cria-se uma máscara com os valores acima deste, utilizando o arquivo matricial de distância euclidiana. Esta máscara é utilizada para recortar o arquivo matricial do MDE da área, obtendo-se o menor valor de cota do MDE recortado. Esta cota é utilizada para geração de uma nova isolinha e um novo talhão. Este processo de dimensionamento de talhão a partir da largura máxima informada é visualizado no fluxograma da Figura 10.

O modelo de dimensionamento de talhões gera os seguintes arquivos de saída: vetor de polígono do talhão (também chamado de talhão teórico), vetor de isolinha (também chamado de linha guia) e, área remanescente após o dimensionamento do talhão. Um modelo para dimensionamento automático foi desenvolvido, repetindo todo o processo, e utilizando o polígono da área remanescente para cálculo do talhão subsequente. Este modelo automático gera novos talhões até que a perda de solo calculada pela USLE seja inferior à tolerância de perda de solo. A linha guia é considerada como carreador, podendo ser um carreador principal ou secundário na sistematização das áreas de cana de açúcar, utilizando a crista dos terraços em nível de base larga como carreador; conforme salientam Benedini & Conde (2008).

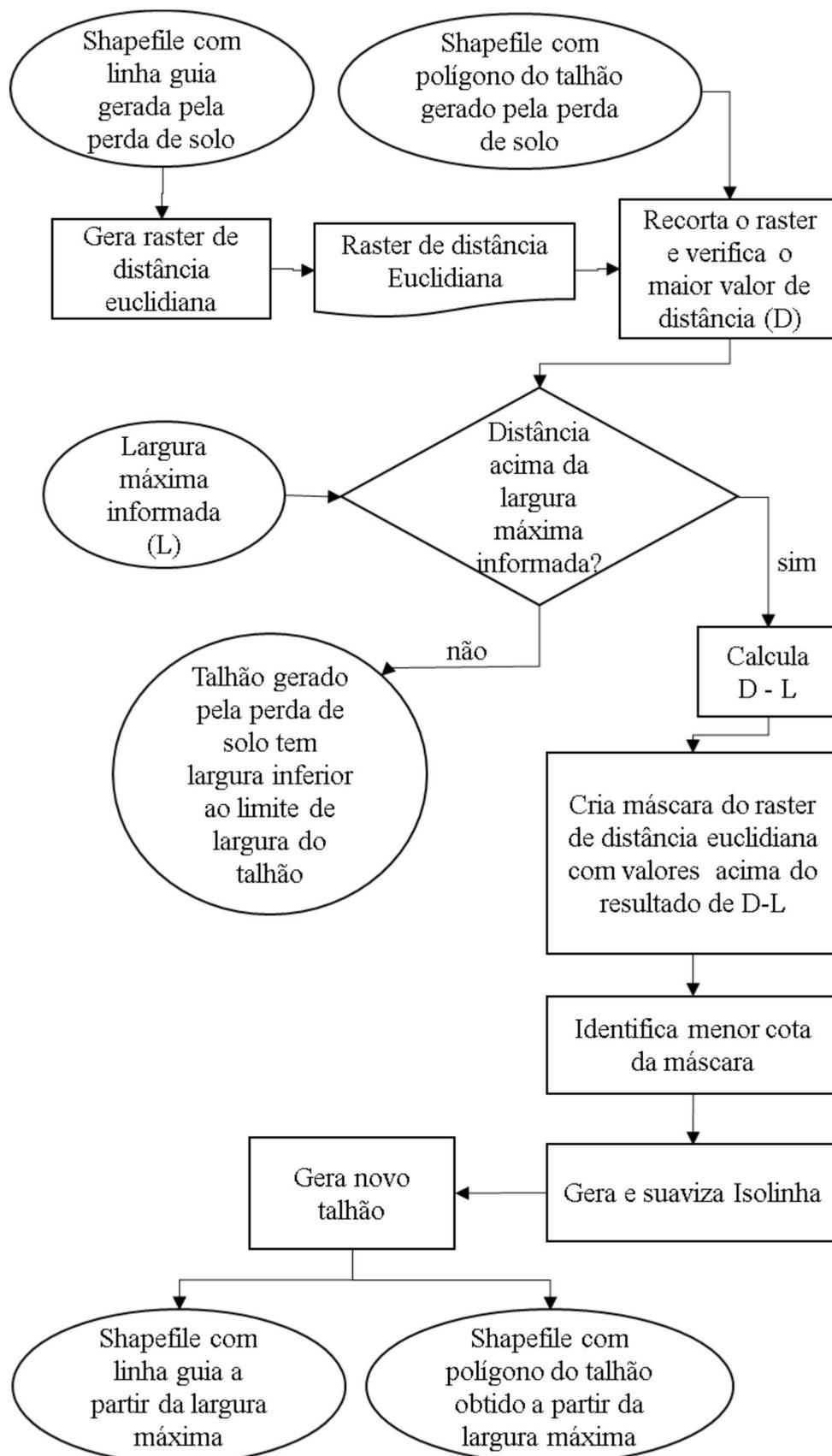


Figura 10. Fluxograma dos procedimentos realizados para dimensionamento do talhão a partir da largura máxima informada.

3.2.1.2. Dimensionamento de sub-talhões

O talhão dimensionado pelo modelo pode apresentar um comprimento da linha guia ou a área total maior do que a área desejada pelo usuário, fazendo-se necessária sua divisão por meio de carregadores em desnível e gerando os sub-talhões. O dimensionamento destes tem como dados de entrada os perímetros dos talhões teóricos, os eixos destes talhões, o vetor com os carregadores secundários (Benedini & Conde, 2008), que no dimensionamento proposto estão em desnível, vetor com o perímetro da área e a informação da largura dos carregadores.

Para esta geração, o modelo gera, inicialmente, um polígono com distância igual à metade da largura dos carregadores para os dois lados de todas as linhas guia e do vetor com os carregadores em desnível. Em seguida a área dos carregadores é subtraída dos talhões teóricos e estes são divididos gerando os sub-talhões. Como arquivos de saída, tem-se um arquivo vetorial com os sub-talhões obtidos a partir dos talhões teóricos desconsiderando-se a área dos carregadores e identificando os sub-talhões gerados com a divisão das áreas dos talhões teóricos pelos carregadores em desnível.

3.2.1.3. Geração das linhas de plantio

Nesta etapa são geradas as linhas de plantio paralelas à linha guia obtida no dimensionamento dos talhões teóricos. É importante salientar que as linhas podem ser geradas com paralelas para cima ou para baixo, de modo que a linha guia de um talhão possa ser usada para gerar as linhas deste talhão teórico e as linhas do talhão imediatamente abaixo, dependendo da necessidade do usuário.

A utilização do talhão teórico para geração das linhas, em comparação à utilização do perímetro dos sub-talhões é justificada pelo fato de se viabilizar a redução de manobras devido à possibilidade de se integrar o trânsito de máquinas de um sub-talhão para outro, pois as linhas foram dimensionadas a partir do talhão teórico que originou os sub-talhões. Caso as linhas fossem dimensionadas a partir de cada sub-talhão, esta continuidade nas operações mecanizadas não poderia ser realizada, haja vista que as linhas de cada sub talhão seriam geradas de forma isolada.

É importante observar que não necessariamente o eixo do talhão de mesmo número deve ser utilizado para geração de suas linhas; pode-se utilizar o eixo do talhão

imediatamente acima, ou seja, para gerar as linhas do talhão 02, pode-se utilizar o eixo do talhão 01 ou o eixo do talhão 02, obtendo linhas paralelas para baixo ou linhas paralelas para cima, respectivamente (Figura 11).

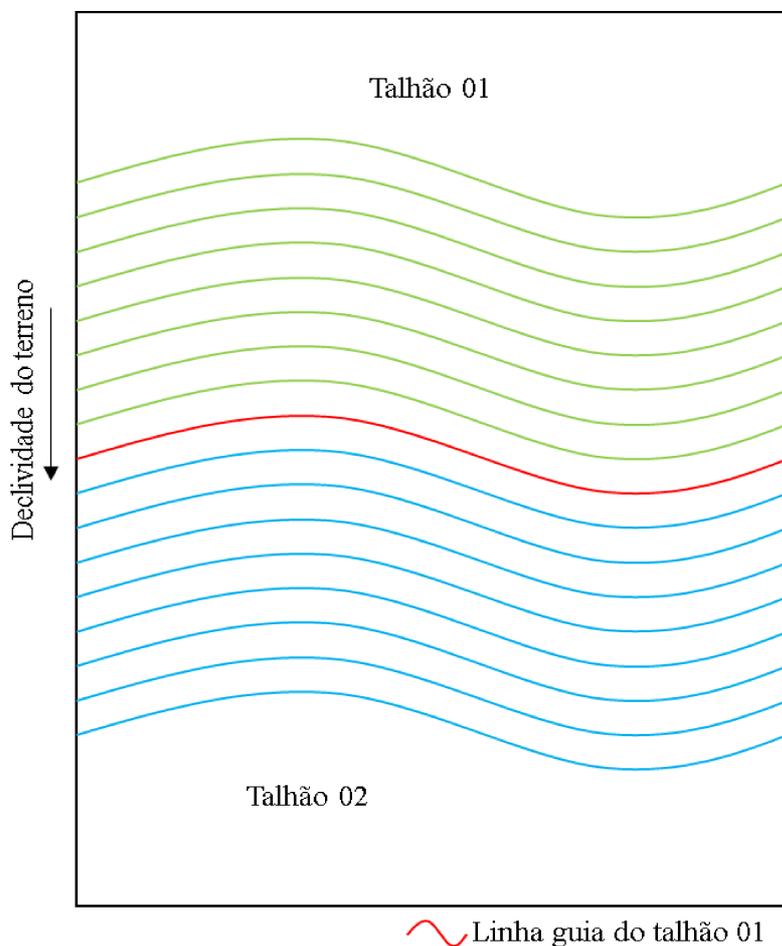


Figura 11. Croqui ilustrando a obtenção de linhas de plantio com paralelas para cima (Verde) ou paralelas para baixo (Azul)

Como a linha guia é obtida a partir de uma curva de nível, este modelo de dimensionamento gera um plantio em nível que reduz o gasto com combustível, o desgaste das máquinas e o custo com manutenção de implementos. Além do aspecto conservacionista deste tipo de plantio, que reduz o risco erosivo, influencia também no cálculo da USLE, pois interfere no fator CP, de uso e manejo do solo (Eduardo et al., 2013).

Um parâmetro fundamental no dimensionamento das linhas de plantio é a identificação da distância máxima que as linhas serão geradas, e esta distância é obtida a partir da identificação do maior valor de célula de um raster de distância euclidiana, recortado pelo vetor do polígono do talhão teórico. Assim como procedeu-se na geração das linhas guia, para evitar a ocorrência de vértices abruptos descritos por Rabelo (2011a), as

linhas de plantio e entre linhas são suavizadas pelo método Paek tendo com tolerância de suavização o valor informado como menor raio de manobra dos implementos utilizados na propriedade rural.

Em seguida as linhas de plantio são finalizadas com o recorte utilizando como referência os polígonos dos sub-talhões. Este arquivo final permite identificar a quantidade de linhas de cada sub-talhão, o comprimento total de linhas e comprimento médio das linhas.

3.2.1.4. Cálculo de volume acumulado nas linhas de plantio

Uma informação importante em termos de conservação do solo e dimensionamento de terraços é o valor das abstrações iniciais, que corresponde à precipitação ocorrida até o início do escoamento superficial, que é dependente da interceptação da chuva pela cobertura vegetal, do armazenamento superficial em pequenas depressões do solo e da infiltração que antecede o escoamento (Pruski, 2009b). Entretanto na cultura da cana de açúcar o plantio é realizado com implantação de sulcos, e estes podem armazenar um razoável volume de escoamento superficial, principalmente se o plantio for realizado em nível, e este valor pode sofrer alterações em função da variação da profundidade de sulco.

Outra operação realizada nas áreas de cana de açúcar é a execução de quebra lombo, na qual nivela-se o terreno transportando solo das entrelinhas em sentido às linhas de plantio, deixando o terreno relativamente sem depressões de sulcos (Carvalho & Moretti, 2010). Embora não seja realizada atualmente, a operação de quebra lombo pode formar um novo sulco na entrelinha, possibilitando um novo armazenamento do escoamento superficial e elevando a linha de plantio em relação à entrelinha, o que facilitaria a operação de colheita.

Neste sentido, o cálculo de volume acumulado pode ser realizado tanto simulando o acúmulo nos sulcos de plantio quanto o acúmulo nas entrelinhas, em profundidades informadas pelo usuário. O volume acumulado simula uma seção triangular com os pontos mais altos nas bordas e o ponto mais baixo do sulco (seja na linha ou na entrelinha) no centro da seção triangular.

Embora o dimensionamento das linhas de plantio seja realizado com paralelas de uma curva de nível, devido à ondulação do terreno as linhas de plantio perdem o nivelamento à medida que se distanciam da linha que as originou. Desta forma não se pode

considerar que todas as linhas terão exatamente a mesma área de seção transversal ou o mesmo volume.

O modelo de cálculo de volume acumulado inicialmente adiciona a informação do terreno às linhas e entrelinhas, criando linhas tridimensionais (3D). Em seguida subtrai-se apenas das cotas das linhas de plantio o valor correspondente à profundidade de sulco, gera-se um modelo de superfície por meio de triangulação por interpolação linear (TIN). O mesmo procedimento pode ser realizado com a entrelinha, assumindo que a operação de quebra lombo resultou em pequenos sulcos de profundidade conhecida. Este TIN representa o relevo com as microvariações oriundas dos sulcos.

A ferramenta *Fill* preenche as pequenas irregularidades geradas pelos sulcos na superfície do terreno (Tarboton et al., 1991), conforme a figura 12. Deste modo a diferença entre as superfícies *Fill* e TIN corresponde à superfície com o valor acumulado nos sulcos. O valor acumulado total pode ser obtido com a somatória de todos os valores das células do raster resultante da subtração.

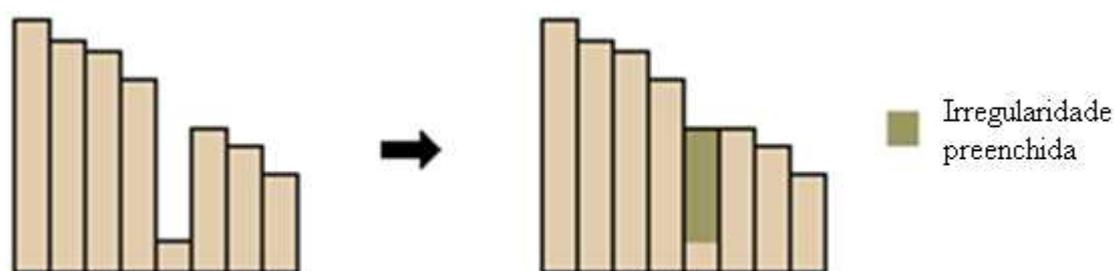


Figura 12. Esquema do funcionamento da operação *Fill*, adaptado de Tarboton et al. (1991).

3.2.1.5. Dimensionamento de terraços.

O dimensionamento dos terraços parte do pressuposto que estes serão construídos sobre as linhas guia, que foram geradas a partir de curvas de nível sobre o terreno. Assim, os terraços dimensionados são do tipo em nível, e o modelo não se aplica para terraços em gradiente. Para seu dimensionamento necessitam-se de dados de chuvas intensas, período de retorno, taxa de infiltração estável da água no solo, volume a ser acumulado e declividade da parede do terraço.

Para se obter o volume de escoamento superficial, utilizou-se o modelo proposto por Pruski et al. (1997). De acordo com os autores, a partir da equação de intensidade-

duração-frequência da precipitação (Equação 28), que descreve a intensidade de precipitação máxima média (I_m), obtém-se a precipitação instantânea (I_i) (Equação 29), e o escoamento superficial máximo ocorre no momento em que a intensidade de precipitação instantânea (I_i) se iguala à taxa de infiltração estável (T_{ie}) (Equação 30), uma vez que a intensidade máxima instantânea tem comportamento exponencial decrescente em relação ao tempo. O valor da duração da chuva foi obtido pelo método Newton-Raphson, e a partir da equação 31 calculou-se a precipitação total e em seguida a infiltração total (equação 32). Salienta-se que a infiltração total calculada desconsidera o excesso de infiltração ocasionado pelo solo não saturado, resultando em um valor de volume de escoamento superficial ligeiramente superior, porém reforçando a segurança do sistema.

$$I_m = \frac{K \cdot T^a}{(t + b)^c} \quad \text{Equação 28}$$

$$I_i = I_m \left(1 - \frac{c \cdot t}{t + b} \right) \quad \text{Equação 29}$$

$$I_i - T_{ie} = 0 \quad \text{Equação 30}$$

$$P_t = \frac{I_m \cdot t}{60} \quad \text{Equação 31}$$

$$I_t = \frac{t \cdot T_{ie}}{60} \quad \text{Equação 32}$$

Em que:

I_i = precipitação instantânea, em mm h^{-1} ;

I_m = intensidade máxima média da chuva, em mm h^{-1} ;

T = período de retorno, em anos;

t = duração da chuva, em minutos;

K, a, b, c = coeficientes de ajustamento específicos para cada localidade,

adimensionais;

T_{ie} = Taxa de infiltração estável, em mm h^{-1} ;

P_t = Precipitação total, em mm;

I_t = Infiltração total, em mm.

O volume a ser armazenado pelo terraço é obtido pela equação 33. Multiplica-se o valor da precipitação total com a área do talhão teórico que originou a linha guia e conseqüentemente a linha do terraço, e deste valor subtrai-se o resultado da multiplicação

da área do talhão teórico com o valor da infiltração total. Além disso, deve-se subtrair o volume acumulado nos sulcos calculado anteriormente.

$$V_t = A_t(P_t - I_t) - V_{lin} \quad \text{Equação 33}$$

Em que:

V_t = Volume a ser armazenado pelo terraço, em m^3 ;

A_t = Área do talhão que originou o terraço, em m^2 ;

P_t = Precipitação total, em mm;

I_t = Infiltração total, em mm;

V_{lin} = Volume acumulado pelos sulcos, em m^3

Uma vez obtido o volume a ser acumulado nos terraços, dividiu-se o volume pelo comprimento do terraço, e o resultado correspondeu à área de seção transversal necessária para acumular todo volume. A seção transversal do terraço é uma seção triangular invertida de base em nível, em que um lado corresponde à declividade média da área de contribuição em $m\ m^{-1}$ (D1) e o outro lado corresponde à declividade da parede do terraço em $m\ m^{-1}$ (D2), conforme a figura 13. A declividade média da área de contribuição é obtida a partir da geração de um raster de declividade gerado com o MDE e obtenção do seu valor médio. A declividade da parede do terraço é informada pelo usuário, e varia de acordo com o tipo de terraço, se este é de base estreita, média ou larga, e pode ser obtida em Codasp (1994) conforme mostra a tabela 2.

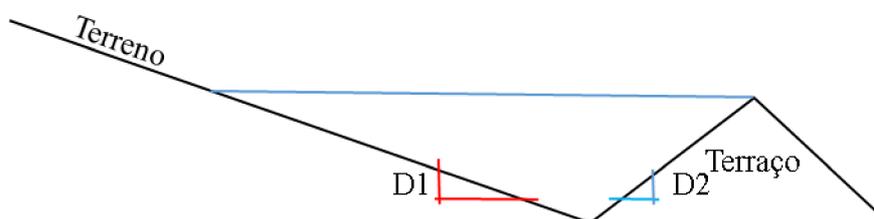
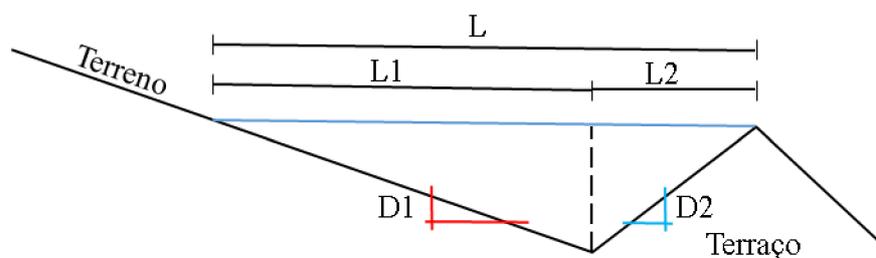


Figura 13. Seção transversal da área de acúmulo do terraço.

Tabela 2. Valores de declividade de parede de terraços (D2) , adaptado de Codasp (1994).

Tipo de Terraço e forma de construção	D2 (m m ⁻¹)
Terraço embutido em nível, construído com trator de esteiras FIAT AD7 B	0,721
Terraço embutido em nível, construído com trator de esteiras FIAT AD14	0,679
Terraço embutido em nível, construído com motoniveladora DRESSER 140C	0,667
Terraço base larga em nível, construído com trator VALMET 1580 tracionando terraceador (sem acabamento)	0,213
Terraço base larga com gradiente, construído com trator VALMET 1580 tracionando terraceador (sem acabamento)	0,170
Terraço base larga com gradiente, construído com trator VALMET 1580 tracionando terraceador (acabamento com aiveca)	0,164
Terraço base larga em nível, construído com motoniveladora HUBER WARCO 140M	0,186 a 0,221
Terraço leirão ou murundum em nível, construído com trator de esteiras FIAT AD_B	0,418

Conforme ilustra a figura 14, a parte em nível da seção triangular da área de acúmulo do terraço pode ser dividida em duas partes, uma com comprimento correspondente à declividade do terreno (L1) e outra com comprimento correspondente à declividade da parede do terraço (L2) (Equação 34). O valor de L1 pode ser calculado pela equação 35 e L2 pela equação 36:

**Figura 14.** Seção triangular da área de acúmulo do terraço dividida pelos comprimentos correspondentes à declividade do terreno e à declividade da parede do terraço.

$$L = L1 + L2 \quad \text{Equação 34}$$

$$L1 = h/D1 \quad \text{Equação 35}$$

$$L2 = h/D2 \quad \text{Equação 36}$$

Em que:

L = Largura total da área de acúmulo de transversal do terraço, em metros;

L1 = largura correspondente à declividade do terreno, em metros;

L2 = largura correspondente à declividade da parede do terraço, em metros;

h = altura do terraço, em metros;

D1 = Declividade média da área de contribuição, em $m\ m^{-1}$;

D2 = Declividade da parede do terraço, em $m\ m^{-1}$.

A área da seção transversal pode ser calculada pela equação 37, e substituindo a largura total pela largura correspondente à declividade do terreno e pela largura correspondente à declividade da parede do terraço, tem-se a equação 38. Simplificando tem-se a equação 39, que possibilita calcular a altura do terraço para que a área de seção transversal seja suficiente para acumular todo volume necessário.

$$A = (L \cdot h)/2 \quad \text{Equação 37}$$

$$A = \left(\frac{h}{D1} + \frac{h}{D2} \right) \frac{h}{2} \quad \text{Equação 38}$$

$$h = \sqrt{\frac{A \cdot 2 \cdot D1 \cdot D2}{(D2 + D1)}} \quad \text{Equação 39}$$

Em que:

A = área de seção transversal da área de acúmulo do terraço, em m^2 ;

L = Largura total da área de acúmulo de transversal do terraço, em metros;

L1 = largura correspondente à declividade do terreno, em metros;

L2 = largura correspondente à declividade da parede do terraço, em metros;

h = altura do terraço, em metros;

D1 = Declividade média da área de contribuição, em $m\ m^{-1}$;

D2 = Declividade da parede do terraço, em $m\ m^{-1}$.

3.2.2. Desenvolvimento da ferramenta computacional

A ferramenta computacional foi desenvolvida na forma de ferramentas vinculadas ao *software* ArcGis, devido à confiabilidade do *software* e à grande difusão deste entre os profissionais da área de Geoprocessamento, o que facilita a distribuição da ferramenta e bem como sua utilização. A ferramenta conta com *scripts*, que são arquivos com linhas de código possíveis de serem interpretadas e executadas por um *software*. No presente trabalho os *scripts* foram desenvolvidos na linguagem *ArcPython*, um formato específico de programação do *Software* ArcGis, derivado da linguagem *Python*.

A ferramenta foi desenvolvida em 12 *scripts* disponíveis para o usuário na forma de uma *tool box* compatível com o *software* ArcGis. São eles: Cria Projeto, Limpa Terraços, MDE, USLE, Talhão Isolado, Talhões Automáticos, Talhão Manual, Talhão Final, Gera Linha, Gera Linha Final, Gera Terraço, Relatório Final.

O *script* Cria Projeto tem como dados de entrada a pasta na qual o projeto será criado, e como saída, cria uma pasta com o nome do projeto, informado pelo usuário, e nesta pasta cria as sub-pastas “DADOS”, “TALHAO_FINAL”, “TALHAO_FINAL_LINHAS”, “TALHAO_TEORICO”, TALHAO_TEORICO_LINHAS”, ” TEMP” e “TERRACO”. Estas sub-pastas serão utilizadas pelos demais *scripts*.

O *script* Limpa Terraços faz uma filtragem nos pontos cotados que foram coletados nas áreas, pois como a ferramenta se dispõe a dimensionar os talhões, linhas de plantio e terraços, os terraços existentes não podem ser considerados, uma vez que estes serão destruídos. Deste modo, o *script* tem como entrada um arquivo vetorial de linhas dos terraços existentes, a distância de influência dos terraços e os pontos cotados. O *script* gera um polígono a partir das linhas dos terraços, com distância igual à distância de influência informada, e apaga todos os pontos que estão dentro deste polígono. Como saída, é criado um arquivo vetorial de pontos na pasta “DADOS” do banco de dados, com os pontos remanescentes. Este é um *script* opcional, uma vez que caso a área a ser dimensionada não tenha terraços existentes, o usuário pode seguir direto para o *script* MDE.

O *script* MDE cria o modelo digital de elevação a partir dos pontos cotados e recorta o modelo a partir do perímetro da área. O MDE é gerado utilizando a interpolação do modelo “Topo to Raster” do ArcGIS, baseada no ANUDEM (Hutchinson, 2011), permitindo inserir a precisão altimétrica dos dados coletados. O arquivo com os pontos cotados deve ser um arquivo do tipo *shapefile* de pontos, e sua tabela obrigatoriamente deve

conter uma coluna de nome “Z” do tipo “double”, contendo os valores de cota dos pontos. O arquivo de saída é um arquivo TIFF, e a pasta de destino é a pasta “DADOS” do banco de dados.

Em seguida, executa-se o *script* USLE, que tem como entrada os fatores C, P, R e K da USLE, o polígono com o perímetro da área, o MDE gerado anteriormente, e tem como saída um raster no formato TIFF com os valores de perda de solo da área. É um *script* utilizado para verificar os valores de perda de solo, se estes estão acima ou abaixo dos limites de perda de solo, e em quais áreas as perdas são maiores ou concentradas, facilitando a interpretação dos resultados e o planejamento na divisão dos talhões.

Após a verificação dos resultados da USLE, o usuário pode optar por três *scripts* para criação dos talhões teóricos: Talhão Manual, Talhão Isolado ou Talhões Automáticos. O talhão manual é utilizado quando a perda de solo da área é abaixo do limite de perda daquele solo, ou seja, a partir da USLE verifica-se que não são necessários terraços na área. Entretanto, para fins de planejamento de talhões, verifica-se a necessidade de dividir a área. Assim, tendo como entrada o perímetro da área, o MDE, o raio mínimo, número do talhão e a cota da linha guia; gera-se uma linha guia e a área acima desta é associada a um talhão teórico. A cota pode ser obtida consultando o raster de MDE, ou gerando curvas de nível, no próprio software de geoprocessamento e verificando quais linhas podem ser utilizadas como linha guia para que se obtenham talhões com largura e área próximas ao que o usuário deseja. Os arquivos de saída estarão localizados na pasta “TALHÃO_TEORICO” do banco de dados, e são o vetor com o perímetro do talhão teórico, a linha guia, e a área remanescente do perímetro.

O *script* Talhão Isolado cria um talhão a partir da perda de solo da área e da largura máxima informada pelo usuário. Tem como dados de entrada o vetor com o perímetro da área, MDE da área, fatores CP, R e K da USLE, limite de perda de solo, raio mínimo de manobra, número do talhão e largura máxima do talhão. Conforme descrito no item que aborda o desenvolvimento do modelo, mais especificamente sobre o dimensionamento de talhões, o *script* executa a USLE para toda a área, verifica a cota mais alta das áreas com perda de solo acima do limite, e esta cota é utilizada para geração da linha guia e do polígono do talhão. Em seguida, faz-se a verificação da largura do talhão, e se esta for superior à largura máxima informada, é realizado o ajuste da largura do talhão para que este fique mais próximo à largura máxima informada. Os procedimentos realizados pelo *script* Talhão isolado são semelhantes aos apresentados nas Figuras 9 e 10, apresentadas na

metodologia do modelo. Os arquivos de saída do *script* talhão Isolado também estão localizados na pasta “TALHAO_TEORICO” do banco de dados, e são o vetor com a linha guia, o vetor com o perímetro do talhão, o vetor com a área remanescente do perímetro após a criação do talhão, o MDE da área remanescente e um arquivo raster de perda de solo do talhão gerado.

O *script* Talhão Automático segue a mesma lógica de funcionamento do *script* Talhão Isolado, porém após a criação do primeiro talhão os talhões seguintes são criados de forma automática, até que a perda de solo da área remanescente seja inferior ao limite de perda de solo. Em seguida, verifica-se quantos polígonos compõem a área remanescente, e cada polígono dá origem a um novo talhão teórico.

Após a criação de todos talhões teóricos, é necessário criar manualmente um arquivo vetorial com as linhas que representam o eixo dos carregadores em desnível, ou seja, os carregadores que dividirão os talhões teóricos. O *script* Talhão Final tem como entrada todos os arquivos vetoriais de polígono dos talhões teóricos e eixos, o arquivo vetorial com as linhas dos eixos dos carregadores em desnível, o vetor com o polígono do perímetro da área e finalmente, a largura dos carregadores. Os eixos dos carregadores em nível, e dos carregadores em desnível são unidos, e em seguida o *script* cria um polígono de *buffer*, distante dos eixos em metade da largura dos carregadores informada. O polígono de *buffer* é usado para dividir os talhões teóricos, e a partir da numeração deste é criada uma nova sequência para identificação dos sub-talhões. Desta forma, um talhão de número 2, pode dar origem aos sub-talhões 2_1, 2_2 e 2_3. Este *script* tem como arquivos de saída na pasta “TALHAO_FINAL” do banco de dados, um arquivo contendo todos eixos dos carregadores em nível, o arquivo de polígono dos carregadores, um arquivo vetorial com o polígono de cada sub-talhão, e um arquivo vetorial contendo o polígono de todos os sub-talhões. A figura 15 apresenta o fluxograma dos procedimentos realizados pelo *script* Talhão Final.

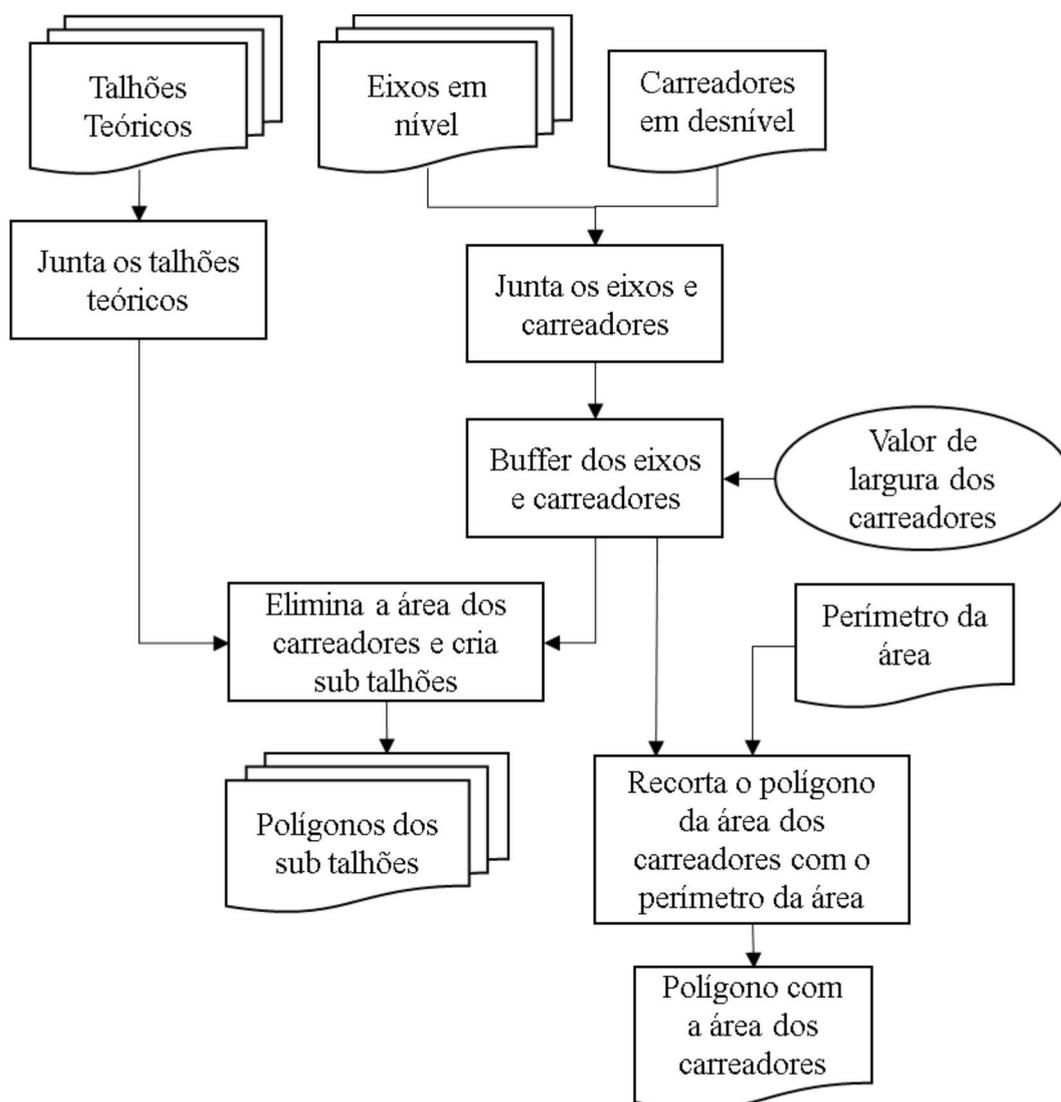


Figura 15. Fluxograma dos procedimentos realizados pelo *script* Talhão Final.

O *script* Gera Linha é utilizado para geração das linhas de plantio a partir de paralelas em relação a um eixo, e limitadas por um polígono. Desta forma, as linhas podem utilizar tanto o sub-talhão como polígono de limite, como um talhão teórico. A utilização do talhão teórico para geração das linhas apresenta como vantagem a possibilidade de se pular o carreador em desnível ao executar as operações mecanizadas, reduzindo ainda mais o número de manobras na área. Este *script* tem como parâmetros de entrada, a largura do carreador, o espaçamento entre linhas, o arquivo vetorial com o eixo que será utilizado para geração das linhas, o perímetro do talhão, o MDE da área, o raio mínimo de manobra, e o número do talhão cujas linhas serão geradas.

As linhas são geradas como linhas paralelas em relação à linha guia. Inicialmente, gera-se uma linha com metade da largura do carreador, e este é tida como entre

linha, em seguida é gerada uma nova linha com distância igual à metade do valor de espaçamento, e esta é tida como linha de plantio. Seguidamente, são geradas novas entrelinhas e linhas. As linhas são geradas, suavizadas e posteriormente recortadas pelo perímetro do talhão. Os arquivos de saída deste *script* ficam localizados na pasta “TALHAO_TEORICO_LINHAS” do banco de dados e são dois arquivos: um arquivo com as linhas de plantio do talhão, e outro com as linhas e entrelinhas do talhão.

Após a geração das linhas, utiliza-se o *script* Gera Linha Final, no qual as linhas são recortadas pelo perímetro dos sub-talhões, e associadas ao sub talhão do qual fazem parte. Este *script* tem como arquivos de entrada todos os arquivos vetoriais com as linhas de plantio dos talhões, e o arquivo vetorial contendo o perímetro de todos os sub-talhões, gerado pelo *script* Talhão Final. Os arquivos gerados por este *script* estão localizados na pasta “TALHAO_FINAL_LINHAS”, do banco de dados, e são os arquivos das linhas de cada sub-talhão, e um arquivo contendo todas as linhas dos sub-talhões.

Após o dimensionamento dos terraços e das linhas de plantio, executa-se o dimensionamento dos terraços, com o *script* Terraço. Este *script* calcula o volume acumulado nas linhas de plantio em função da profundidade do sulco, o volume total precipitado, o volume de escoamento superficial infiltrado pelo solo e finalmente calcula o volume a ser acumulado pelo terraço, e a altura deste para que acumule o volume calculado. Este *script* calcula de uma só vez, todos os terraços da área agrícola, e tem como parâmetros de entrada: todos os arquivos de linha e entrelinha gerados pelo *script* Gera Linha; o arquivo com o polígono de todos os sub-talhões, o arquivo com todos os talhões teóricos e o arquivo com todos os eixos dos carregadores em nível, gerados pelo *script* Talhão Final; o MDE da área, a profundidade do sulco, os parâmetros K, A, B e C de chuvas intensas; o período de retorno, o valor de condutividade hidráulica do solo saturado, e o valor de declividade da parede do terraço. Os arquivos de saída deste *script* ficam localizados na pasta “TERRACOS” do banco de dados e são os arquivos vetoriais de linha e entrelinha 3D de cada talhão teórico, os arquivos raster de volume acumulado de cada talhão teórico, e o arquivo vetorial com os terraços, que tem a mesma localização geográfica dos eixos dos talhões teóricos, porém este arquivo tem em sua tabela de atributos, valores de altura do terraço, comprimento do terraço, volume acumulado nas linhas de plantio, e volume total a ser acumulado pelo terraço.

Finalmente, o *script* Relatório Final apresenta um relatório a partir dos dados dos arquivos gerados. Este *script* não tem parâmetros de entrada informados pelo usuário, pois

utiliza os arquivos estatísticos gerados pelos *scripts* anteriores. Além disso, todos os *scripts* geram durante seu processamento, relatórios intermediários com as informações dos dados processados. Este relatório é disponibilizado na caixa de diálogo de execução de ferramentas do *software* ArcGis, e pode ser copiado pelo usuário no formato de texto ASCII e utilizado em diversos editores de texto.

3.3. UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL E COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES METODOLOGIAS DE DIVISÃO DE TALHÕES

A utilização da ferramenta computacional desenvolvida foi realizada com dados de uma propriedade localizada no município de Bom Jesus de Goiás, Goiás (Figura 2), em uma área de reforma de canavial com solo do tipo Latossolo Vermelho com área total de 133,7 ha.

O *script* Gera Projeto foi utilizado para criar os diferentes projetos. Em cada projeto, inicialmente selecionou-se a opção “*Geoprocessing/Environments*” na barra de ferramentas do *software* ArcGis, e a pasta do projeto criada pelo *script* Cria Projeto foi indicada como “*Current Workspace*”. Em seguida o arquivo de cada projeto foi salvo na referida pasta, com a extensão .mxd, e os arquivos do tipo shapefile (.shp) contendo os pontos cotados, o perímetro da área e os terraços existentes foram copiados para a pasta “DADOS” do projeto.

Os *scripts* da ferramenta computacional foram testados individualmente, verificando os dados gerados, emissão de relatórios e funcionamento.

Após a verificação do funcionamento da ferramenta computacional, esta foi utilizada na comparação com outras metodologias de dimensionamento de terraços. Foram dimensionados talhões de acordo com a perda de solo calculada pela USLE, e talhões dimensionados com a USLE (cenário A) com largura ajustada de acordo com o valor de largura máxima dos talhões (Metodologia USLE+L) (cenário B). Além da utilização da ferramenta computacional para dimensionamento de talhões, linhas de plantio e terraços, realizou-se a geração de talhões a partir de terraços dimensionados com o *software* Terraço 4.0, utilizando o espaçamento pelo método Lombardi Neto (Lombardi Neto et al., 1994) (cenário C) e pelo método Espaçamento Arbitrado (cenário D).

A utilização da ferramenta foi separada em três etapas:

Etapa 1: Dimensionamento de talhões, comparando quantidade de talhões, área média e área de carregadores, para os quatro cenários.

Etapa 2: Dimensionamento de linhas de plantio, analisando a geração de linhas paralelas para cima ou para baixo do eixo, número de manobras, comprimento médio de linhas e comprimento total de linhas, para os quatro cenários.

Etapa 3: Verificação do volume acumulado nas linhas de plantio em função de diferentes profundidades de sulco, e sua influência na altura dos terraços para os cenários A e B.

Além dos quatro cenários, foi realizado o levantamento da situação antiga da área de estudo, com a medição em campo dos talhões antigos, carregadores e identificação de eixos para geração de linhas. Para a realização destes levantamentos, no ponto mais alto do perímetro da área foi implantada uma base de apoio imediato (A.B.N.T., 1998), utilizando um receptor GNSS RTK da marca Topcon, modelo GR3, operando em modo de coleta de dados para pós processamento com dupla frequência (L1, L2), por um período de 6 horas e intervalo de gravação de 5 segundos. Em seguida os pontos de interesse foram coletados utilizando um par do mesmo receptor GNSS RTK, operando em modo de correção via rádio em tempo real, com coleta manual de pontos. Posteriormente em ambiente SIG, as linhas de plantio foram geradas como linhas paralelas a partir das linhas de eixo identificadas em campo. Os resultados do levantamento manual, bem como as linhas de plantio antigas geradas em ambiente SIG foram denominados como cenário E. O levantamento manual também foi realizado para a coleta do perímetro da área de estudo e levantamento dos terraços existentes.

3.3.1. Dimensionamento dos talhões

Para o dimensionamento dos talhões, foram necessários os seguintes dados de entrada para a ferramenta computacional desenvolvida e o *software* Terraço 4.0: Parâmetros K, R e CP da USLE, MDE da área de estudo, limite de perda de solo, condutividade hidráulica do solo saturado, dados de chuvas intensas da região, período de retorno, declividade da parede dos terraços dimensionados, largura dos carregadores e espaçamento entre as linhas de plantio.

O parâmetro CP da USLE foi obtido em Amorim et al. (2009), considerando como características o cultivo de cana de açúcar em sulco e em nível, com fator C igual a

0,15 e como práticas conservacionistas o plantio em contorno, com fator P igual a 0,5, desta forma obtendo um valor de parâmetro CP igual a 0,075 (adimensional). O parâmetro R, de erodibilidade do solo foi obtido em Silva et al. (1997a), que obteve um valor de 0,009 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ para Latossolo Vermelho. E o parâmetro R foi obtido em Mendonça et al. (2009), com valor de 9214 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹.

O limite de perda de solo considerado foi de 12.3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, de acordo com Oliveira et al. (2008). Os dados K, a, b e c de chuvas intensas (Equação 5) foram obtidos a partir do *software* Plúvio 2.1 (G.P.R.H., 2006), para o município de Edéia, município mais próximo à área de estudo que consta no banco de dados, obtendo valores de 947,33 para o parâmetro K, 0,174 para o parâmetro “a”, 12,00 e 0,760 para os parâmetros “b” e “c” respectivamente. O período de retorno considerado foi de 10 anos, conforme Pruski (2009a).

A condutividade hidráulica da água no solo saturado foi obtida por meio do ensaio de condutividade com amostra indeformada de solo de acordo com a metodologia descrita em Donagema et al. (2011), obtendo o valor de 12 mm h⁻¹.

O parâmetro construtivo utilizado, referente à declividade da parede dos terraços, foi de 0,213 m.m⁻¹ conforme Codasp (1994), para terraços de base larga em nível. O espaçamento entrelinhas foi adotado o valor de 1,50 metros, e 6,0 metros de largura de carreador, de acordo com Lionço et al. (2010).

Como peculiaridades de cada cenário, na metodologia USLE+L considerou-se o valor de 300 metros de largura máxima do talhão (Lionço et al., 2010). Para o dimensionamento dos terraços utilizando a metodologia Lombardi Neto et al., considerou-se como cultura a cana de açúcar, grupo 5 de preparo do solo, grupo de solo A, com alta resistência à erosão. Para o dimensionamento dos terraços pela metodologia Espaçamento Arbitrado, considerou-se como espaçamento vertical o valor de 2,37 metros, obtido a partir de levantamentos em campo de terraços existentes em áreas agrícolas similares e com mesmo sistema de manejo na região da área de estudo.

Para geração do MDE da área, foram coletados pontos cotados com receptor GNSS RTK modelo GR3 do fabricante Topcon, com base instalada na base de apoio imediato da área, e com o equipamento móvel instalado sobre um quadriciclo operando na velocidade de 2,7 m s⁻¹. O receptor GNSS foi configurado para operar em modo de correção via rádio em tempo real com coleta de pontos com intervalo de 1 metro de distância horizontal, percorrendo toda a área com espaçamento de 10 metros entre passadas, perfazendo um total de 1000 pontos por hectare. Desta forma, atendeu-se a NBR 13133

(A.B.N.T., 1994) no que se refere à levantamentos altimétricos para produção de dados compatíveis com curvas de nível com equidistância vertical de 1 metro.

Os pontos cotados coletados foram processados na ferramenta computacional desenvolvida (Item 3.2.2). Realizou-se a limpeza dos pontos da área de influência dos terraços existentes, como uso do *script* “Limpa Terraço”, e em seguida utilizou-se o *script* “MDE” para obtenção do Modelo Digital de Elevação da Área, com resolução espacial de 1 metro, conforme mostra o fluxograma da Figura 16. A partir do MDE foi gerado um arquivo *raster* de declividade, e ambos foram utilizados para o dimensionamento dos terraços dos cenários C e D no *software* Terraço 4.0.

Os talhões do cenário A foram obtidos inicialmente com os talhões teóricos gerados pelo *script* “Talhões Automáticos” a partir da perda de solo da área e considerando 10000 metros como valor de largura máxima, para que este valor não influenciasse no dimensionamento dos talhões. Em seguida foi criado manualmente o vetor das linhas centrais dos carregadores em desnível, utilizadas para obtenção dos sub-talhões gerados pelo *script* “Talhão Final” (Figura 17). Os talhões do cenário B foram obtidos de forma similar aos talhões do cenário A, porém utilizando o valor de largura máxima de 300 metros e um novo arquivo criado manualmente de vetor dos eixos dos talhões em desnível (Figura 18).

Os talhões dos cenários C e D foram gerados de forma similar. Inicialmente os terraços dimensionados pelo *software* Terraço 4.0 de acordo com a metodologia Lombardi Neto (cenário C) e com a metodologia de espaçamento arbitrado (cenário D) foram exportados no formato TXT, importados no *software* ArcGis como sequência de pontos e convertidos em vetores de linhas. Estas linhas foram utilizadas para dividir o perímetro da área e como referência para criação dos arquivos vetoriais de eixos dos carregadores em desnível. Os perímetros dos talhões teóricos originados dos terraços, bem como os vetores de eixos dos carregadores em desnível foram utilizados como parâmetros de entrada do *script* “Talhão Final”, obtendo como resultado os talhões dos cenários C e D isoladamente. A Figura 19 apresenta o fluxograma com as etapas realizadas para obtenção dos talhões dos cenários C e D.

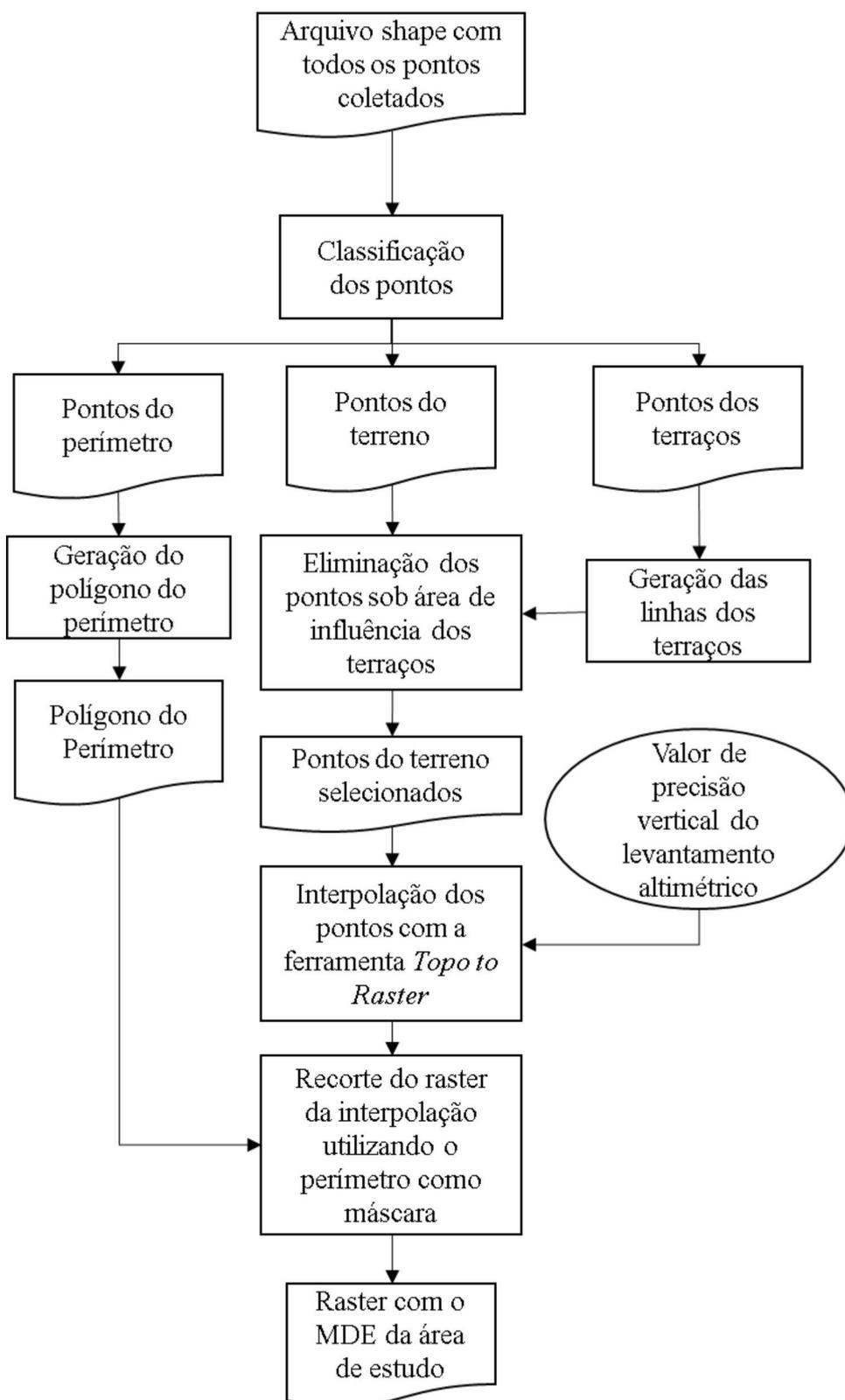


Figura 16. Fluxograma com as etapas realizadas para obtenção do MDE da área de estudo.

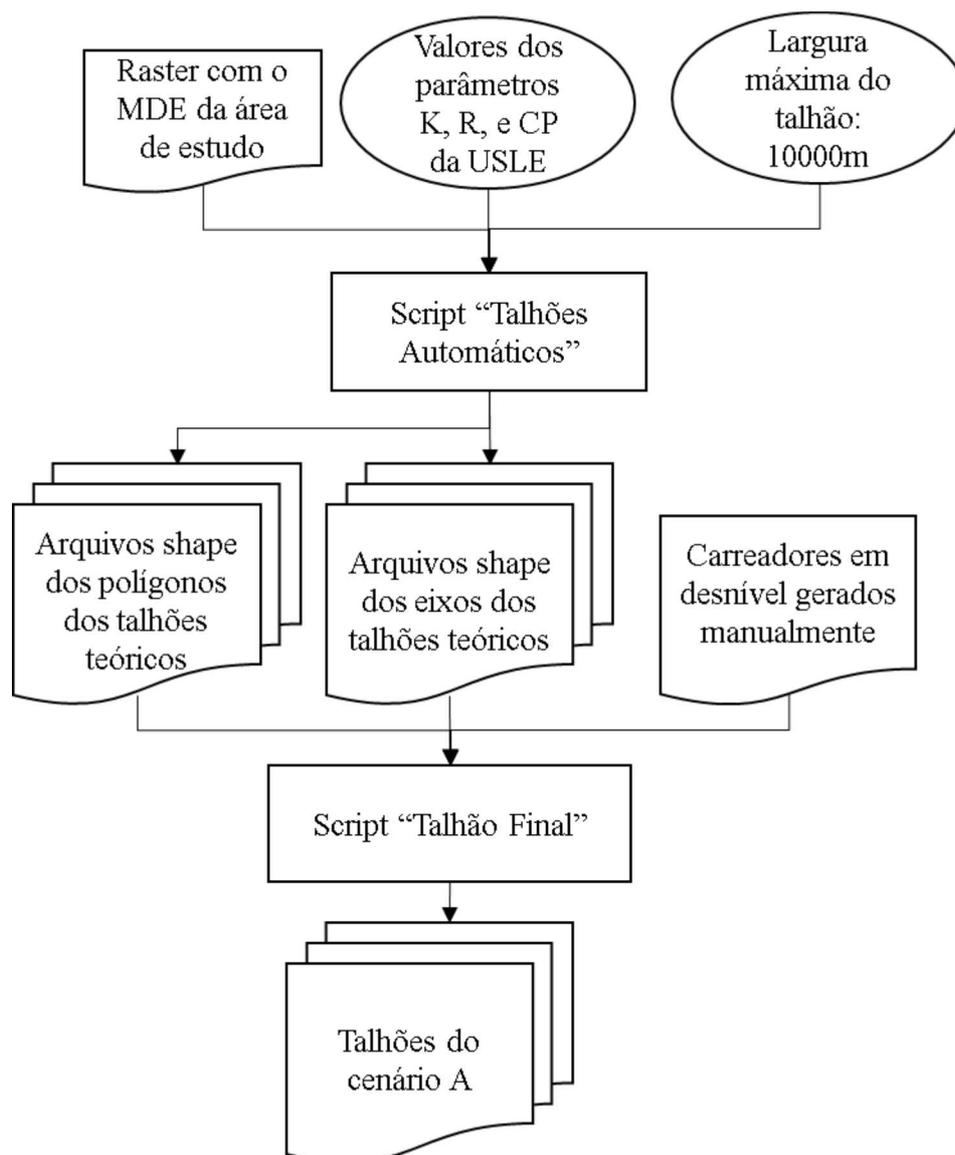


Figura 17. Fluxograma com as etapas realizadas para obtenção dos talhões teóricos gerados pelo *script* "Talhões Automáticos" a partir da perda de solo da área e considerando 10000 metros como valor de largura máxima (Cenário A).

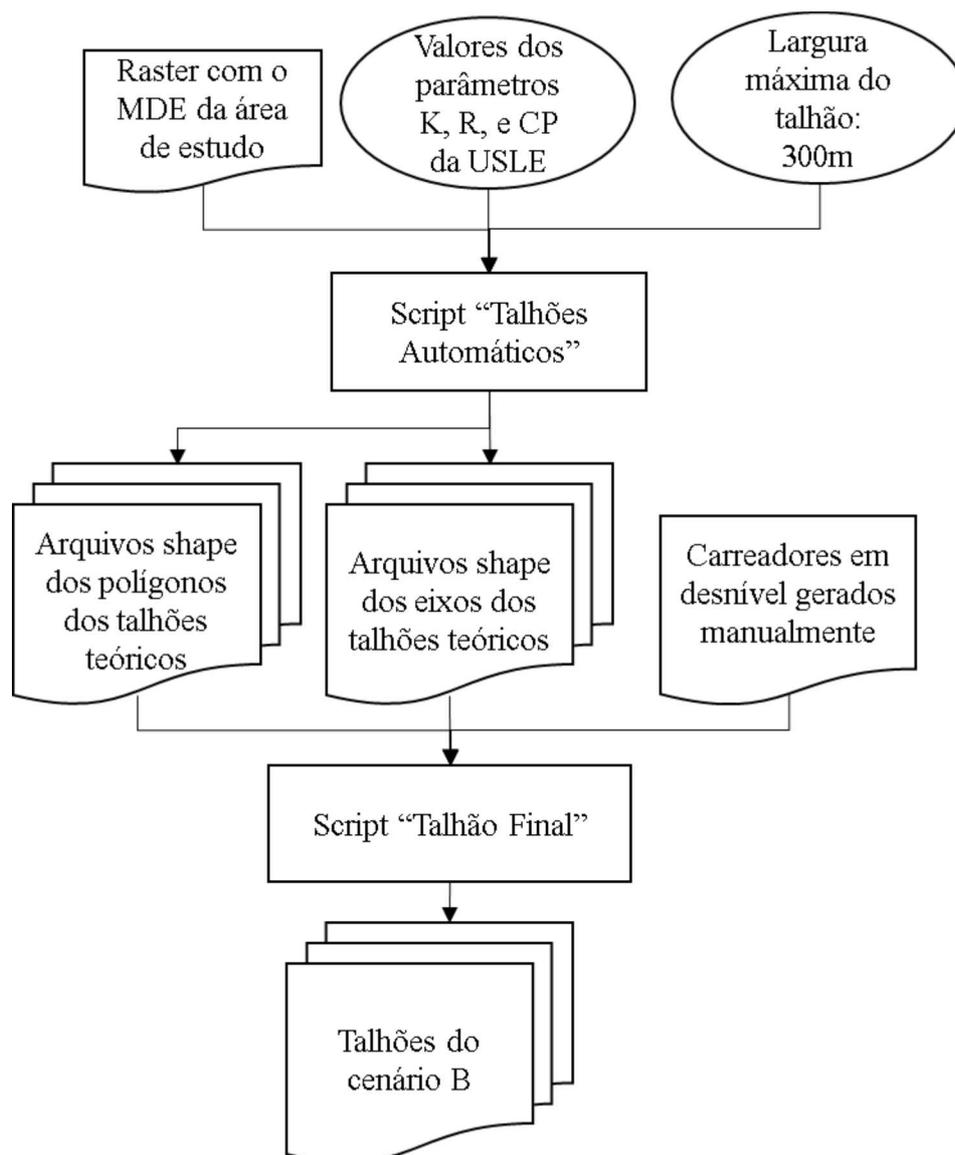


Figura 18. Fluxograma com as etapas realizadas para obtenção dos talhões teóricos gerados pelo *script* "Talhões Automáticos" a partir da perda de solo da área e considerando 300 metros como valor de largura máxima.

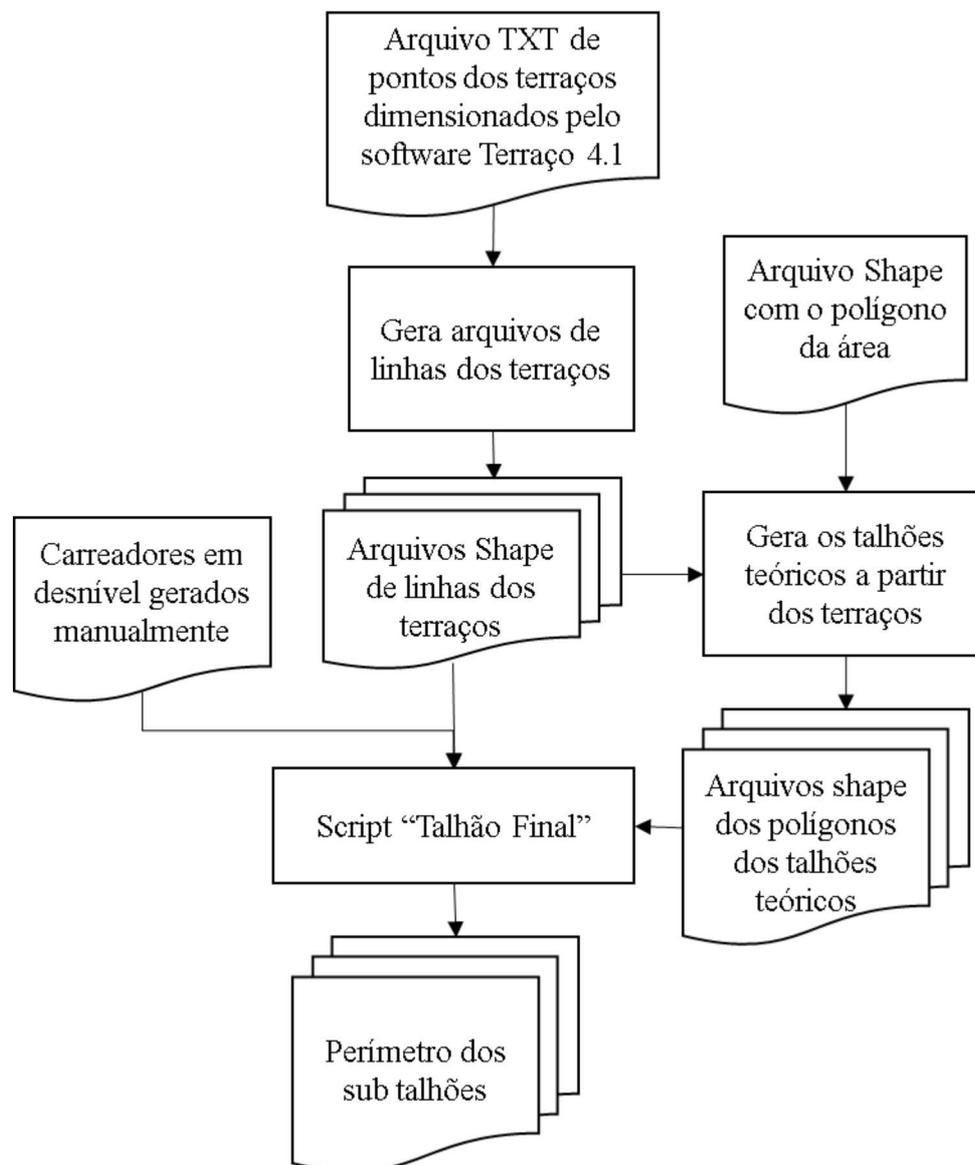


Figura 19. Fluxograma com as etapas realizadas para obtenção dos talhões a partir dos terraços gerados de acordo com a metodologia Lombardi et al. e com a metodologia de espaçamento arbitrado.

3.3.2. Geração das linhas de plantio

As linhas de plantio foram geradas com uso do *script* “Gera Linha” da ferramenta computacional desenvolvida, usando como parâmetros de entrada o perímetro do talhão teórico, a linha guia e o valor de 1,50 metros como espaçamento entre linhas. Foram utilizadas como linha guia a linha do próprio talhão, gerando linhas paralelas para cima, e a linha guia do talhão imediatamente acima, gerando linhas paralelas para baixo. Apenas nos

primeiros talhões as linhas foram geradas apenas para baixo, pois não existe talhão imediatamente acima ao primeiro talhão gerado, e nos últimos talhões foram geradas apenas linhas para baixo, com as linhas guia do talhão imediatamente acima, uma vez que os últimos talhões não têm linhas guia.

Em seguida, as linhas obtidas pelo *script* “Gera Linha” foram utilizadas como parâmetro de entrada do *script* “Gera Linha Final”, o qual recortou as linhas de acordo com o sub talhão com localização correspondente. Deste modo, foram obtidas as linhas de plantio de todos os sub-talhões dos cenários A, B, C e D, sendo possível a quantificação de dados como quantidade de linhas, comprimento médio e comprimento total. Além disso, foi realizada uma comparação entre as linhas geradas para cima ou para baixo, identificando em cada sub talhão, qual tipo de dimensionamento obteve o melhor resultado, ou seja: menor número de manobras e maior comprimento médio e total de linhas.

As linhas do cenário E também foram geradas com o *script* “Gera Linha” a partir das linhas guia identificadas para cada talhão existente na área de estudo, e em seguida foi utilizado o *script* “Gera Linha Final” para recortar as linhas de acordo com a localização dos sub-talhões.

Para facilitar a análise dos resultados, as linhas de plantio foram classificadas de acordo com seu comprimento nas seguintes classes: abaixo de 50 metros, entre 100 e 350 metros, entre 350 e 700 metros e acima de 700 metros. O valor de 700 metros como limite superior foi utilizado em função da recomendação de comprimento máximo de 700 metros para linhas de plantio de cana-de-açúcar, conforme Benedini & Conde (2008).

3.3.3. Acúmulo de escoamento superficial em função da profundidade de sulco

Nos cenários A e B foi realizada a análise do volume de escoamento superficial acumulado nas linhas de plantio em função da profundidade do sulco, e sua influência na altura recomendada dos terraços. Foram consideradas quatro profundidades de sulco: 0,00 m, 0,10 m, 0,20 m e 0,30 m. A análise foi realizada considerando o dimensionamento das linhas paralelas para cima e paralelas para baixo, isoladamente.

No *script* “Terraço” foram utilizados os mesmos parâmetros de entrada de chuvas intensas, período de retorno, condutividade hidráulica do solo saturado e declividade da parede do terraço foram os mesmos utilizados para alimentar o *software* Terraço 4.0. Em

seguida, obteve-se o valor do volume acumulado nas linhas de plantio e altura recomendada dos terraços.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. QUALIDADE DE LEVANTAMENTOS ALTIMÉTRICOS REALIZADOS COM QUADRICICLO

As velocidades do quadriciclo obtidas para a primeira, segunda e terceira marcha 4x4, foram respectivamente: 2,02, 3,89 e 6,54 m.s⁻¹.

Na Tabela 3 é apresentada a estatística descritiva dos valores de diferença vertical obtidos nos levantamentos, considerando as diferentes velocidades, sentidos e declividade das áreas, respectivamente. Verifica-se que os valores médios dos desvios foram muito baixos, todos abaixo de 10mm, porém, verifica-se que com o aumento da velocidade tanto o desvio padrão quando a amplitude dos desvios aumentou de forma considerável, enquanto a amplitude na velocidade 1 foi de 0.2803m, na velocidade 3 o valor atingiu 0.9321m. O mesmo comportamento foi verificado para a amplitude das diferenças verticais nos diferentes sentidos, com um aumento na amplitude, e variações no valor da média das diferenças verticais. Associa-se o aumento na amplitude das diferenças verticais para os sentidos que cruzaram as linhas de plantio à trepidação do quadriciclo e maior movimentação da suspensão ao passar por terrenos sujeitos à ondulação da superfície resultante dos sulcos da cana de açúcar.

O teste de comparação de médias verificou diferença significativa entre as diferentes declividades e entre os sentidos de levantamento. Não foi verificada diferença significativa entre as médias das diferentes velocidades, de modo que na Tabela 3, médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente a 5% de probabilidade de acordo com o teste t de Student. A análise estatística do experimento fatorial verificou interação significativa apenas entre os fatores de variação declividade e sentido de levantamento; na Tabela 4 são apresentados os resultados do teste de comparação de médias desta interação.

Tabela 3. Estatística descritiva dos valores de diferença vertical observados considerando as diferentes velocidades, sentidos de levantamento e declividades.

Velocidades	Velocidade 1*	Velocidade 2*	Velocidade 3*
Média (metros)	0,0017a	-0,0025a	-0,0021a
D. Padrão (metros)	0,0314	0,0485	0,0590
Mediana (metros)	0,0024	0,0008	0,0004
Amplitude (metros)	0,2803	0,8779	0,9321
Valores negativos (%)	46,60	49,02	49,40
Valores positivos (%)	53,33	50,98	50,60

Sentidos de levantamento	N**	Ts**	Td**	Ps**	Pd**
Média (metros)	0,0078a	-0,0038b	-0,0100b	0,0065a	-0,0053b
D. Padrão (metros)	0,0315	0,0415	0,0379	0,0512	0,0662
Mediana (metros)	0,0079	-0,0032	-0,0093	0,0087	-0,0012
Amplitude (metros)	0,2086	0,6336	0,4719	0,8779	0,9321
Valores negativos (%)	36,72	54,18	61,80	37,35	51,64
Valores positivos (%)	63,28	45,82	38,20	62,65	48,36

Declividades	00%	05%	10%
Média (metros)	0,0071a	-0,0092c	-0,0008b
D. Padrão (metros)	0,0323	0,0601	0,0451
Mediana (metros)	0,0088	-0,0051	-0,0020
Amplitude (metros)	0,6055	0,9321	0,7320
Valores negativos (%)	36,57	56,51	51,94
Valores positivos (%)	63,37	43,49	48,06

* Velocidades 1, 2 e 3 com valores de 2,02, 3,89 e 6,54 m.s⁻¹, respectivamente.

** N: no sentido da linha de plantio; Ts: Transversal subindo; Td: Transversal descendo; Ps: Perpendicular subindo; Pd: Perpendicular descendo.

DMS para Velocidade = 0,00498. DMS para Sentidos = 0,00642. DMS para Declividades = 0,00498

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente de curto dom o teste T a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Resultados do teste de comparação de média dos resultados da interação entre declividade e sentido de levantamento.

Declividade	Sentido				
	N*	Ts*	Td*	Ps*	Pd*
00%	0,0104 aAB	-0,0016 aC	0,0006 aBC	0,0108 aAB	0,0154 aA
05%	0,0015 aA	-0,0063 aA	-0,0206 bB	0,0039 aA	-0,0246 cB
10%	0,0116 aA	-0,0035 aBC	-0,0101 abC	0,0046 aAB	-0,0066 bC

DMS para Colunas = 0.0111. DMS para linhas = 0.0111.

Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si estatisticamente na coluna, e seguidas de mesma letra maiúscula nas linhas, de acordo com o teste T a 5% de probabilidade.

* N: no sentido da linha de plantio; Ts: Transversal subindo; Td: Transversal descendo; Ps: Perpendicular subindo; Pd: Perpendicular descendo.

Para facilitar a visualização dos resultados dos testes de comparação de médias, são apresentados, nas Figuras 20 e 21, os gráficos dos intervalos de confiança, a partir das médias de cada fator de variação acompanhadas das linhas superior e inferior relacionadas à respectiva Diferença Mínima Significativa (DMS).

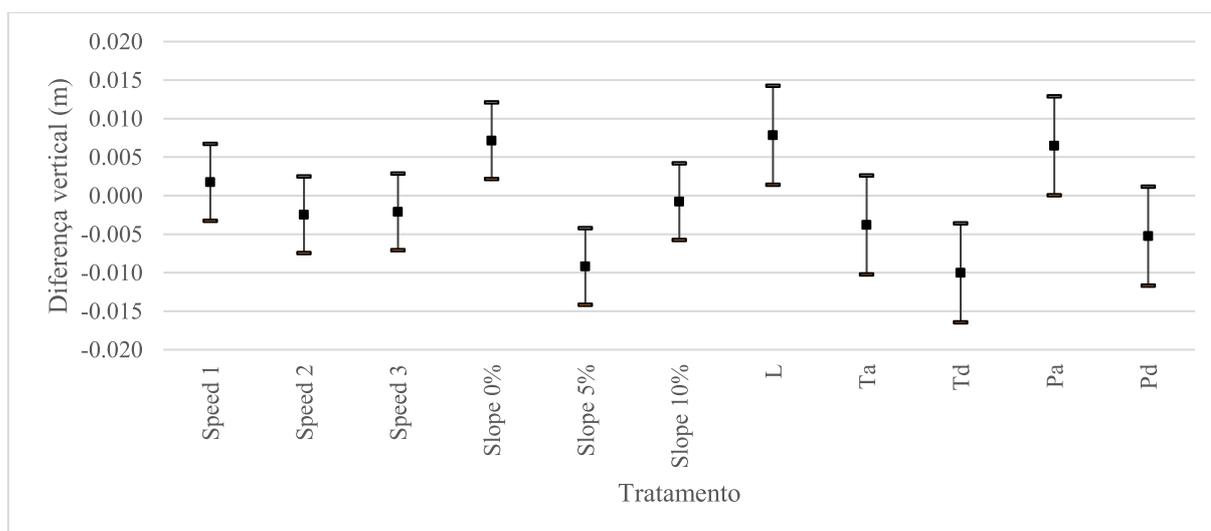


Figura 20. Intervalos de confiança para as médias dos desvios verticais para as diferentes velocidades (Vel. 1, Vel. 2, Vel. 3), declividades (Dec. 0%, Dec. 5% e Dec. 10%) e sentidos (N, Ts, Td, Ps e Pd).

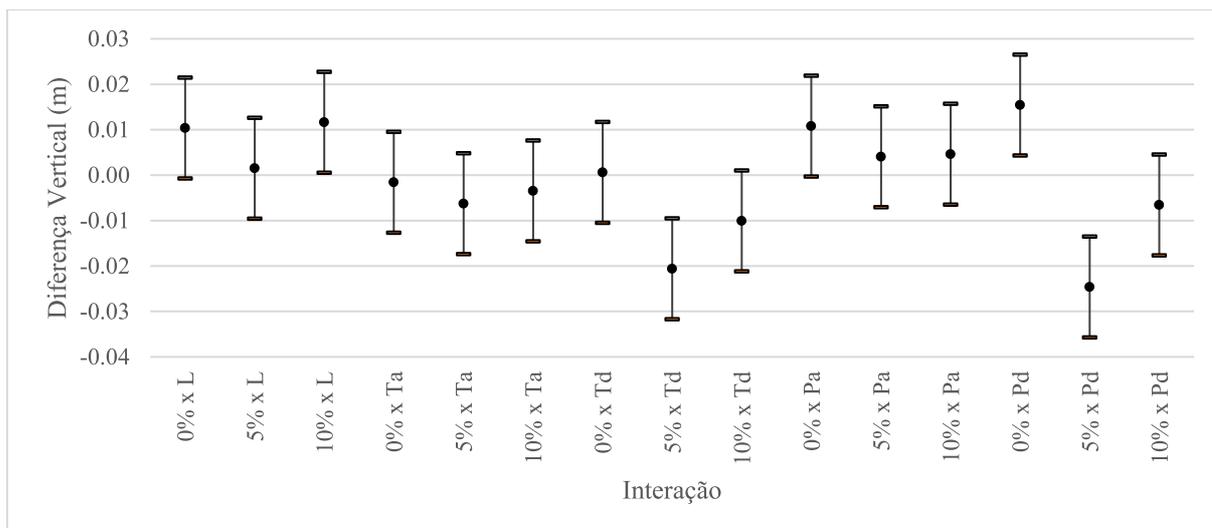


Figura 21. Gráfico dos intervalos de confiança para as médias dos desvios verticais da interação entre declividade (00%, 05% e 10%) e sentido de deslocamento (N, Ts, Td, Ps e Pd).

A partir dos desvios observados em cada declividade, sentido e velocidade, foram gerados gráficos de distribuição dos erros nas 105 repetições, conforme as figuras 22 a 24. De modo geral, os desvios foram bastante similares para as repetições nas diferentes velocidades em cada declividade e sentido, de modo que o desvio encontrado na repetição seja resultado da oscilação da suspensão do quadriciclo em virtude das ondulações do terreno, ocorrendo de forma similar em todas as velocidades, como se verifica no gráfico dos levantamentos na área com declividade de 10%, sentido em nível. Embora os valores médios tenham ficado próximos nas diferentes velocidades, a velocidade 3 apresenta maior ocorrência de desvios acentuados, como pode-se observar no gráfico de desvios com declividade de 05%, sentido transversal ascendente, e sentido perpendicular descendente; e na declividade 00%, sentido perpendicular descendente e perpendicular ascendente.

Em seguida, foram elaborados gráficos de frequência de diferença vertical (Figuras 25 a 27) para cada fator de variação: velocidade, declividade e sentido. A distribuição de frequência mostra em todos os tratamentos um aumento de pontos com desvio próximo à -0,04m e +0,04m, com cerca de 30% a 40% para ambos desvios, e uma frequência ligeiramente inferior nos desvios compreendidos entre -0,01m e +0,01m, com frequências variando entre 10% e 15%. A maior frequência próxima a desvios de 4 centímetros, positivos ou negativos, reflete a variação da suspensão do quadriciclo, que tem exatamente 8 centímetros de curso, ou seja, em movimento a suspensão do quadriciclo tem

influência de 4 centímetros para mais ou para menos nos dados altimétricos. Como a suspensão não está, a todo momento, completamente em seu curso máximo ou mínimo, justifica-se a grande quantidade de dados com desvios de valor inferior à amplitude do curso da suspensão.

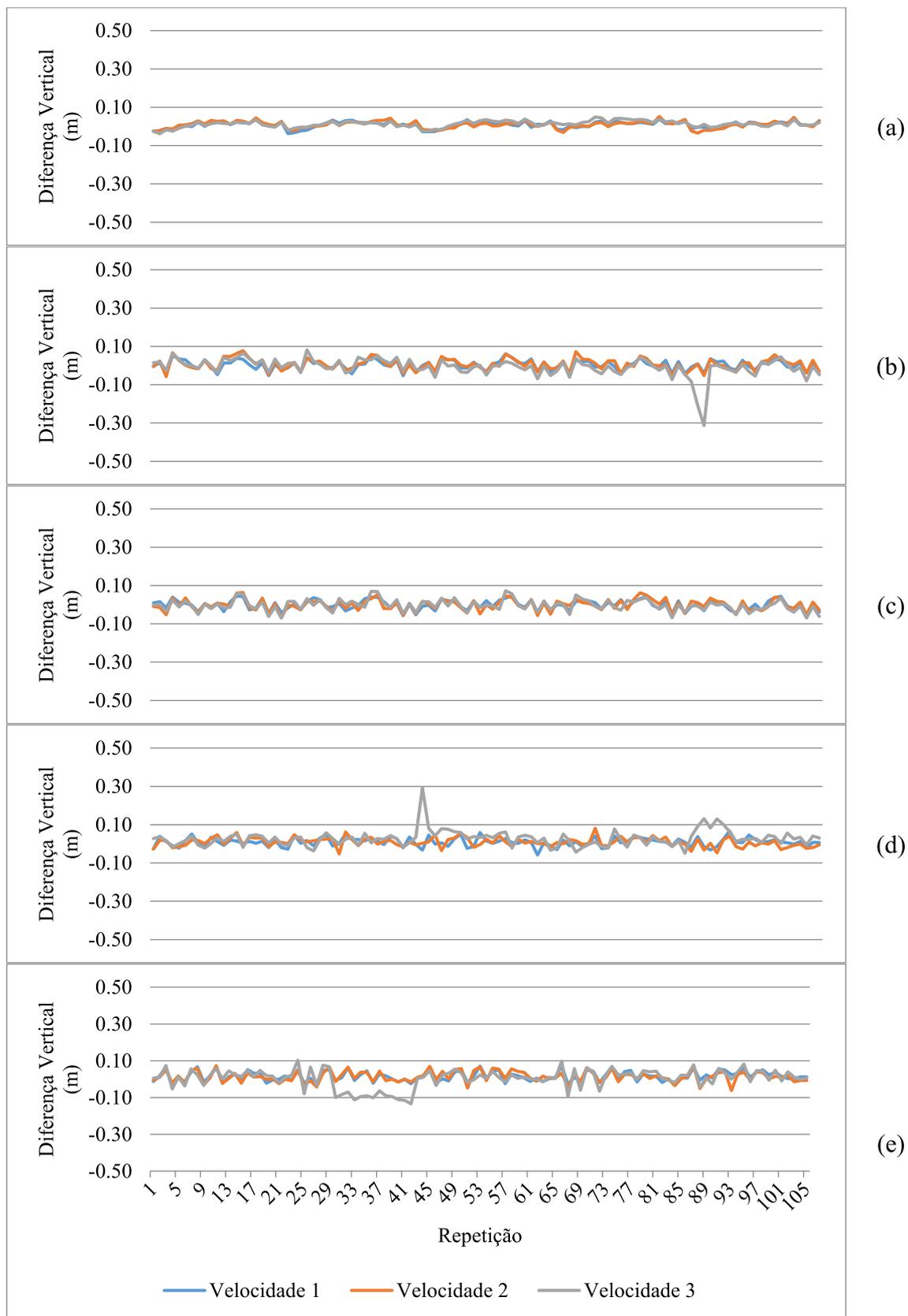


Figura 22. Distribuição dos valores de diferença vertical dos dados coletados na área com declividade 00%, sentido em nível (a), transversal descendente (b), transversal ascendente (c), perpendicular descendente (d) e perpendicular ascendente (e), nas diferentes velocidades.

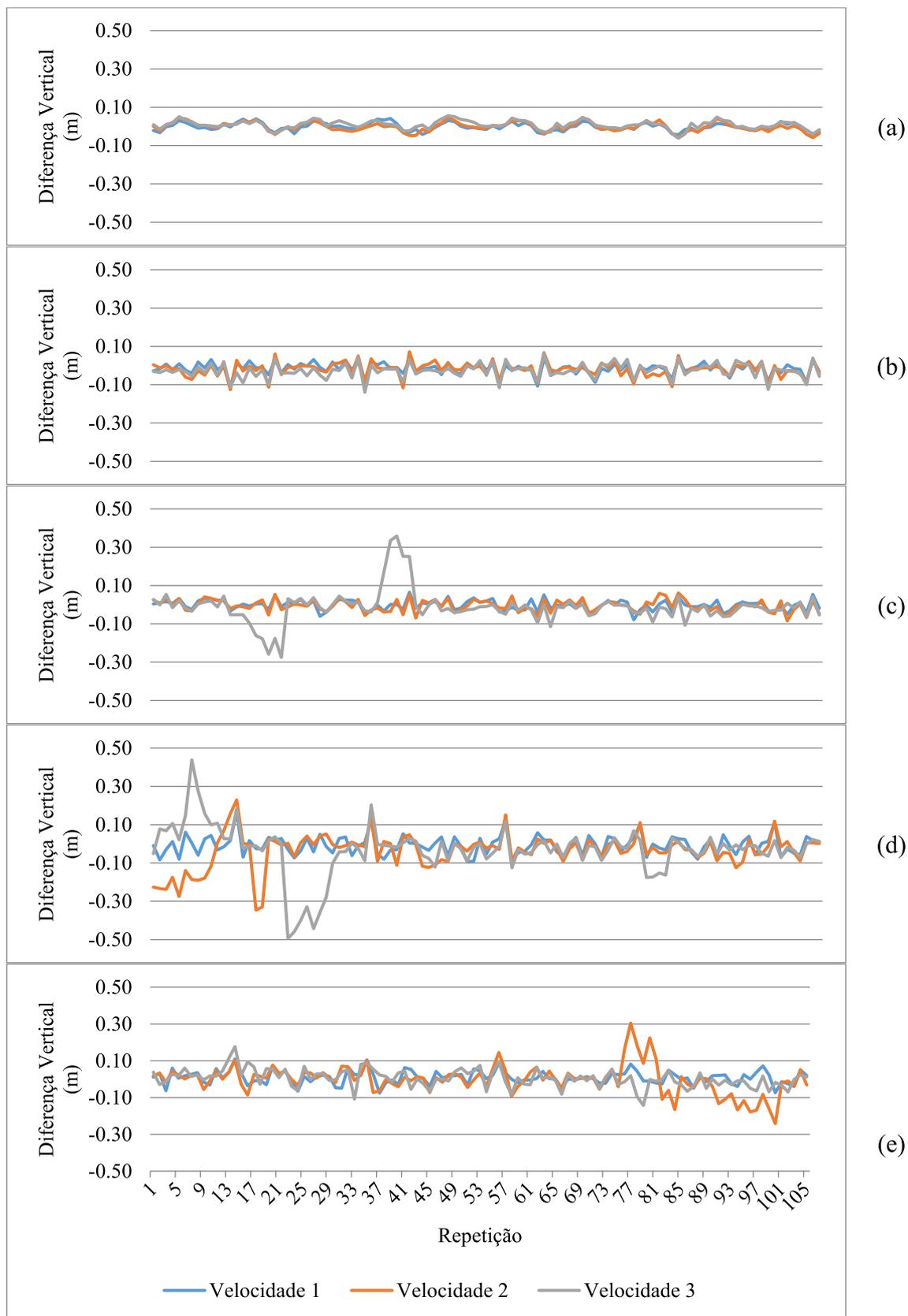


Figura 23. Distribuição dos valores de diferença vertical dos dados coletados na área com declividade 05%, sentido em nível (a), transversal descendente (b), transversal ascendente (c), perpendicular descendente (d) e perpendicular ascendente (e), nas diferentes velocidades.

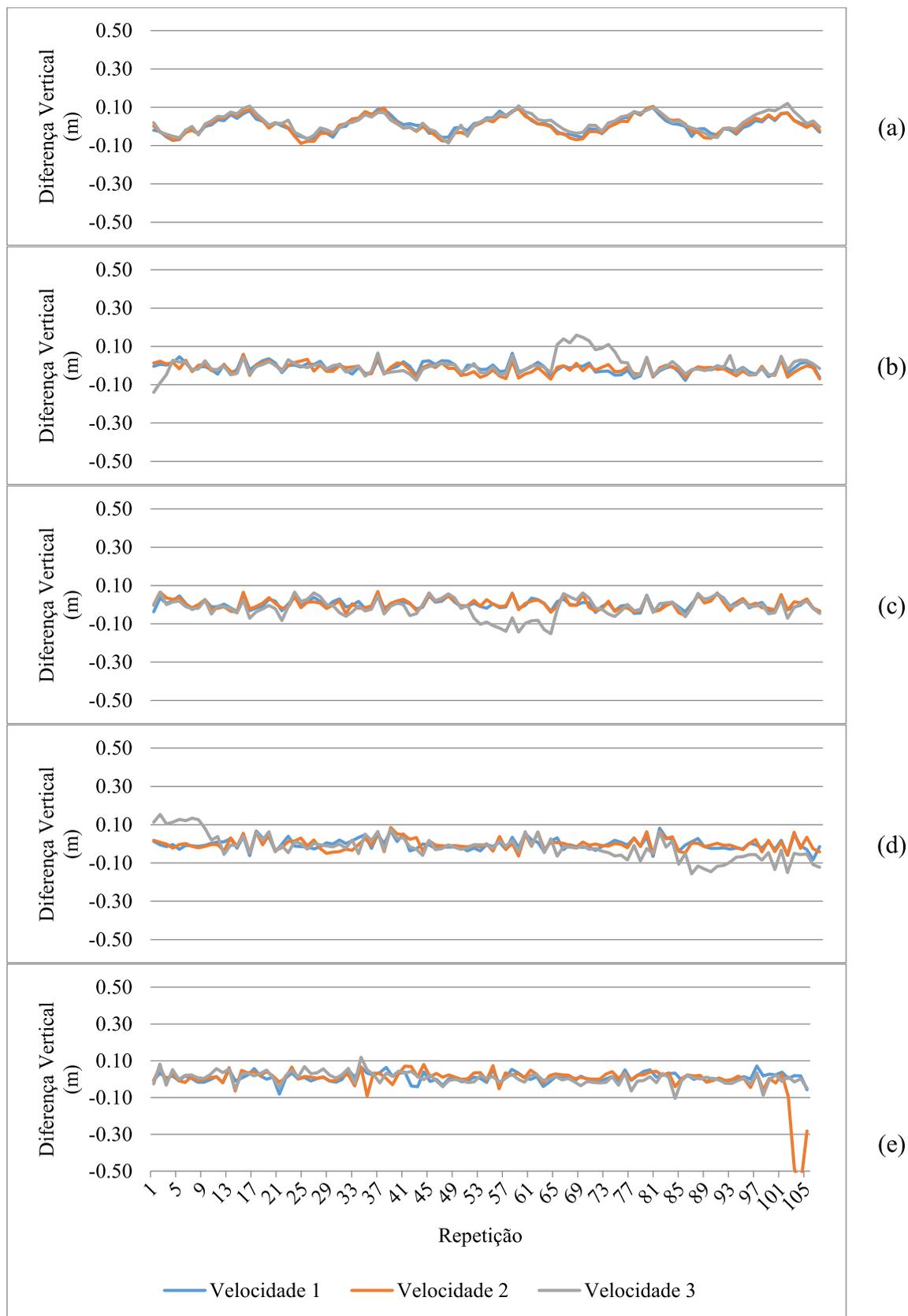


Figura 24. Distribuição dos valores de diferença vertical dos dados coletados na área com declividade 10%, sentido em nível (a), transversal descendente (b), transversal ascendente (c), perpendicular descendente (d) e perpendicular ascendente (e), nas diferentes velocidades.

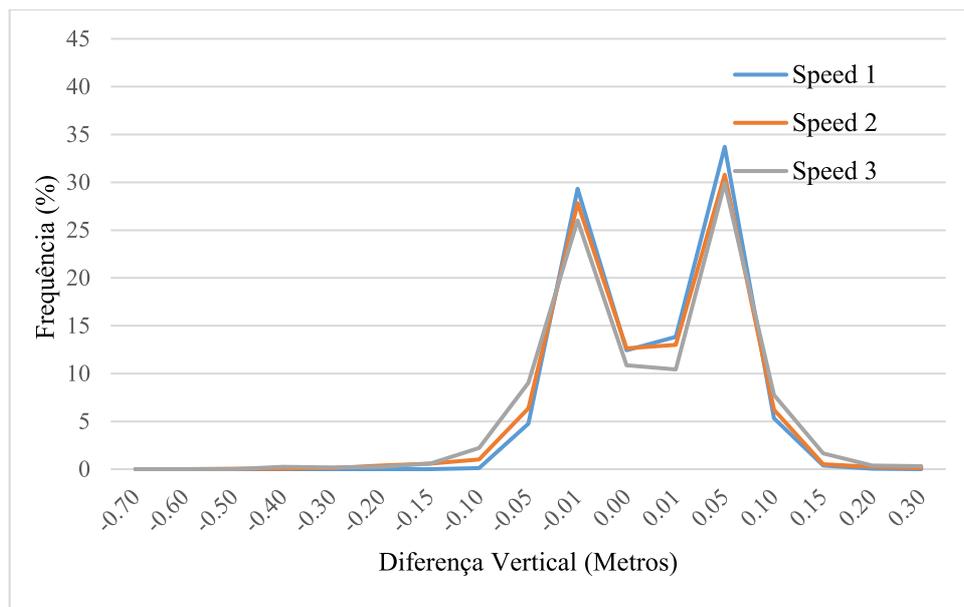


Figura 25. Frequência dos valores de diferença vertical dos dados considerando as velocidades 1, 2 e 3; com valores de 2,02, 3,89 e 6,54 m.s⁻¹, respectivamente.

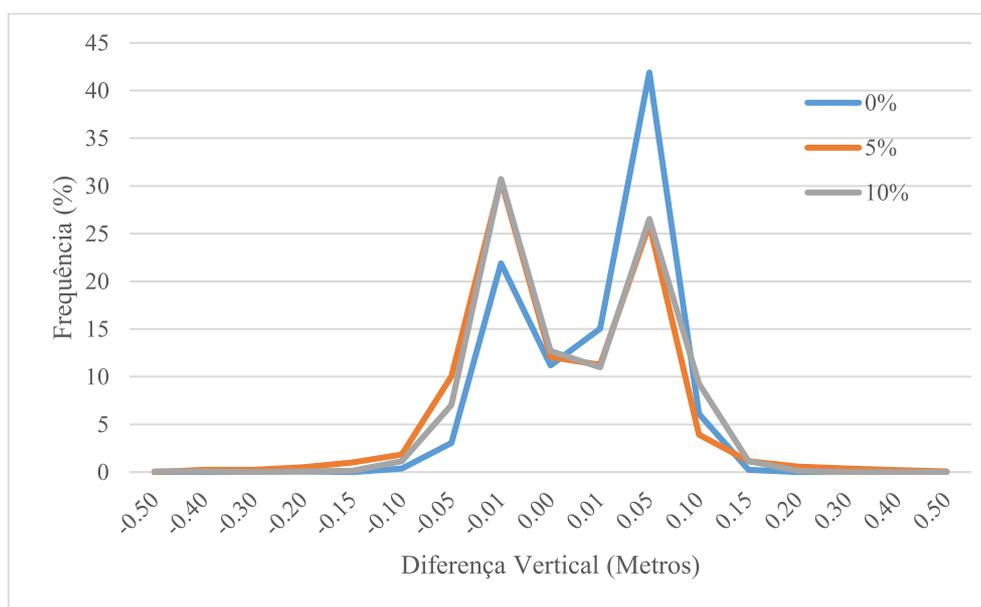


Figura 26. Frequência dos valores de diferença vertical dos dados considerando as diferentes declividades.

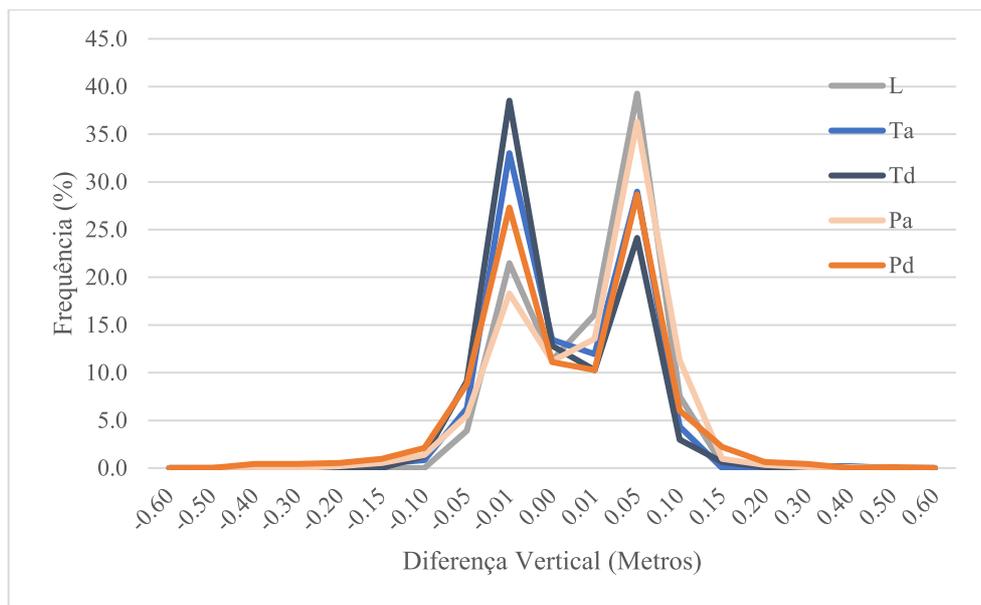


Figura 27. Frequência dos valores de diferença vertical dos dados considerando os diferentes sentidos.

N: no sentido da linha de plantio; Ts: Transversal ascendente; Td: Transversal descendente; Ps: Perpendicular ascendente; Pd: Perpendicular descendente.

Nas figuras 28 a 30 podem ser visualizados os gráficos de frequência acumulada das diferenças verticais para cada tratamento. Os resultados permitiram gerar as tabelas 8 a 10, com os valores dos desvios com valores abaixo de 0,01, 0,05, 0,10, 0,15, 0,20 e 0,30 metros para cada fator de variação. Verifica-se que a velocidade 1 apresentou 99,4% dos desvios com valores até 0,10 metros, enquanto as velocidades 2 e 3 apresentaram 96,8% e 94,0% dos desvios abaixo deste valor. Os resultados com maior frequência acumulada para os menores valores de diferença vertical foram obtidos com os dados considerando a declividade de 00%, atingindo 99,2% dos valores de diferença vertical com valor de até 0,10 metros, enquanto os dados obtidos nas declividades de 05% e 10% resultaram em 93,8% e 97,3% dos desvios com valor abaixo de 0,10 metros, respectivamente. Observa-se que, em todas as declividades, velocidades e sentidos de levantamento, mais de 90% dos valores apresentaram erros iguais ou inferiores a 0,10m. Para a velocidade 1, em nível e declividade 00%, mais de 99% dos valores ficaram nessa faixa de diferença vertical.

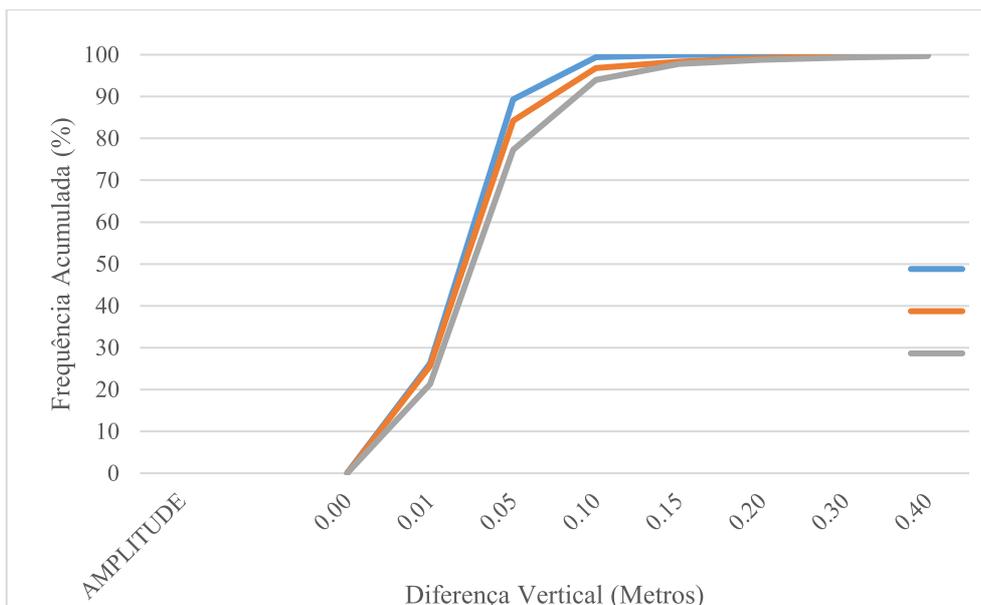


Figura 28. Frequência acumulada dos valores de diferença vertical para as velocidades 1, 2 e 3; com valores de 2,02, 3,89 e 6,54 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente.

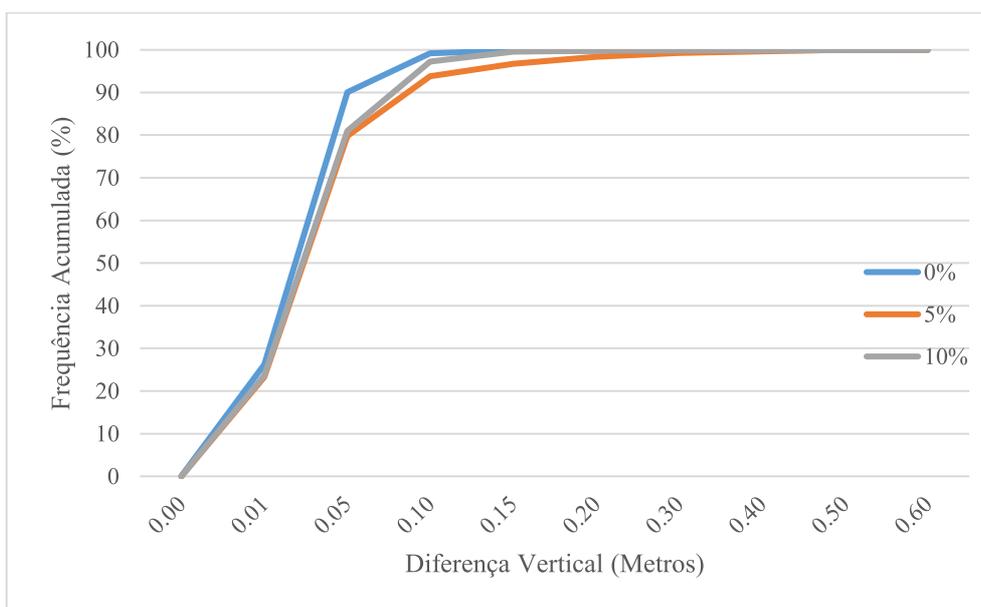


Figura 29. Frequência acumulada dos valores de diferença vertical para as diferentes declividades.

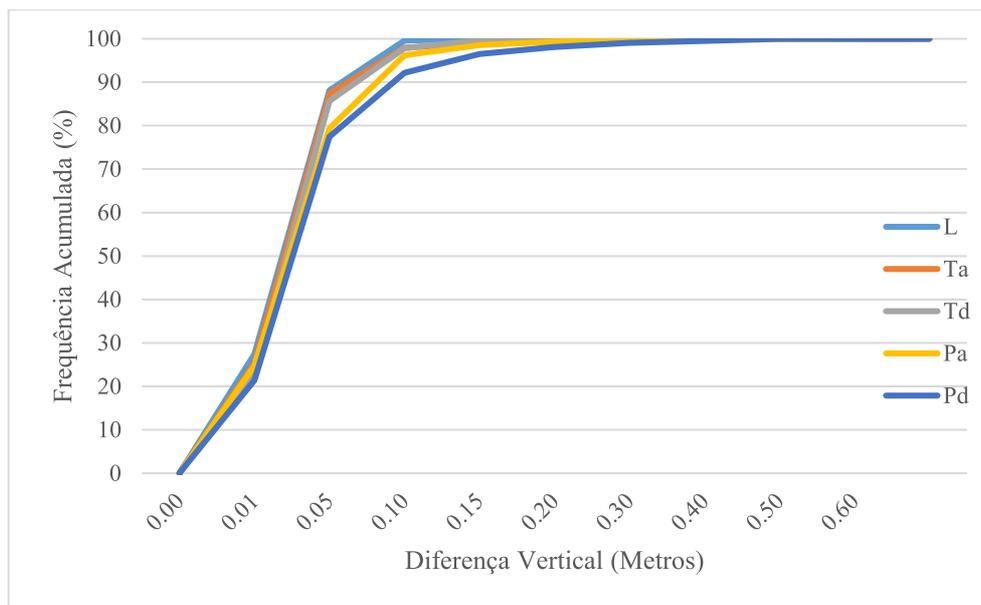


Figura 30. Frequência acumulada dos valores de diferença vertical para os diferentes sentidos.

N: no sentido da linha de plantio; Ts: Transversal ascendente; Td: Transversal descendente; Ps: Perpendicular ascendente; Pd: Perpendicular descendente.

Tabela 5. Frequência acumulada dos desvios para as diferentes velocidades.

Diferença Vertical	Velocidade 1*	Velocidade 2*	Velocidade 3*
0,01	26,3	25,7	21,3
0,05	89,3	84,3	77,3
0,10	99,4	96,8	94,0
0,15	99,9	98,3	97,8
0,20	100,0	99,2	98,8
0,30	100,0	99,7	99,4

*Velocidades 1, 2 e 3 com valores de 2,02, 3,89 e 6,54 m.s⁻¹, respectivamente.

Tabela 6. Frequência acumulada dos desvios para as diferentes declividades.

Diferença Vertical	00 %	05 %	10 %
0,01	26,2	23,3	23,7
0,05	90,0	79,8	81,0
0,10	99,2	93,8	97,3
0,15	99,8	96,8	99,6
0,20	99,8	98,3	99,8
0,30	99,9	99,2	99,9

Tabela 7. Frequência acumulada dos desvios para os diferentes sentidos.

Diferença vertical máxima (metros)	Frequência acumulada (%)				
	N*	Ts*	Td*	Ps*	Pd*
0,01	27,4	25,4	23,1	24,8	21,4
0,05	88,1	87,4	85,7	79,4	77,5
0,10	99,6	98,0	97,8	96,2	92,2
0,15	100,0	98,8	99,7	98,5	96,5
0,20	100,0	99,4	99,8	99,4	98,1
0,30	100,0	99,8	99,9	99,7	99,0

* N: no sentido da linha de plantio; Ts: Transversal ascendente; Td: Transversal descendente; Ps: Perpendicular ascendente; Pd: Perpendicular descendente.

Peyret et al. (2000) avaliaram a qualidade dos dados altimétricos de um receptor GPS RTK acoplado em um trator com implemento de pavimentação asfáltica, em trechos planos e em trechos com movimentação vertical da máquina, de forma rápida e lenta. Os autores também verificaram precisão superior à 10 centímetros, nas condições estudadas, mesmo nas diferentes oscilações verticais da máquina, considerando distâncias de até 4 quilômetros da base RTK.

Prado & Krueger (2001) avaliaram a técnica RTK com ocupação manual de pontos de coordenadas conhecidas, e verificaram diferenças verticais com valores entre 2 e 15 centímetros. Neste sentido, verifica-se que a utilização do receptor GNSS RTK embarcado em quadriciclo obtém resultados próximos aos encontrados em estudos que avaliaram a coleta manual de pontos com a técnica RTK, o que assegura a utilização do receptor GNSS RTK embarcado, para levantamentos altimétricos em áreas rurais.

Com relação à classificação ao padrão de exatidão cartográfica (PEC), todos os tratamentos foram classificados como classe A para geração de produtos cartográficos com possibilidade de geração de curvas de nível com equidistância de 0,30m. Esta classificação confirma a qualidade dos dados obtidos por receptor GNSS RTK embarcado em quadriciclo para elaboração de produtos cartográficos para serem utilizados no planejamento de obras hidro agrícolas e na agricultura de precisão.

4.2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE TALHÕES, LINHAS DE PLANTIO E SISTEMAS DE TERRACEAMENTO EM NÍVEL

Para utilização da ferramenta computacional desenvolvida, inicialmente descompacta-se o arquivo fornecido na extensão .ZIP, e copia-se a pasta “LAVOURAS”

para o diretório “C:/” do computador. Em seguida, na janela “ArcToolbox” do *software* ArcGis, seleciona-se a opção “Add Toolbox”, conforme a Figura 31. Em seguida, seleciona-se a ferramenta “LAVOURAS.tbx” localizada no diretório “C:/LAVOURAS”, e a ferramenta automaticamente é importada para o *software* ArcGis. Na Figura 32 são apresentados os diversos *scripts* que compõem a ferramenta computacional desenvolvida.

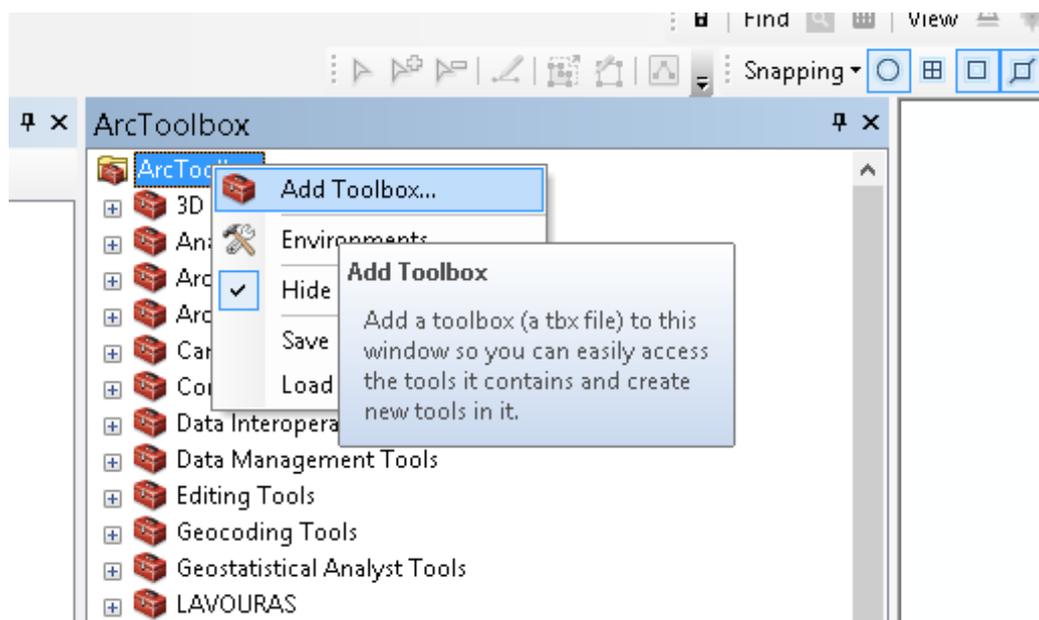


Figura 31. Instalação da ferramenta computacional desenvolvida, no *software* ArcGis.

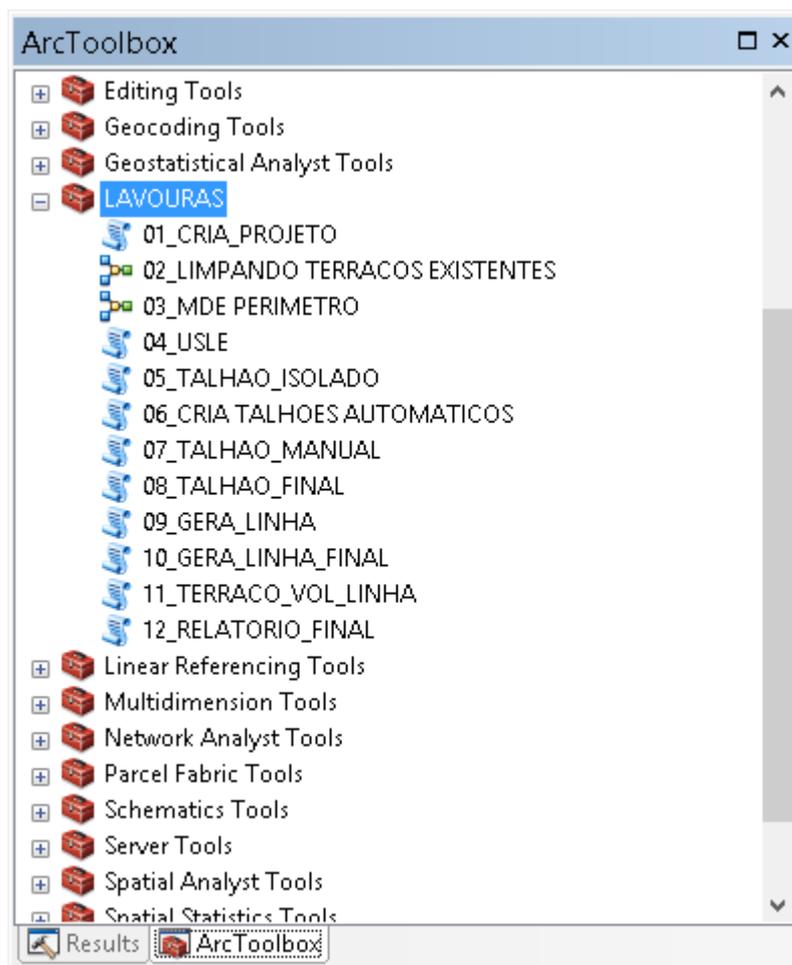


Figura 32. Visualização dos *scripts* que compõem a ferramenta computacional instalada no *software* ArcGis

A tela do *script* Cria Projeto pode ser visualizada na Figura 33. E após digitar o nome do projeto e selecionar a pasta na qual este será criado, a janela de diálogo emite um relatório que pode ser visualizado na Figura 34. Em seguida pode-se verificar em um explorador de arquivos que a pasta do banco de dados bem como as sub-pastas foram criadas (Figura 35).

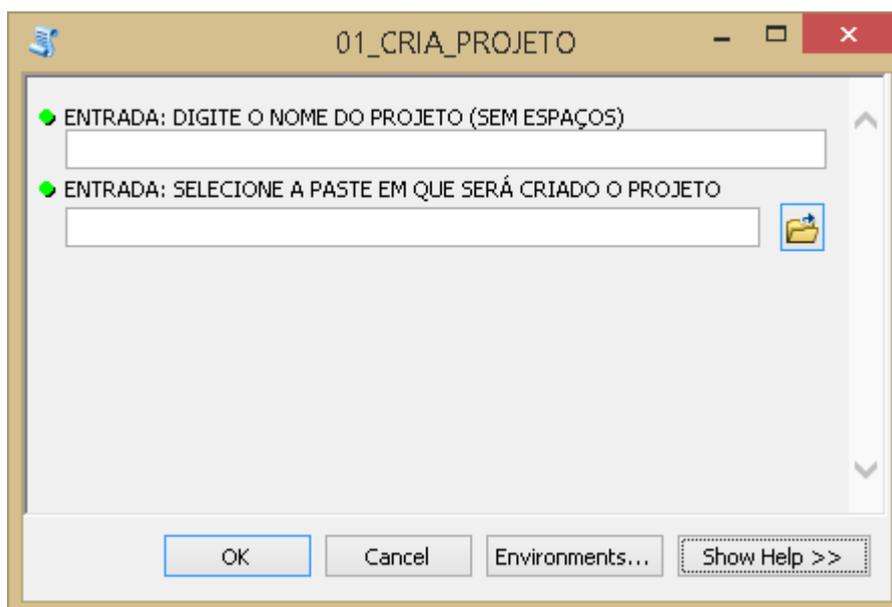


Figura 33. Tela do *script* Cria Projeto.

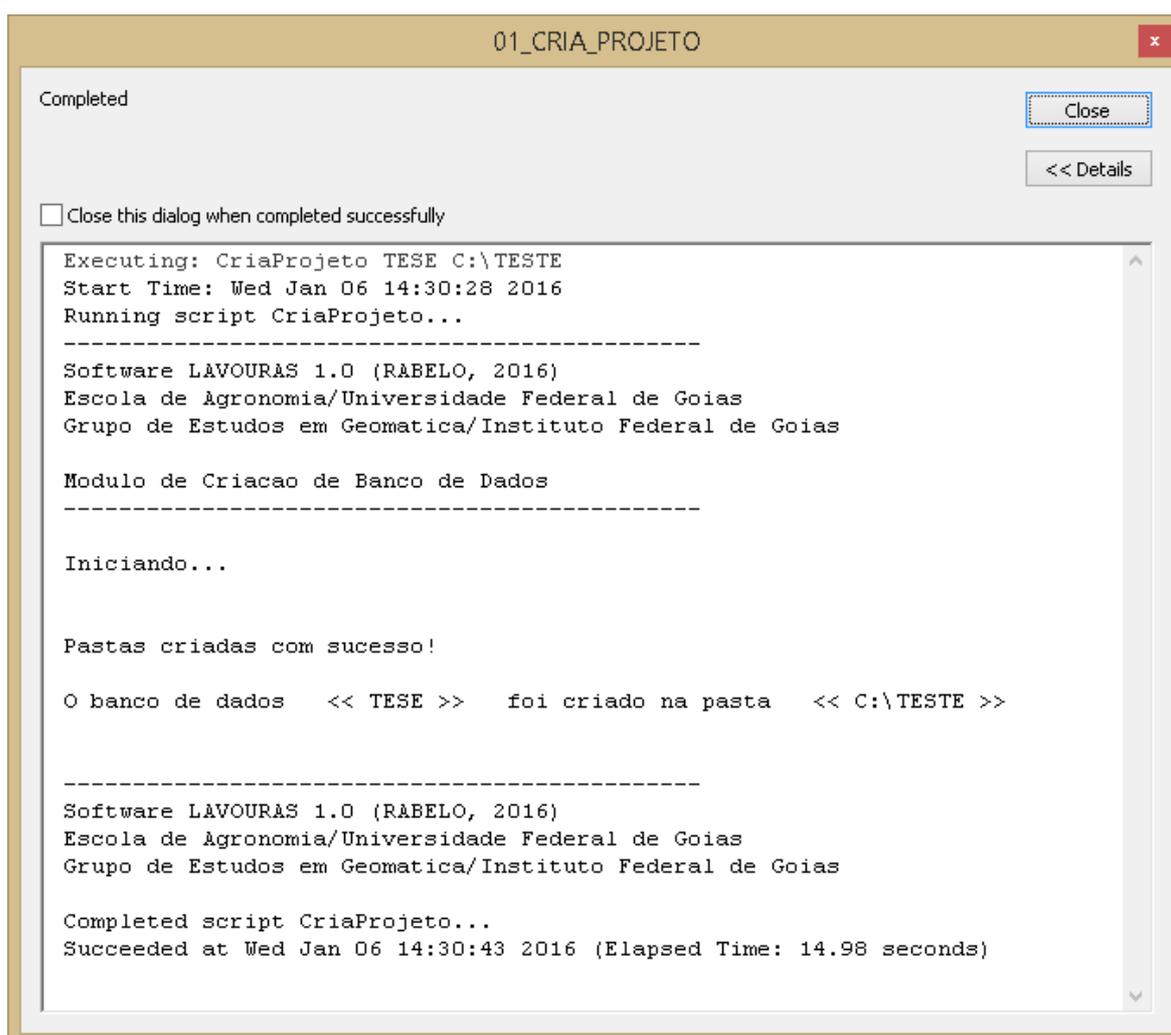


Figura 34. Caixa de diálogo com o relatório do *script* Cria Projeto.

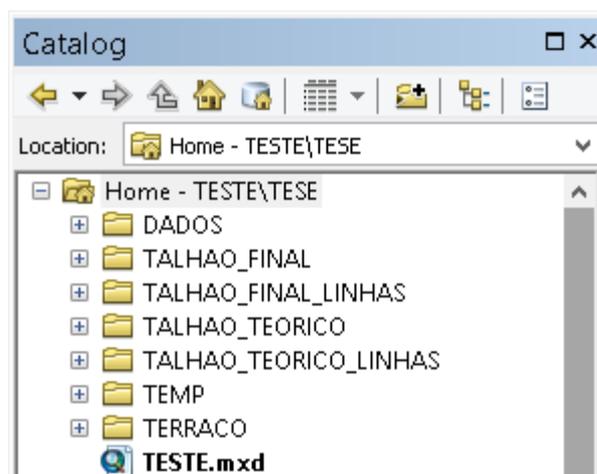


Figura 35. Verificação das pastas e sub-pastas do projeto, criadas pelo *script* Cria Projeto.

Em seguida, o *script* Limpa Terraço é utilizado para filtrar os pontos do terreno localizados na área de influência dos terraços existentes. Na Figura 36 é possível observar a tela do *script* Limpa Terraço. Este *script* não tem informações de relatório na caixa de diálogo, e gera um arquivo do tipo *shapefile* com os pontos filtrados, localizado na pasta DADOS do banco de dados. A Figura 37 permite visualizar o detalhe dos pontos cotados após filtragem.

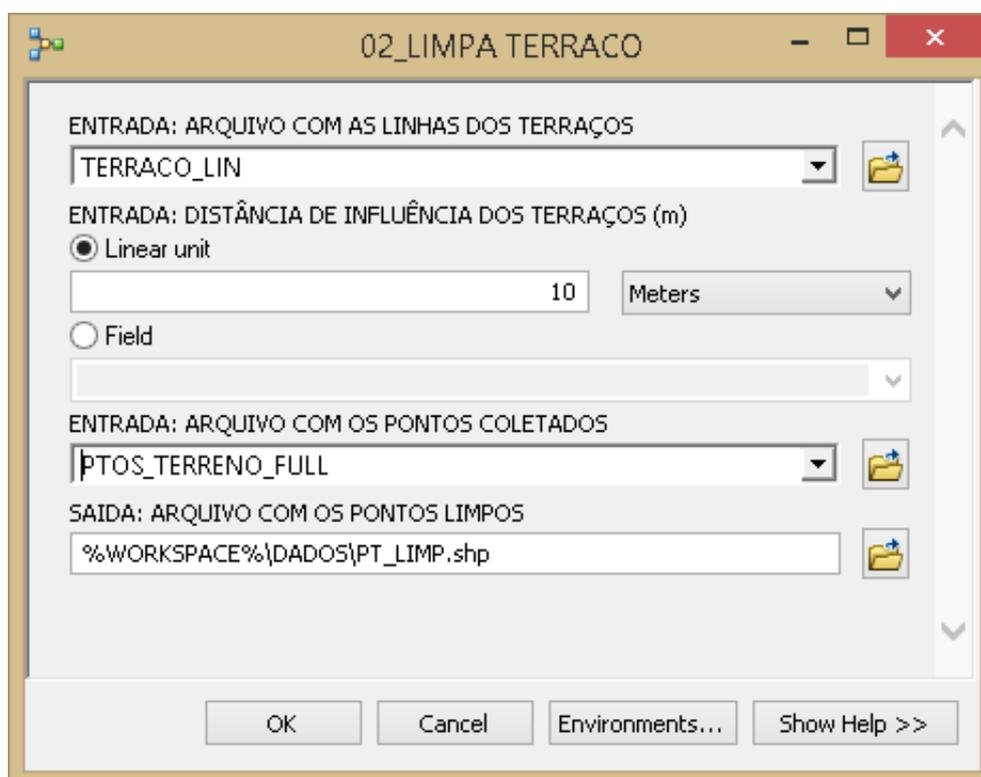


Figura 36. Tela do *script* Limpa Terraço.

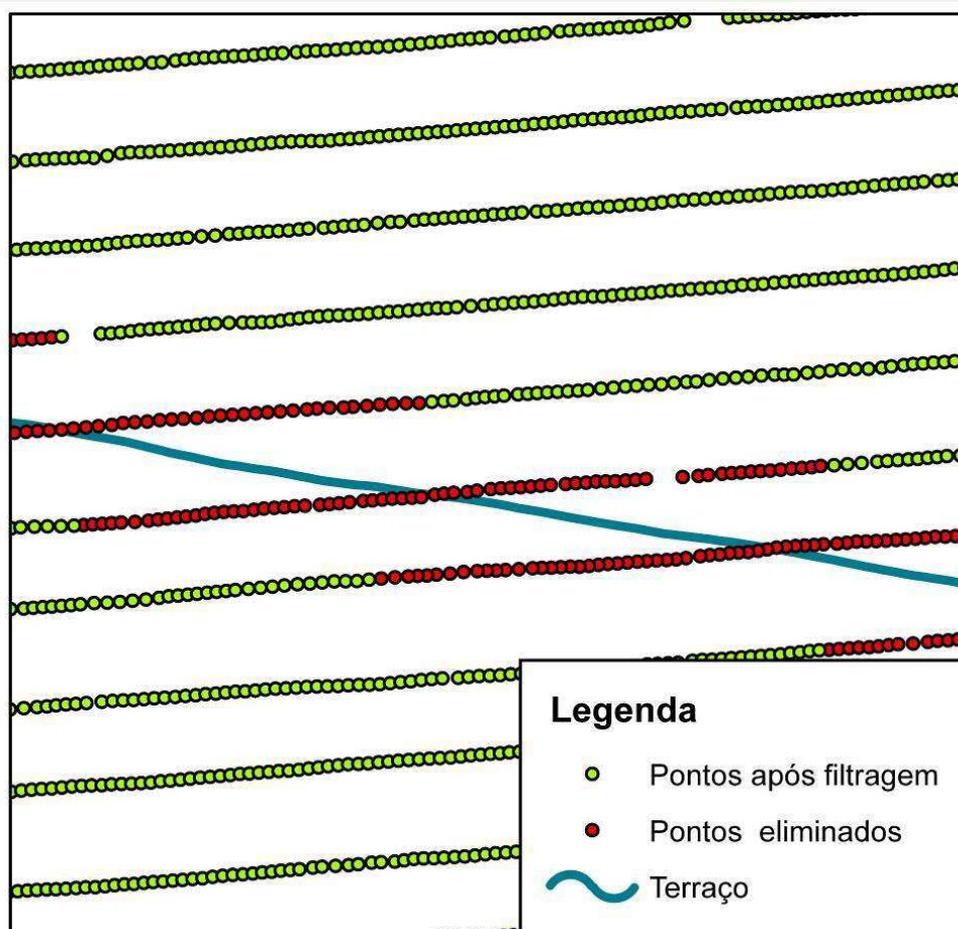


Figura 37. Detalhe dos pontos após filtragem realizada pelo *script* Limpa Terraço.

O próximo *script* utilizado foi o MDE, cuja tela pode ser verificada na Figura 38. Como arquivo de saída, este *script* gerou um arquivo shapefile com os pontos da área agrícola, e um arquivo *raster* do tipo TIF com o modelo digital de elevação da área, este último pode ser visualizado na Figura 39.

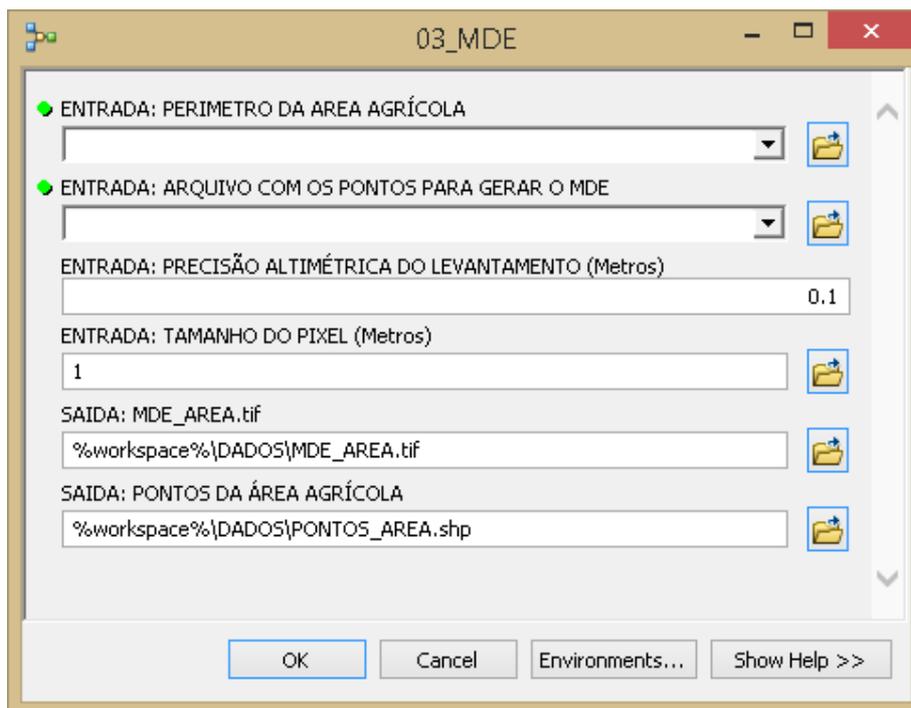


Figura 38. Tela do *script* MDE.

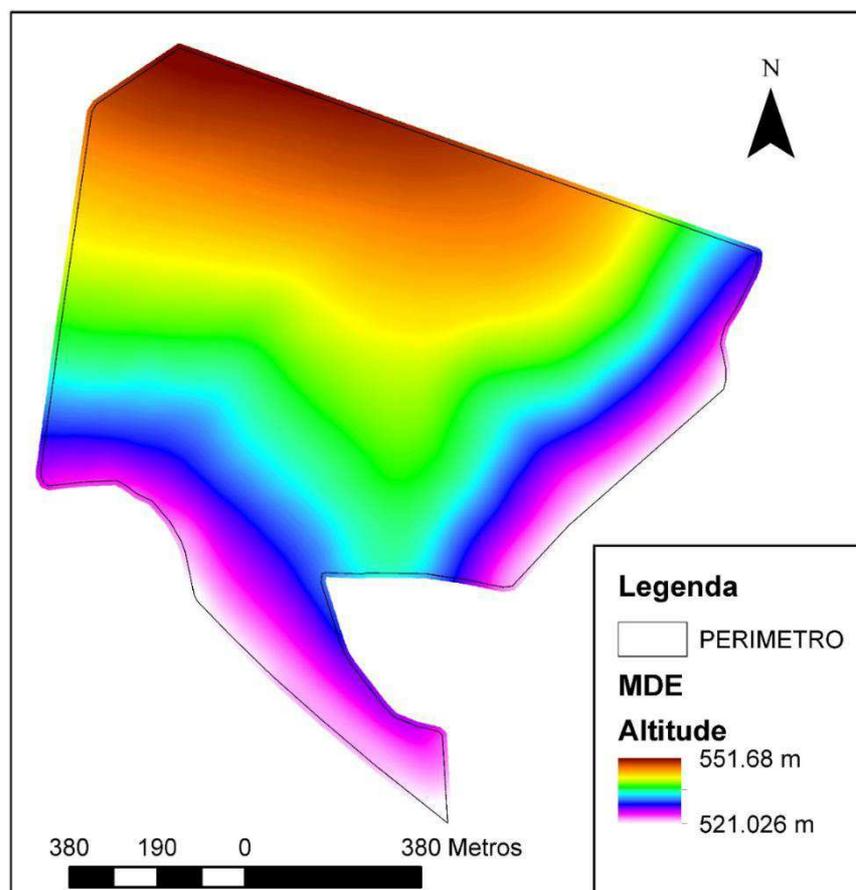


Figura 39. Modelo digital de elevação criado pelo *script* MDE.

Após a utilização do *script* MDE, utilizou-se o *script* USLE, cuja tela pode ser visualizada na Figura 40. Este *script* teve como arquivo de saída um *raster* do tipo TIF no qual cada célula corresponde ao valor de perda de solo da região coberta pelo pixel, conforme é apresentado na Figura 41. Este *script* não é diretamente utilizado para geração de talhões, porém permite analisar as áreas com maiores valores de perda de solo de acordo com os parâmetros de entrada informados, bem como verificar a perda de solo da área se esta não apresentar nenhuma estrutura para seccionamento do escoamento superficial, como terraços. Outra análise possível com este *script* é a comparação da perda de solo da área para diferentes cultivos ou manejos.

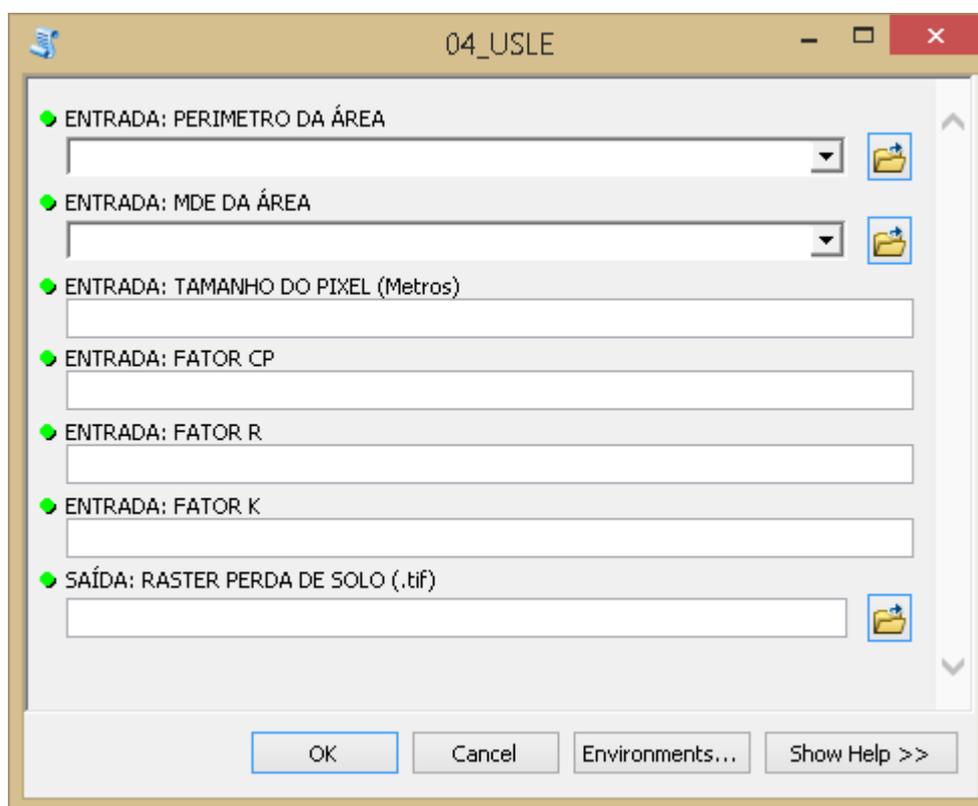


Figura 40. Tela do *script* USLE.

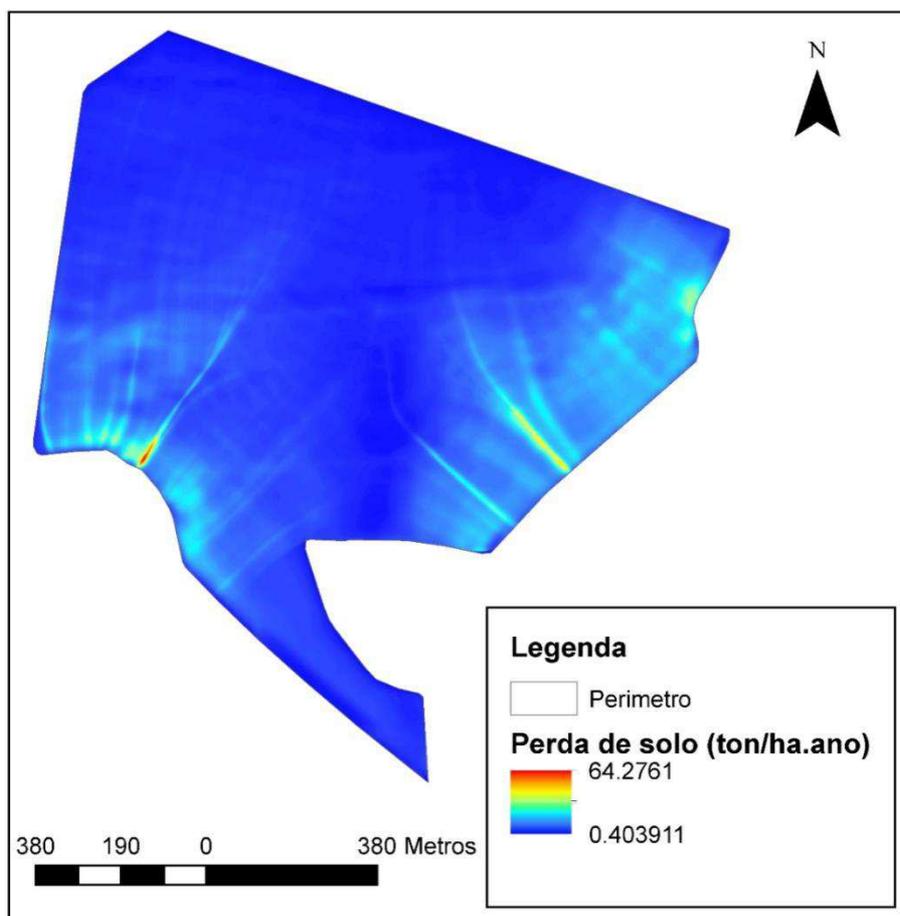


Figura 41. Raster de saída do *script* USLE, com os valores de perda de solo.

Para a criação de talhões teóricos podem ser utilizados três *scripts*: Talhão isolado, Talhões Automáticos e Talhão Manual. Todos os dados gerados por estes *scripts* são armazenados automaticamente na pasta TALHAO_TEORICO do banco de dados. Para se testar diferentes dimensionamentos de talhões, pode-se criar sub-pastas e organizar os talhões de acordo com o tipo de dimensionamento. Após a geração de todos os talhões, os arquivos dos talhões que continuarão o dimensionamento da área agrícola devem ser copiados novamente para a pasta TALHAO_TEORICO, pois os demais *scripts* não utilizam os arquivos armazenados nas sub-pastas geradas pelo usuário.

A Figura 42 apresenta a tela do *script* Talhão Isolado, que gera apenas um talhão tendo como parâmetros, o MDE da área e dos parâmetros da USLE, o limite de perda de solo e largura máxima do talhão. Tem como arquivos de saída os arquivos vetoriais com o polígono do talhão gerado, o eixo do talhão e o polígono a área desconsiderando o talhão gerado, chamado de área do próximo talhão, que é utilizado para geração dos próximos

talhões. Estes arquivos de saída podem ser visualizados na Figura 43. Além disso, a caixa de diálogo do *software* ArcGis apresenta o relatório do *script* (Figura 44).

05_TALHAO_ISOLADO

- ENTRADA: PERIMETRO DA AREA (shp)
- ENTRADA: MDE DA AREA (tif)
- ENTRADA: TAMANHO DO PIXEL (Metros)
- ENTRADA: FATOR CP (numerico)
- ENTRADA: FATOR R (numerico)
- ENTRADA: FATOR K (numerico)
- ENTRADA: LIMITE PERDA (ton/ha.ano)
- ENTRADA: RAO MINIMO (m)
- ENTRADA: NÚMERO DO TALHÃO
- ENTRADA: LARGURA MÁXIMA DO TALHAO (Metros)

OK Cancel Environments... Show Help >>

Figura 42. Tela do *script* Talhão Isolado.

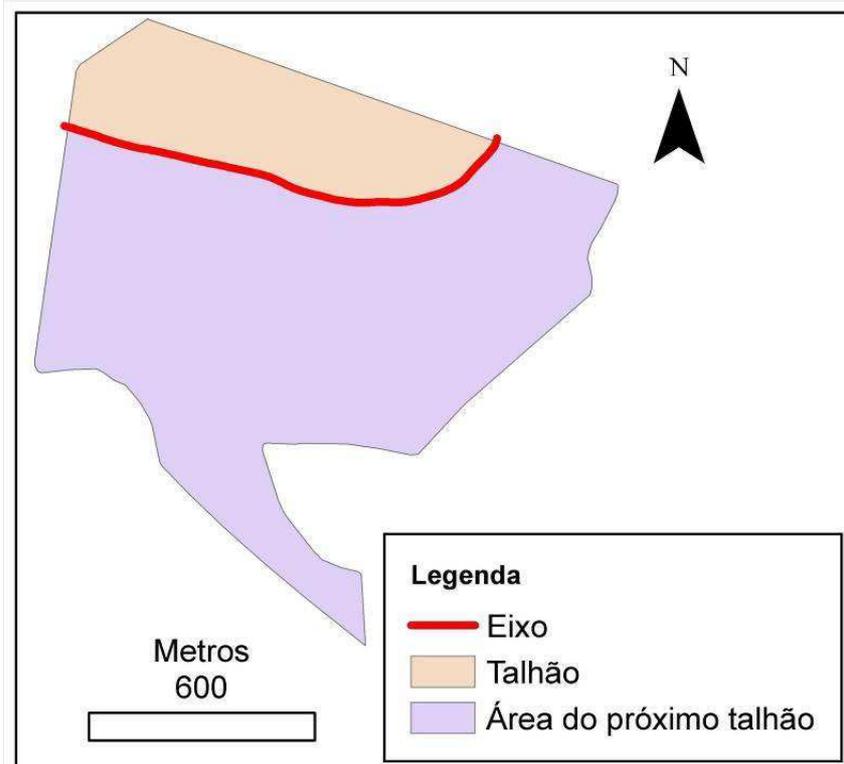


Figura 43. Arquivos vetoriais gerados pelo *script* Talhao Isolado.

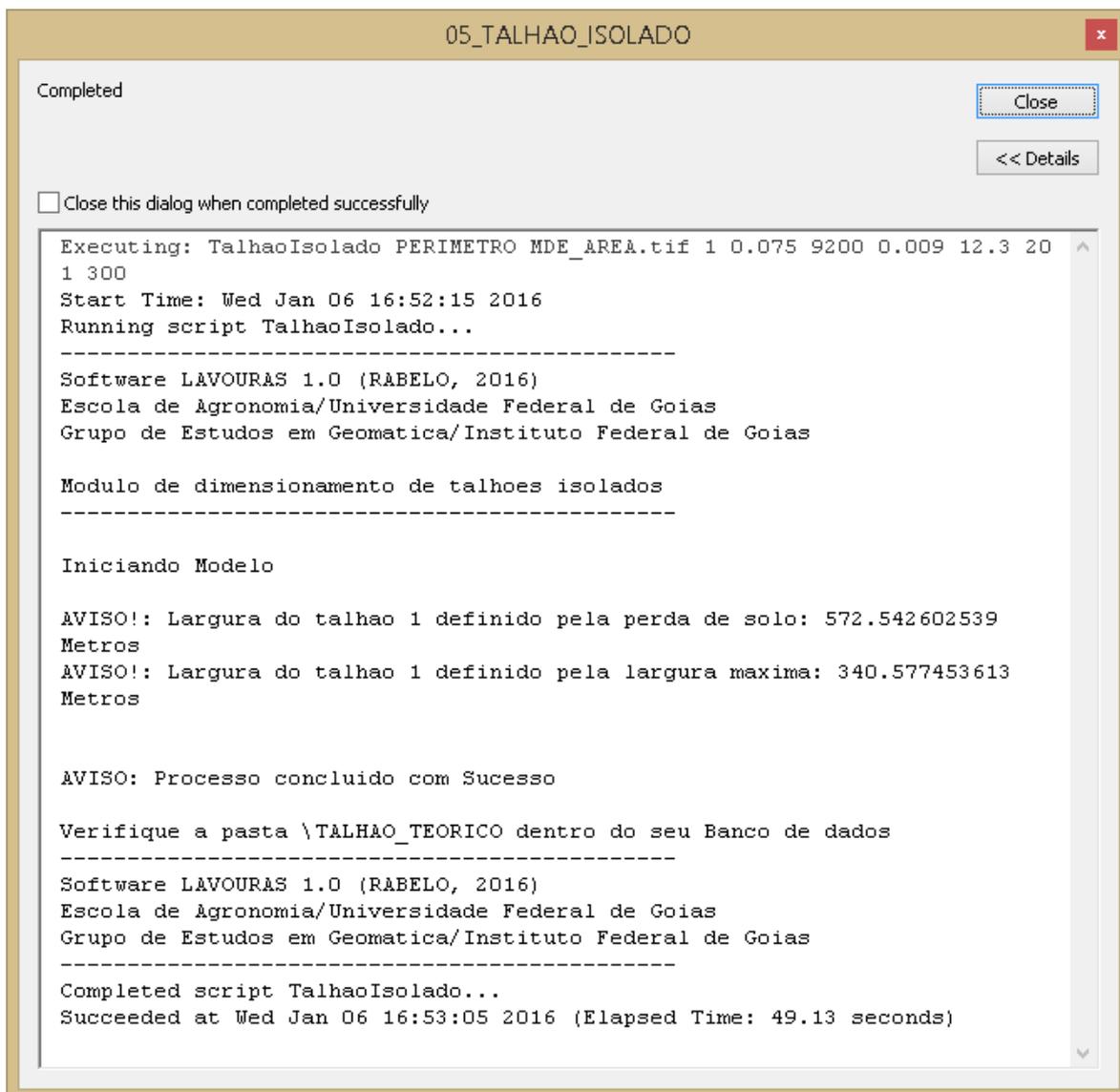


Figura 44. Caixa de diálogo com o relatório do *script* Talhao Isolado.

O *script* Talhoes Automaticos por sua vez usa os mesmos parâmetros de entrada do *script* Talhao Isolado, porém gera todos os talhões dentro da área informada como perímetro, podendo ser todo o perímetro da área agrícola ou a área obtida desconsiderando o talhão gerado anteriormente (área do próximo talhão). Na Figura 45 é apresentada a tela do *script* Talhoes Automaticos. Este *script* tem arquivos de saída similares ao *script* Talhao Isolado, porém gera um arquivo para cada talhão e os polígonos dos últimos talhões da área, os quais apresentam valores de perda de solo inferiores aos limites. Este *script* apresenta informações de relatório na caixa de diálogo, conforme a Figura 46, permitindo acompanhar quais talhões foram gerados, bem como a largura calculada destes.

06_TALHOES AUTOMATICOS

- ENTRADA: PERIMETRO DA AREA (shp)
- ENTRADA: MDE DA AREA (tif)
- ENTRADA: TAMANHO DO PIXEL (Metros)
- ENTRADA: FATOR CP (numerico)
- ENTRADA: FATOR R (numerico)
- ENTRADA: FATOR K (numerico)
- ENTRADA: LIMITE PERDA (ton/ha.ano)
- ENTRADA: RAI0 MINIMO (m)
- ENTRADA: NUMERO DO PRIMEIRO TALHAO AUTOMATICO
- ENTRADA: LARGURA MÁXIMA DO TALHAO (Metros)

OK Cancel Environments... Show Help >>

Figura 45. Tela do *script* Talhoes Automaticos.

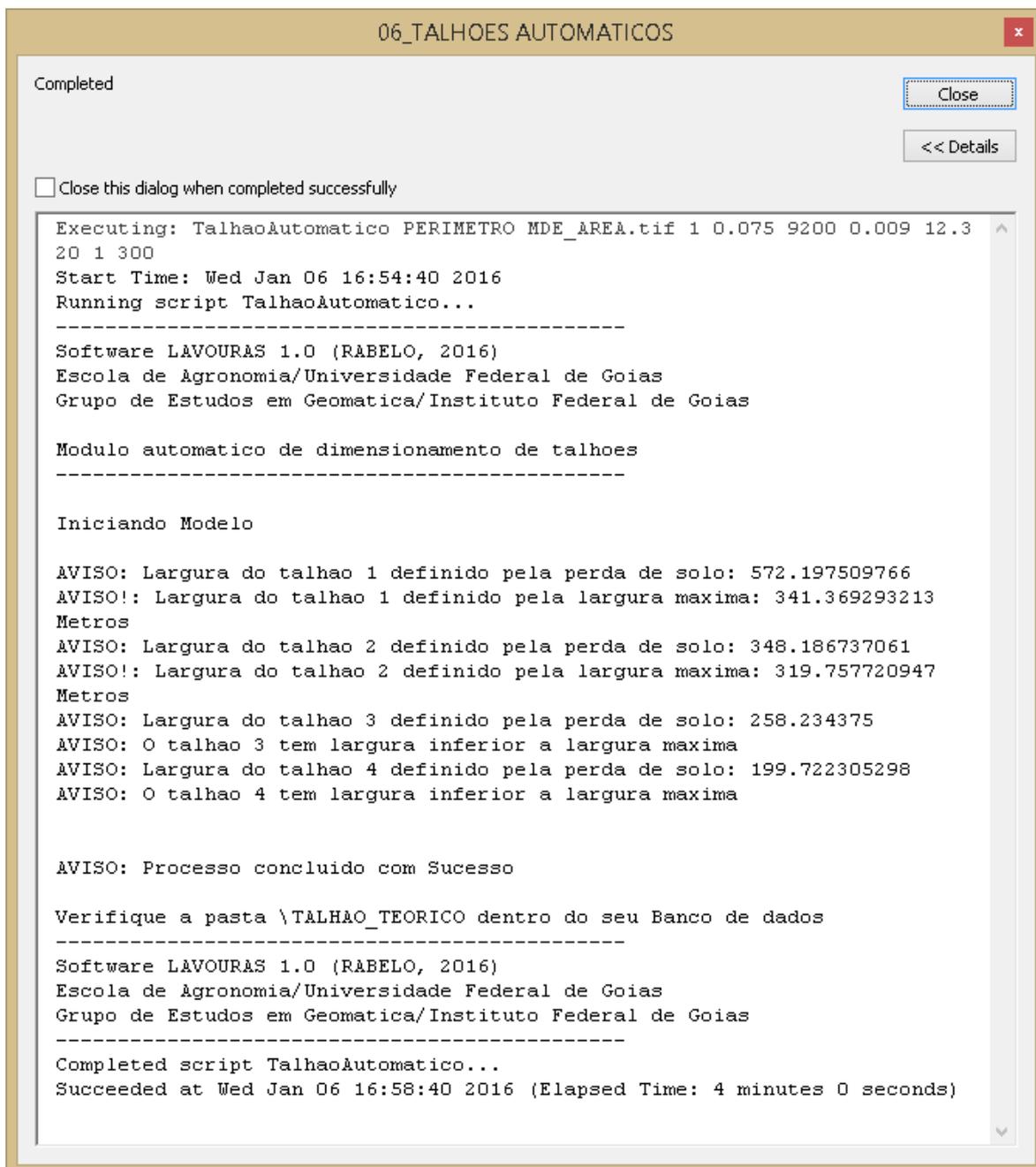


Figura 46. Caixa de diálogo com o relatório do *script* Talhoes Automaticos.

E o terceiro dos *scripts* que geram talhões, o *script* Talhao Manual, possibilita gerar um talhão independente da USLE, cuja tela é visualizada na Figura 47. Este *script* gera um talhão a partir de um vetor com o perímetro da área, o MDE da área, uma cota de referência para a linha guia (eixo do talhão) e o valor de raio mínimo, para suavização do eixo. Tem como arquivos de saída o perímetro do talhão, a linha guia e a área obtida desconsiderando a área do talhão. A caixa de diálogo contém o relatório deste *script*, informando a largura do talhão gerado.

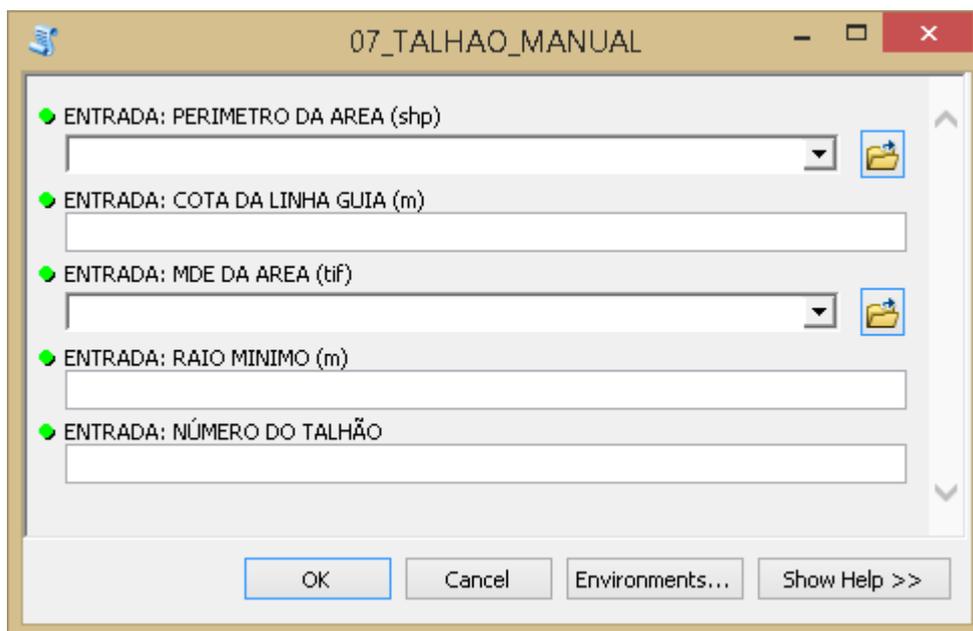


Figura 47. Tela do *script* Talhao Manual.

Em seguida, utilizando o perímetro da área agrícola, os arquivos vetoriais de todos os talhões gerados, bem como seus respectivos eixos, o arquivo vetorial contendo os talhões em desnível que foram gerados manualmente e o valor de largura dos carregadores, utiliza-se o *script* Talhao Final, cuja tela é apresentada na Figura 48. A Figura 49 permite visualizar os arquivos vetoriais de entrada utilizados para alimentar o *script* Talhao Final. Este *script* tem como resultado um arquivo vetorial contendo todos os talhões teóricos, e um arquivo vetorial contendo todos os sub-talhões, que são aqueles obtidos após desconsiderar a área dos carregadores em nível (gerados a partir dos eixos) e dos carregadores em desnível, localizados na pasta TALHAO_FINAL do banco de dados. A Figura 50 mostra a caixa de diálogo com o relatório do *script* Talhao Final, contendo uma tabela com as informações dos sub-talhões, e a Figura 51 apresenta os sub-talhões gerados. É importante ressaltar que este *script* só pode ser utilizado após a geração de todos os talhões teóricos.

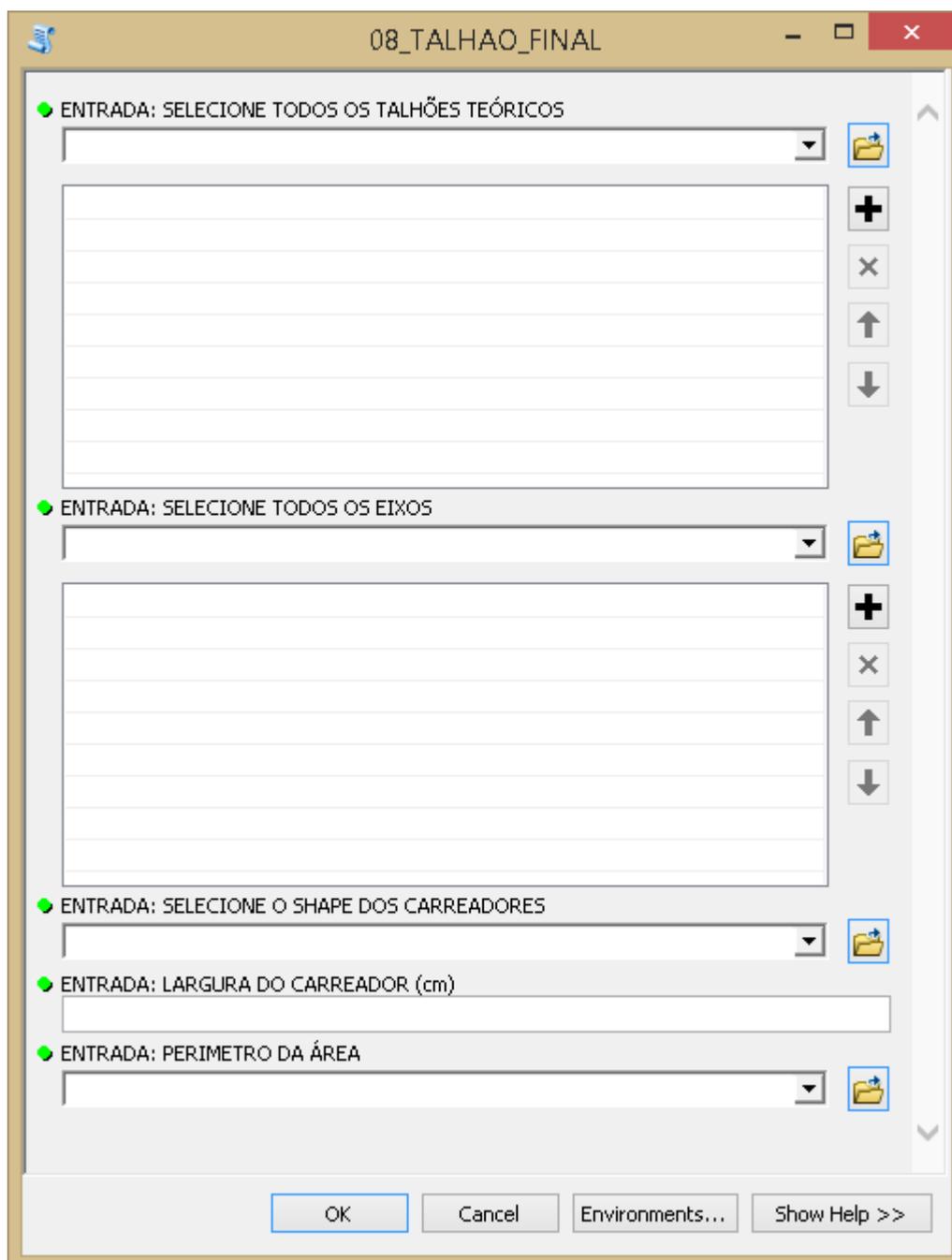


Figura 48. Tela do *script* Talhao Final.

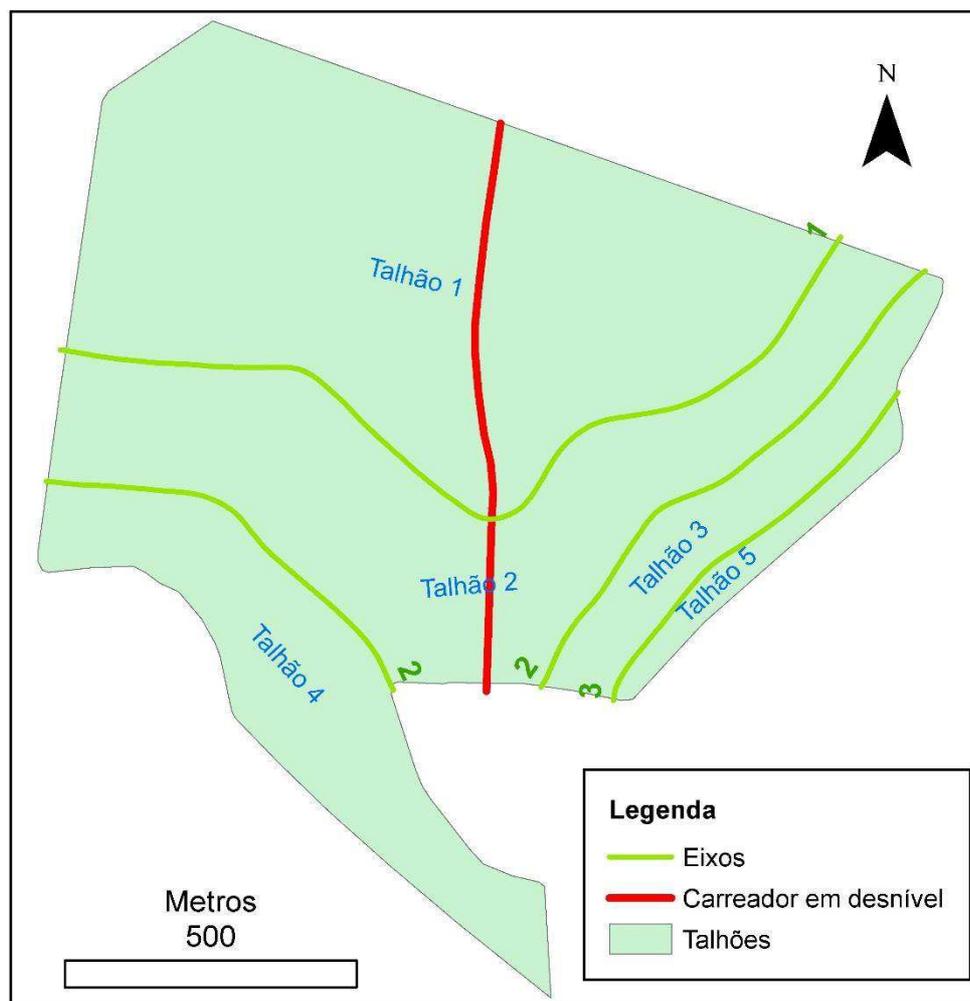


Figura 49. Visualização dos arquivos vetoriais utilizados para alimentar o *script* Talhao Final

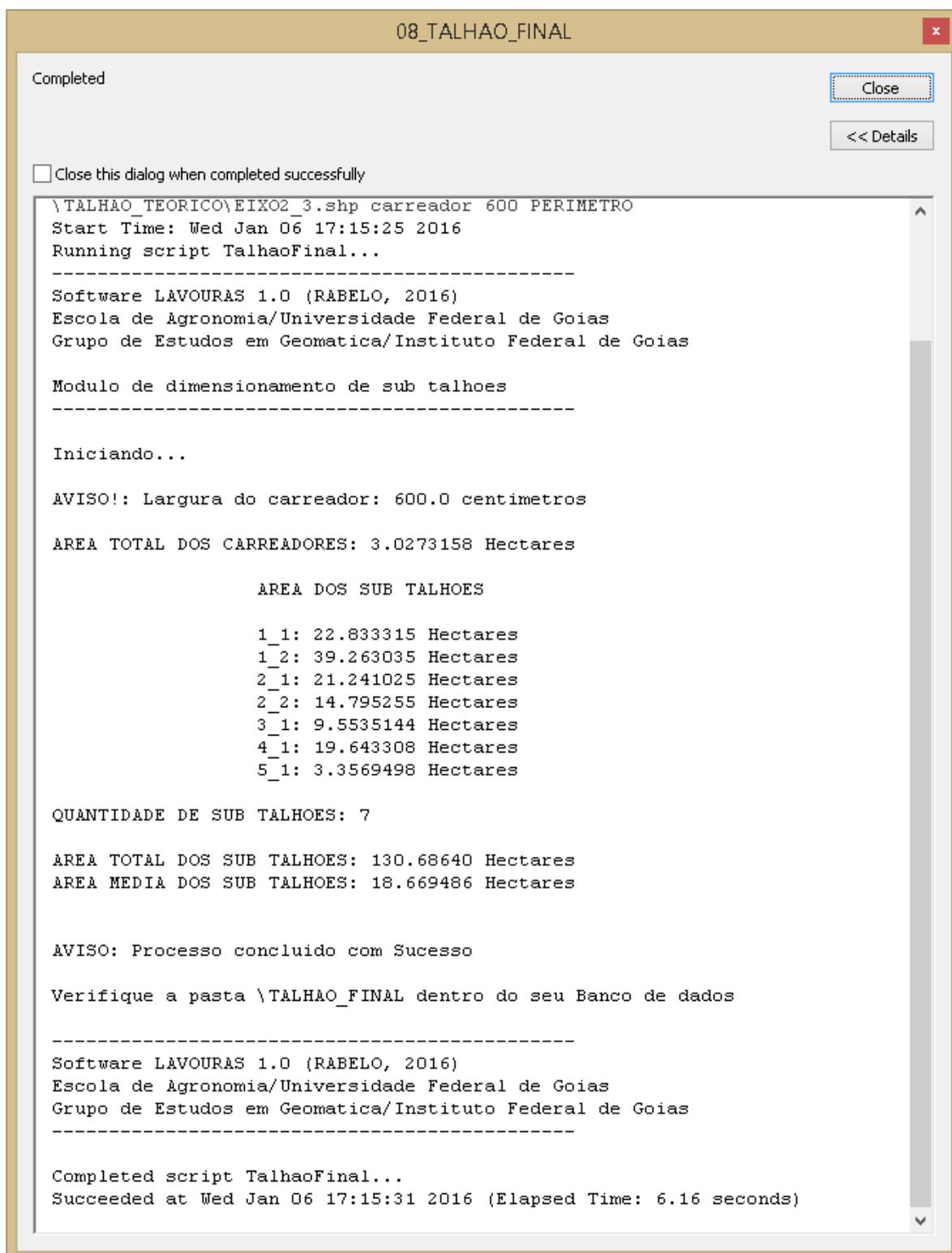


Figura 50. Caixa de diálogo com o relatório do *script* Talhao Final

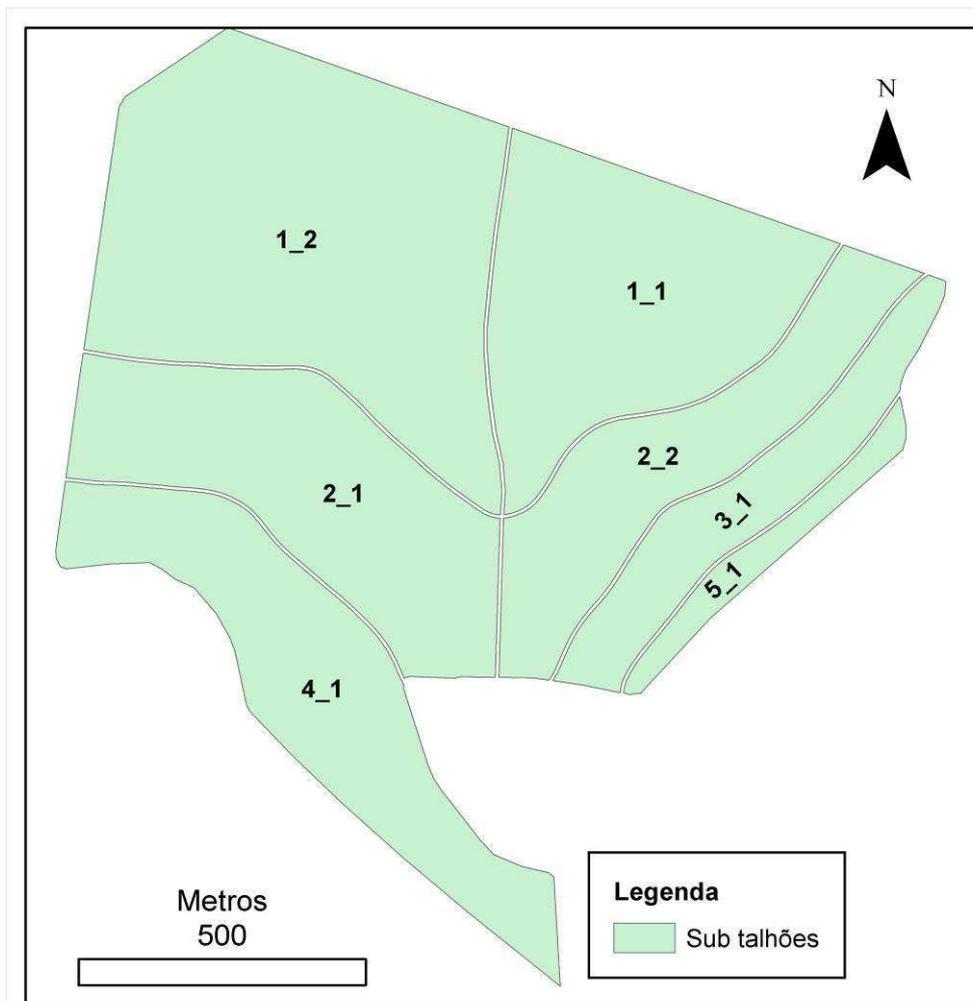
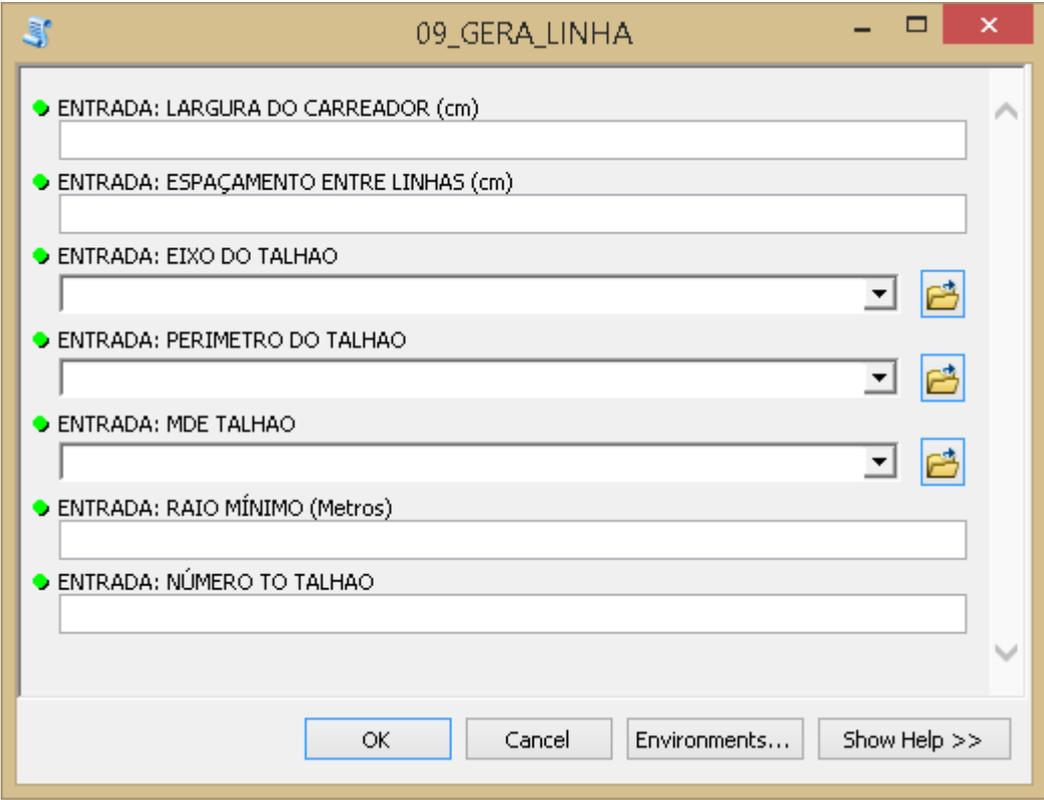


Figura 51. Sub-talhões gerados pelo *script* Talhao Final

O *script* Gera Linha é utilizado para obtenção das linhas de plantio a partir do polígono de um talhão teórico, desta forma, pode ser utilizado antes ou após o *script* Talhão Final. Se utilizado antes, as linhas de plantio geradas podem servir de referência para a criação e edição manual dos carregadores em desnível. A Figura 52 apresenta a tela do *script* Gera Linha, que gera as linhas de plantio utilizando os valores de largura do carreador, espaçamento entre linhas, raio mínimo de manobra, número do talhão, e os arquivos de MDE, eixo e perímetro do talhão. A caixa de diálogo permite o monitoramento constante da execução do *script*, indicando a distância da última linha gerada e a distância máxima que as linhas serão geradas, e ao finalizar o dimensionamento, informa o usuário o fim da execução do *script*, conforme ilustra a Figura 53. Os arquivos de saída deste *script* estão localizados na pasta TALHAO_TEORICO_LINHAS do banco de dados, e compreendem um arquivo vetorial com as linhas de plantio do talhão teórico, e um arquivo vetorial com as

linhas e entrelinhas do referido talhão. Este *script* é utilizado para geração das linhas de cada sub talhão, individualmente.



The image shows a software dialog box titled "09_GERA_LINHA". It contains the following input fields and controls:

- ENTRADA: LARGURA DO CARREADOR (cm) - Text input field
- ENTRADA: ESPAÇAMENTO ENTRE LINHAS (cm) - Text input field
- ENTRADA: EIXO DO TALHAO - Dropdown menu with a folder icon
- ENTRADA: PERIMETRO DO TALHAO - Dropdown menu with a folder icon
- ENTRADA: MDE TALHAO - Dropdown menu with a folder icon
- ENTRADA: RAI0 MÍNIMO (Metros) - Text input field
- ENTRADA: NÚMERO TO TALHAO - Text input field

At the bottom of the dialog, there are four buttons: "OK", "Cancel", "Environments...", and "Show Help >>".

Figura 52. Tela do *script* Gera Linha.

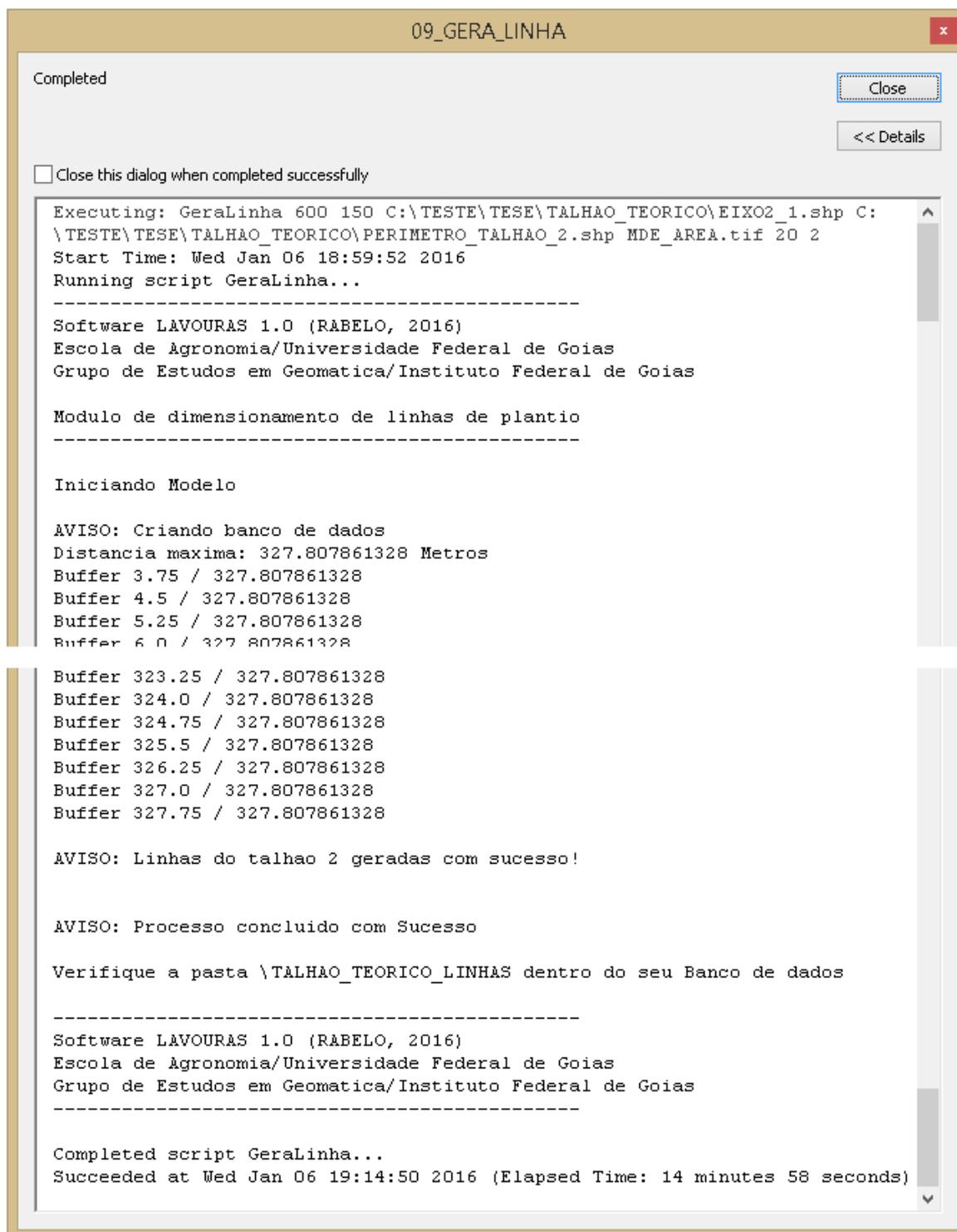


Figura 53. Caixa de diálogo com o relatório do *script* Gera Linha.

Uma vez geradas todas as linhas de plantio dos sub-talhões, o *script* Gera Linha Final tem como dados de entrada todos os arquivos vetoriais de linhas de plantio, e o arquivo vetorial com o polígono dos sub-talhões, gerado pelo *script* Talhao Final, como mostra a Figura 54. Este *script* recorta todas as linhas de plantio de acordo com o perímetro de cada

sub talhão, gera uma tabela com dados estatísticos das linhas geradas, como quantidade de linhas, comprimento médio e comprimento total de cada sub talhão e da área toda, e gera o arquivo vetorial contendo todas as linhas dos sub-talhões, e um arquivo com as linhas de cada sub talhão. Os arquivos de saída deste *script* estão localizados na pasta TALHAO_FINAL_LINHAS do banco de dados. Ao final da execução do *script*, a caixa de diálogo apresenta uma tabela com os resultados, conforme ilustra a Figura 55.

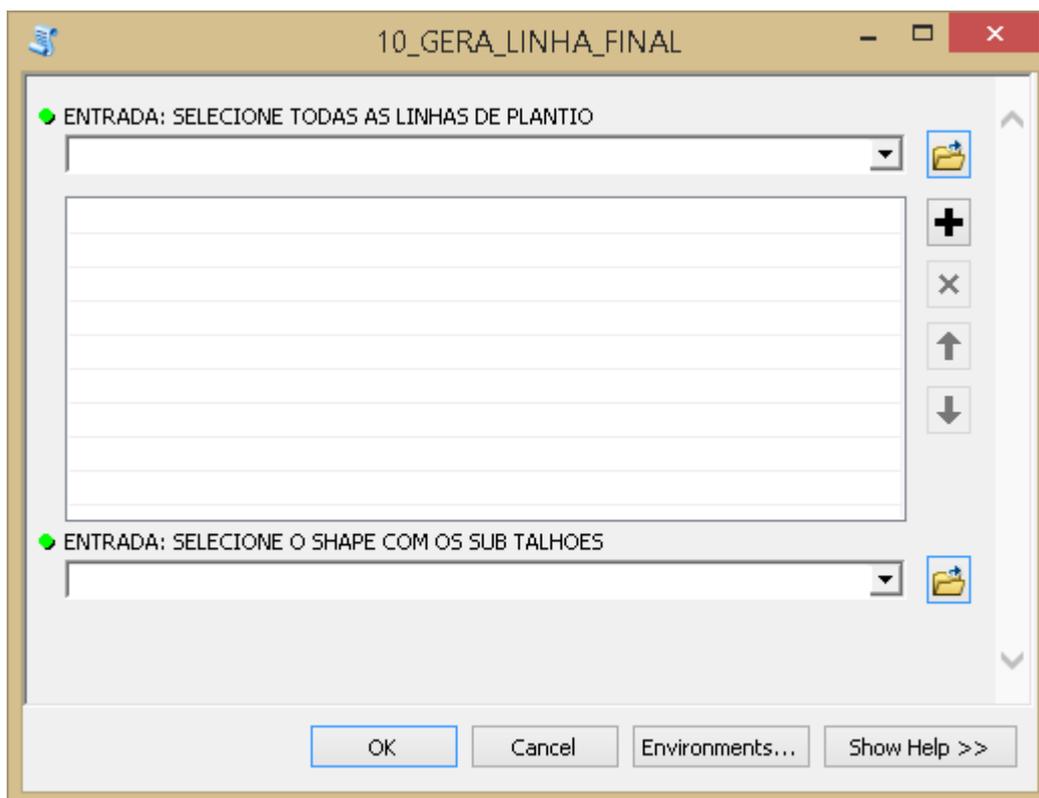


Figura 54. Tela do *script* Gera Linha Final.

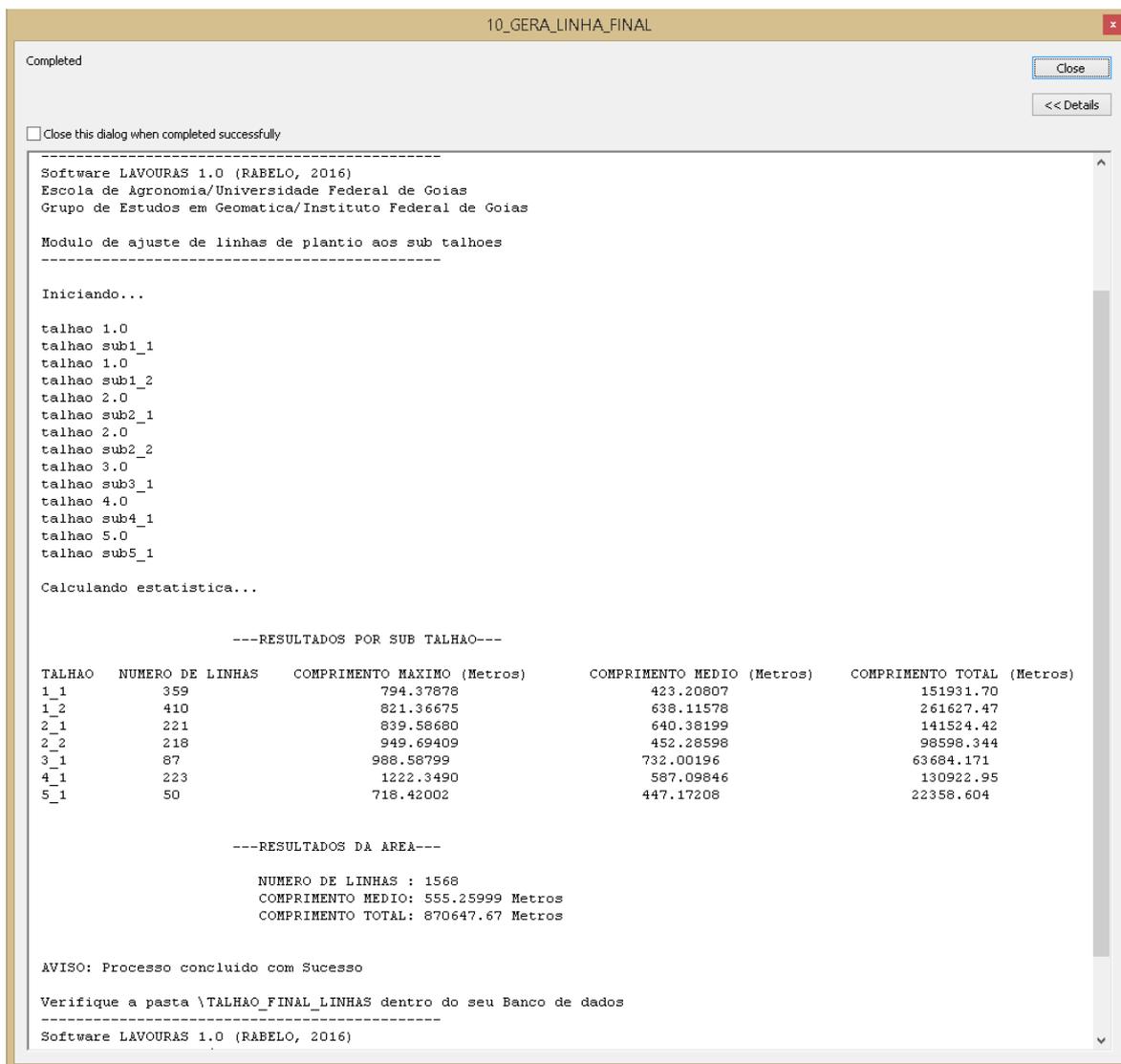


Figura 55. Caixa de diálogo com o relatório do *script* Gera Linha Final.

Após a geração de todos os talhões, sub-talhões, linhas de plantio e linhas de plantio dos sub-talhões, utiliza-se o *script* Terraco, que dimensiona os terraços da área agrícola, cuja localização corresponde à localização dos eixos, e para o cálculo do volume de escoamento superficial a ser armazenado pelo terraço considera o volume acumulado nas linhas de plantio, em função de sua profundidade. A Figura 56 apresenta a tela do *script* Terraco. Os arquivos de saída deste *script* estão localizados na pasta TERRACO do banco de dados, e a caixa de diálogo apresenta um relatório contendo uma tabela com a altura do terraço, volume a ser armazenado, volume armazenado nas linhas de plantio e comprimento dos terraços, conforme mostra a Figura 57.

11_TERRACO

● ENTRADA: SELECIONE TODAS A SLINHAS E ENTRELINHAS

● ENTRADA: TALHOES_SUB DA PASTA {{TALHAO_FINAL}

● ENTRADA: TALHOES_TEORICOS DA PASTA {{TALHAO_FINAL}

● ENTRADA: MDE DO PERIMETRO

● ENTRADA: PROFUNDIDADE DO SULCO (cm)

● ENTRADA: EIXOS_MERGE DA PASTA {{TALHAO_FINAL}

● ENTRADA: DADOS DA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS (K)

● ENTRADA: DADOS DA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS (A)

● ENTRADA: DADOS DA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS (B)

● ENTRADA: DADOS DA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS (C)

● ENTRADA: PERÍODO DE RETORNO (Anos)

● ENTRADA: CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO (mm/h)

● ENTRADA: DECLIVIDADE DA PAREDE DO TERRACO (m/m)

OK Cancel Environments... Show Help >>

Figura 56. Tela do *script* Terraco.

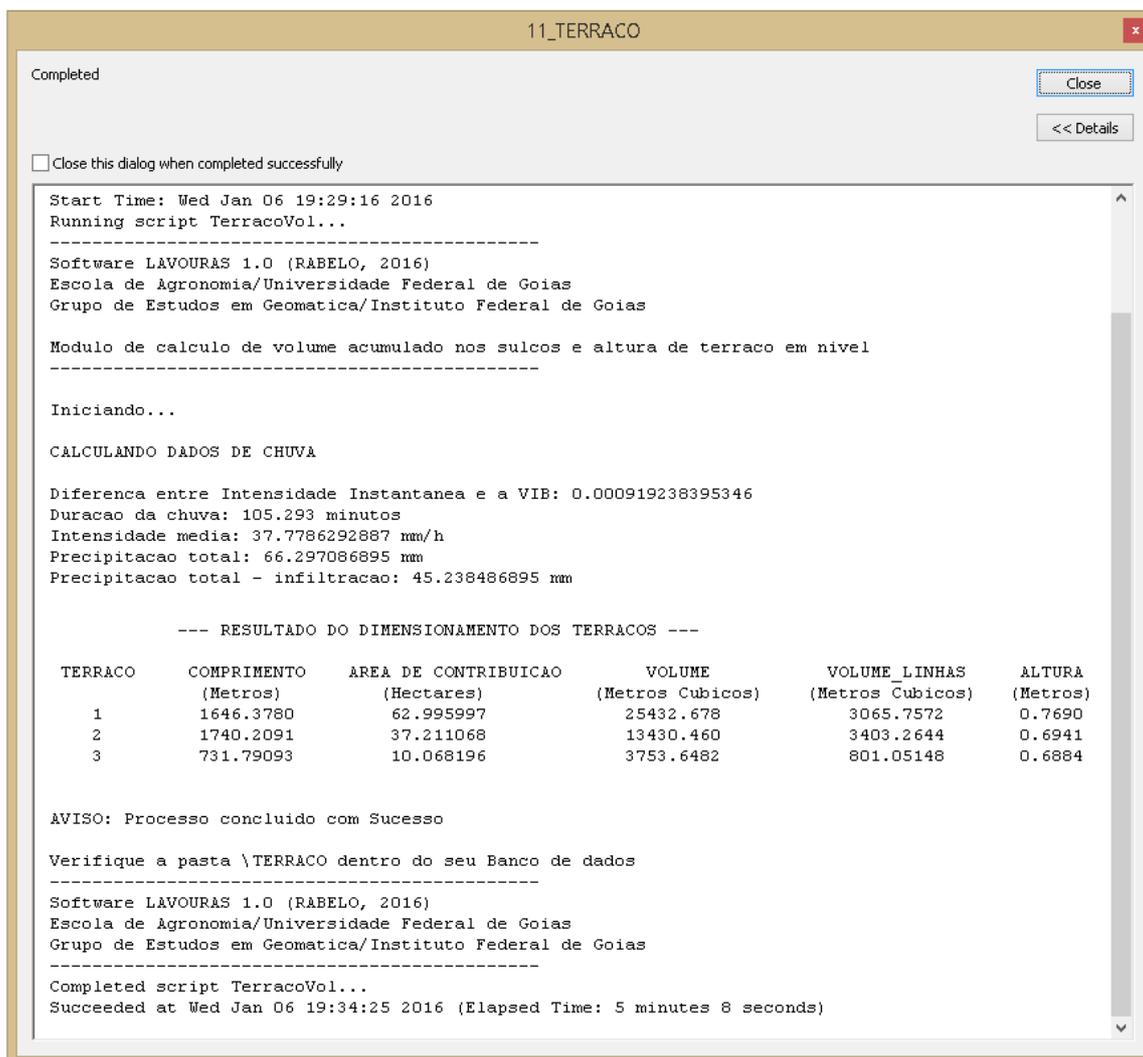


Figura 57. Caixa de diálogo com o relatório do *script* Terraco.

Finalizado todo o dimensionamento da área, o *script* Relatório Final (Figura 58) não tem nenhum parâmetro a ser informado pelo usuário, e emite o relatório final do dimensionamento dos talhões, linhas de plantio e terraços da área agrícola, por meio da caixa de diálogo, conforme é apresentado na Figura 59.



Figura 58. Tela do *script* Relatório Final.

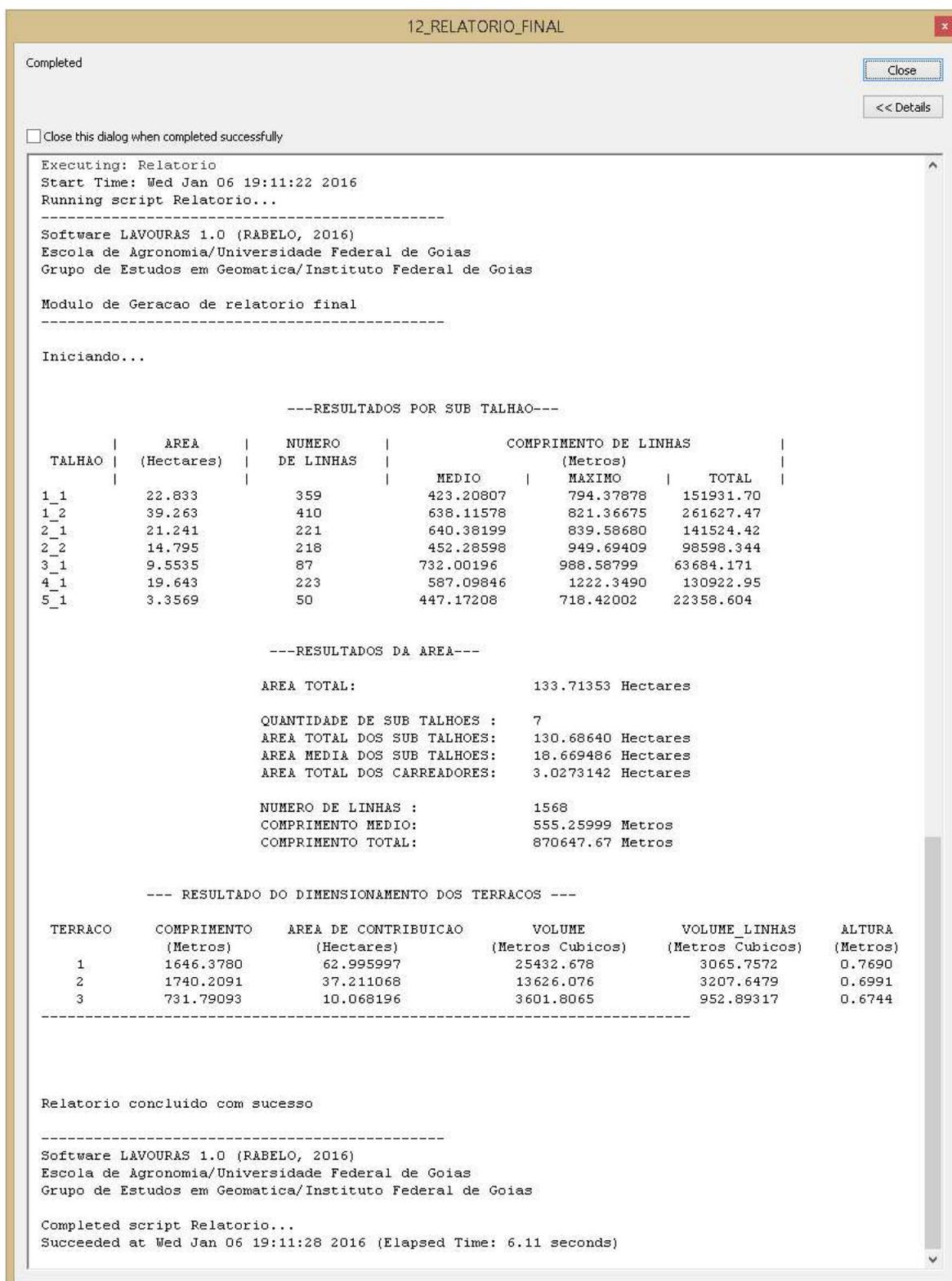


Figura 59. Caixa de diálogo do *script* Relatorio Final

Como o *script* Relatório Final utiliza os arquivos gerados automaticamente pelos *scripts* Talhao Final, Gera Linha Final e Terraco, e os arquivos gerados por estes *scripts* estão localizados nas pastas TALHAO_FINAL, TALHAO_FINAL_LINHAS e TERRACO, recomenda-se que o usuário não modifique os arquivos localizados nestas pastas. Para elaboração de mapas e distribuição dos arquivos vetoriais obtidos pelo *software*, recomenda-se a criação de novas pastas no banco de dados e que os arquivos utilizados após o dimensionamento sejam copiados para estas pastas, de modo a garantir a organização necessária para o funcionamento da ferramenta computacional. O *script* Relatório Final pode ser executado diversas vezes após a finalização do dimensionamento, para recuperação do relatório na caixa de diálogo. Além disso, o relatório é disponibilizado em formato de texto e enquanto a caixa de diálogo não for fechada pelo usuário, este pode copiá-lo para edição em outros softwares editores de texto.

4.3. ANÁLISE DE TALHOES E GERAÇÃO DE LINHAS DE PLANTIO

O levantamento cadastral da subdivisão inicial da área de estudo teve como resultado 14 talhões, com área média de 9,211 hectares e área total de carreadores de 4,759 hectares. A Figura 60 apresenta o mapa com os talhões da situação inicial da área de estudo.

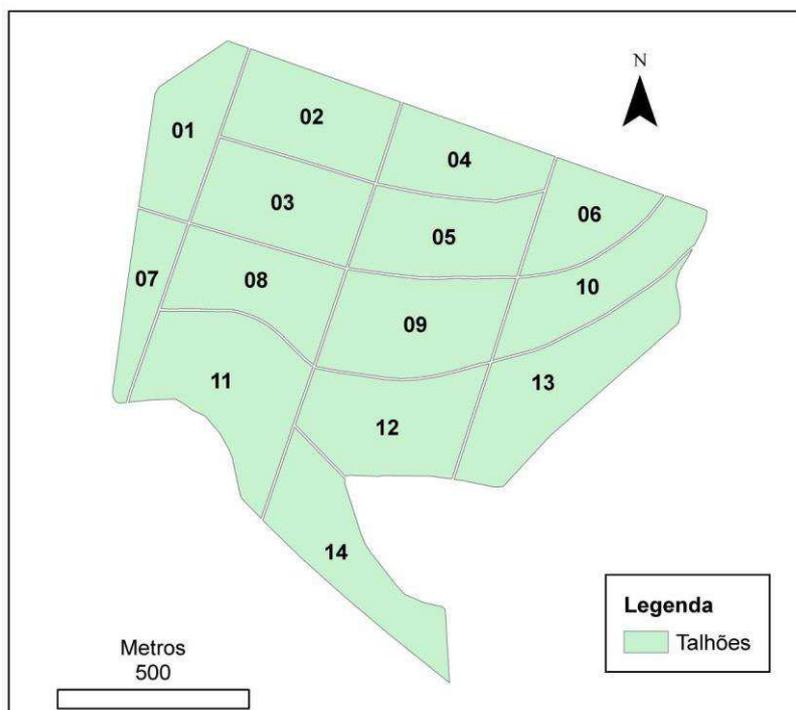


Figura 60. Mapa com a subdivisão inicial da área de estudo.

O dimensionamento dos talhões com a USLE gerou 5 talhões em nível, e 7 sub-talhões, com área média de 18,669 hectares e área de carregadores de 3,027 hectares. O dimensionamento pela metodologia USLE+L também resultou em 5 talhões em nível e 7 sub-talhões, porém com área média de 18,640 hectares e área de carregadores de 3,235 hectares. As Figura 61 e Figura 62 apresentam os mapas dos sub-talhões dos dimensionamentos realizados com a USLE e com a USLE+L, respectivamente. A adoção da largura máxima do talhão proporcionou redução na largura dos talhões 1_1 e 1_2, e teve como consequência o aumento da área do talhão 5_1, em relação aos talhões dimensionados pela USLE sem considerar um valor de largura máxima. O talhão 5_1 teve sua área aumentada de 3,36 ha, quando dimensionado pela USLE, para 11,87 ha, quando dimensionado pela USLE+L.

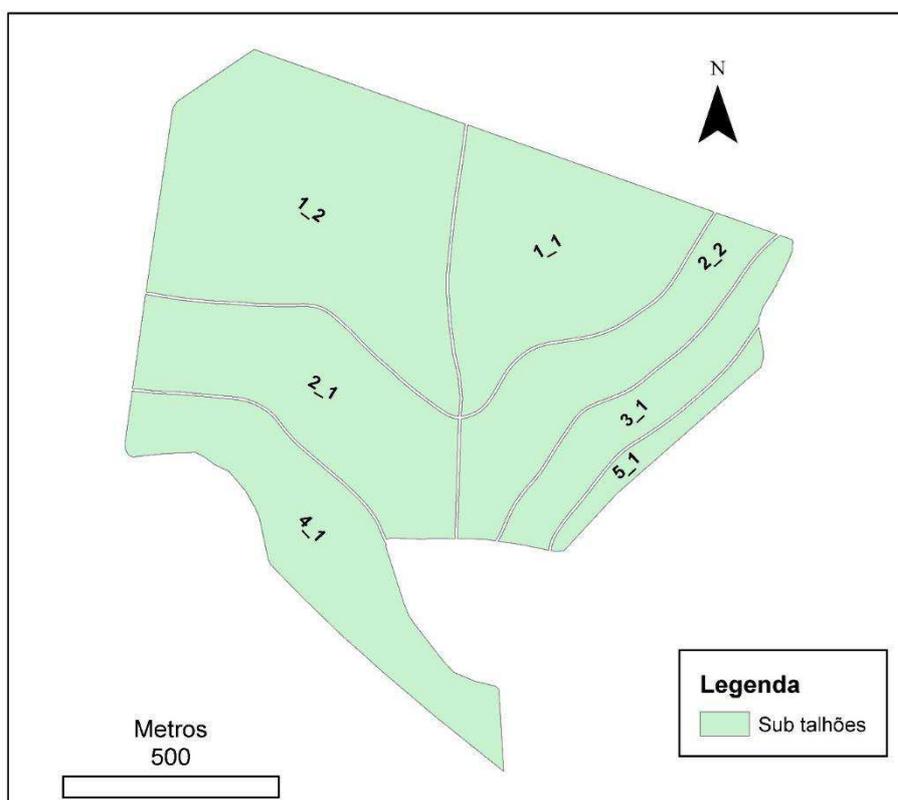


Figura 61. Mapa dos sub-talhões dimensionados considerando a USLE

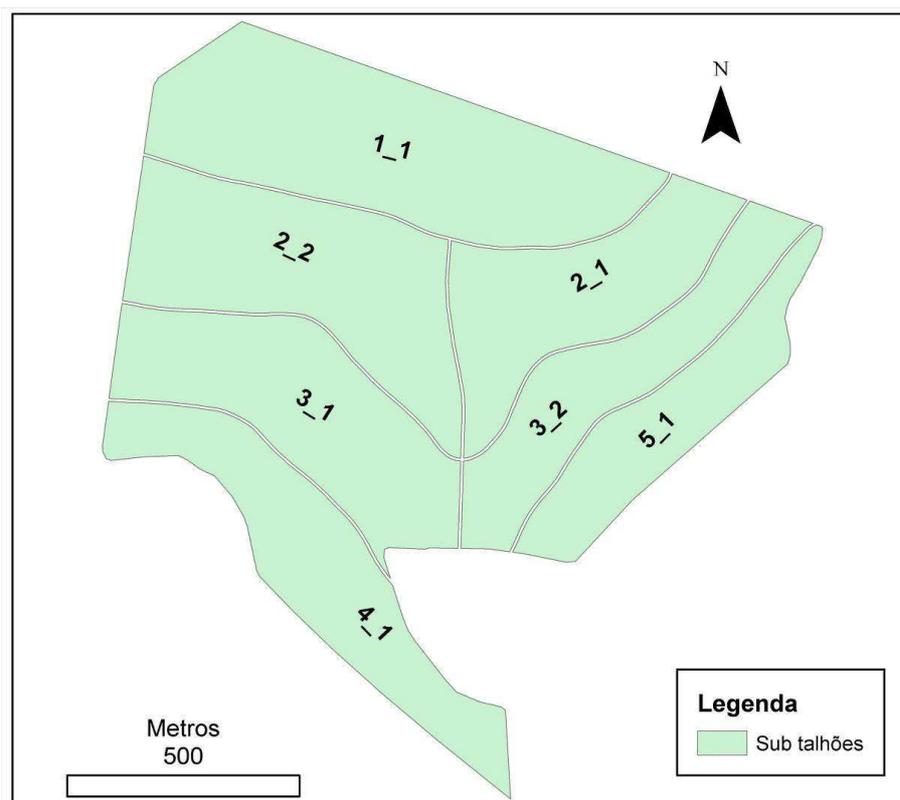


Figura 62. Mapa dos sub-talhões dimensionados pela metodologia USLE+L

Para dimensionar os talhões a partir dos terraços obtidos com o *software* Terraço 4.0 de acordo com a metodologia Lombardi e Espaçamento arbitrado, foram gerados 24 terraços com a metodologia Lombardi Neto et al. e 18 terraços com a metodologia Espaçamento arbitrado. As Figuras Figura 63 e Figura 64 apresentam as imagens dos relatórios gerados pelo *software* Terraço 4.0 para as respectivas metodologias de dimensionamento de terraços.



RELATÓRIO

Locação de Sistemas de Terraceamento em Nível

Terraço	Cota	Espaçamento vertical(m)	Declividade média(%)	Comprimento do terraço(m)	Área de influência(m2)	Altura do terraço(m)
1	550.50	1.15	1.47	553.93	27,247.0	0.41
2	549.28	1.22	1.63	835.03	51,437.0	0.41
3	548.02	1.26	1.73	1,039.94	67,113.0	0.42
4	546.72	1.30	1.81	1,165.79	77,011.0	0.42
5	545.39	1.34	1.92	1,267.88	82,756.0	0.43
6	543.98	1.40	2.08	1,360.82	86,422.0	0.43
7	542.48	1.50	2.35	1,453.99	88,321.0	0.44
8	540.89	1.59	2.58	1,570.42	90,037.0	0.45
9	539.22	1.67	2.81	1,717.85	94,470.0	0.46
10	537.43	1.78	3.13	1,871.73	99,304.0	0.47
11	535.49	1.94	3.63	2,023.39	100,160.0	0.48
12	533.09	2.38	5.19	812.52	108,951.0	0.47
13	533.09	2.10	4.16	1,038.93	108,951.0	0.49
14	530.51	2.58	5.93	1,011.35	43,037.0	0.52
15	527.95	2.56	5.87	890.6	40,140.0	0.52
16	525.33	2.59	5.96	764.32	35,012.0	0.52
17	522.80	2.51	5.65	627.16	31,714.0	0.52
18	531.26	1.83	3.3	817.28	42,679.0	0.47
19	529.23	2.01	3.88	878.66	42,831.0	0.49
20	527.10	2.13	4.29	1,095.87	46,697.0	0.49
21	524.98	2.12	4.25	869.85	49,526.0	0.49
22	523.15	1.81	3.22	330.88	40,231.0	0.48
23	523.15	1.85	3.34	152.48	40,231.0	0.47
24	521.59	1.56	2.5	49.15	5,478.0	0.45

Comprimento total de terraços: 24,199.83 m

Figura 63. Relatório do *software* Terraço 4.0 com os resultados dos terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al.



RELATÓRIO

Locação de Sistemas de Terraceamento em Nível

Terraço	Cota	Espaçamento vertical(m)	Declividade média(%)	Comprimento do terraço(m)	Área de influência(m ²)	Altura do terraço(m)
1	549.27	2.37	1.52	836.64	79,468.0	0.71
2	546.91	2.37	1.76	1,149.32	133,061.0	0.67
3	544.54	2.37	1.92	1,326.14	148,363.0	0.65
4	542.17	2.37	2.3	1,473.66	139,661.0	0.60
5	539.80	2.37	2.67	1,667.4	134,842.0	0.56
6	537.43	2.37	3.07	1,872.43	132,972.0	0.53
7	535.06	2.37	3.72	2,034.52	121,314.0	0.49
8	532.69	2.37	5.11	791.51	104,122.0	0.48
9	532.69	2.37	4.23	1,034.85	104,122.0	0.52
10	530.32	2.37	5.96	1,006.32	39,300.0	0.41
11	527.95	2.37	5.9	890.51	36,862.0	0.41
12	525.58	2.37	5.96	774.45	31,925.0	0.41
13	523.21	2.37	5.63	661.56	29,623.0	0.42
14	530.32	2.37	3.42	849.26	54,394.0	0.56
15	527.92	2.37	4.21	1,000.71	49,728.0	0.52
16	525.55	2.37	4.31	958.49	57,071.0	0.51
17	523.17	2.37	3.43	334.22	51,676.0	0.53
18	523.17	2.37	3.55	153.7	51,676.0	0.52

Comprimento total de terraços: 18,815.7 m

Figura 64. Relatório do *software* Terraço 4.0 com os resultados dos terraços dimensionados pela metodologia Espaçamento arbitrado.

Os terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al. resultaram em 25 talhões em nível, e após divisão com os carregadores em desnível, foram obtidos 34 sub-talhões, com área média de 3,510 hectares, e área total de carregadores de 14,388 hectares. Os talhões gerados a partir dos terraços dimensionados pelo método arbitrado produziram como resultado 20 talhões em nível e após divisão com os carregadores em

desnível, foram obtidos 25 sub-talhões, com área média de 4,899 hectares, e 11,236 hectares de área de carregadores. As Figuras Figura 65 e Figura 66 mostram os mapas dos sub-talhões dos dimensionamentos dos talhões realizados a partir dos terraços obtidos pela metodologia Lombardi Neto et al. e pela metodologia espaçamento arbitrado, respectivamente.

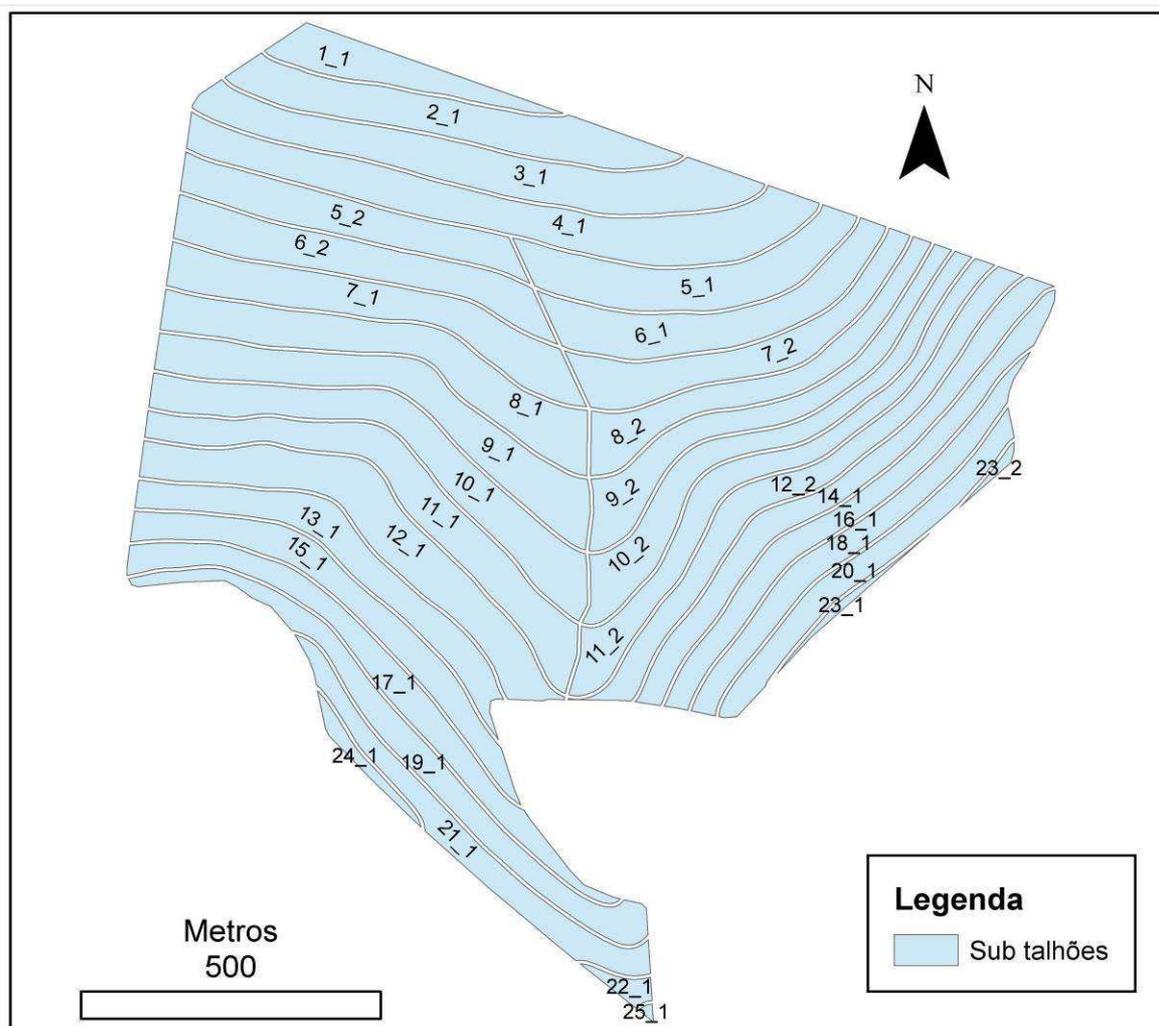


Figura 65. Mapa dos sub-talhões dimensionados a partir dos terraços obtidos pela metodologia Lombardi Neto et al.

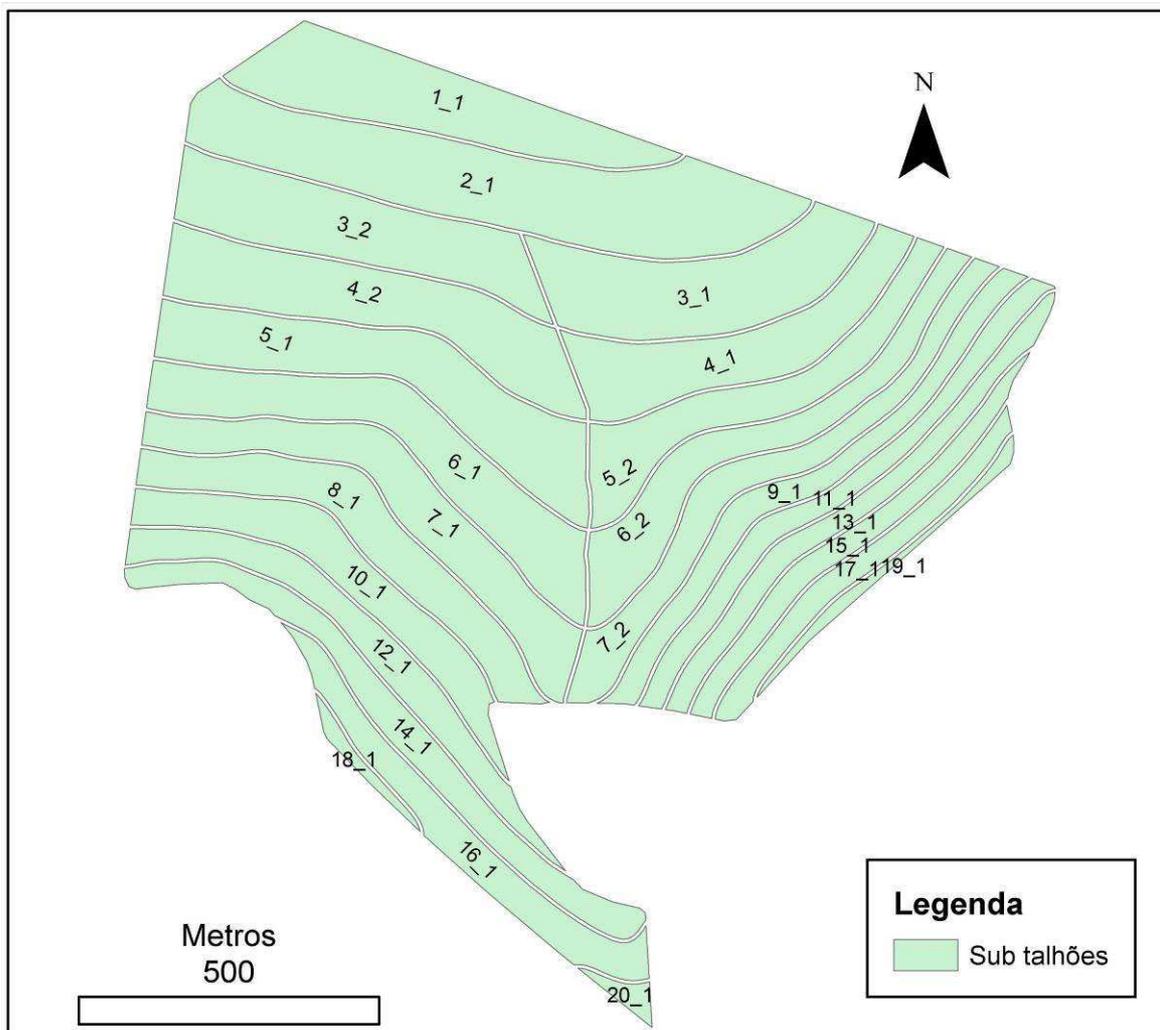


Figura 66. Mapa dos sub-talhões dimensionados a partir dos terraços obtidos pela metodologia espaçamento arbitrado.

Na Tabela 8 são apresentados os dados de quantidade e área média de talhões, considerando os talhões da área antiga e os sub-talhões dos dimensionamentos, bem com a área utilizada para carregadores de cada cenário. Observa-se que os dimensionamentos realizados considerando a USLE e a USLE+L obtiveram menor número de talhões, maior área média e menor área de carregadores, se comparados aos demais cenários. Os dimensionamentos com os terraços obtidos tanto na metodologia Lombardi Neto et al., quanto na metodologia Espaçamento Arbitrado, obtiveram um número maior de talhões que o cenário antigo, além de menor área média e maior área de carregadores, uma vez que estes dimensionamentos resultaram em maior número de terraços. Deste modo, verifica-se a vantagem do dimensionamento dos talhões com as metodologias que envolvem a USLE, uma vez que estas proporcionam menor área perdida com carregadores, e maior área média,

principalmente se comparados com os talhões dimensionados com os terraços obtidos pela metodologia Lombardi Neto et al. O dimensionamento com a USLE+L proporcionou redução de 77,51% da área destinada aos carregadores, e aumentou em 531% a área média dos talhões, se comparado com os talhões dimensionados com os terraços obtidos pela metodologia Lombardi Neto et al., em relação à situação inicial da área, o dimensionamento considerando a USLE+L aumentou em 202% a área média dos talhões. Como consequência, verificou-se no dimensionamento pela metodologia Lombardi Neto et al., em relação ao dimensionamento pela USLE, redução de 8,6% na área total dos talhões, que corresponde à área plantada, o que desmotiva a adoção da metodologia Lombardi Neto et al. de dimensionamento de terraços por parte dos produtores rurais.

Tabela 8. Resultados de quantidade de talhões, área média de talhões, área total dos talhões e área de carregadores dos dimensionamentos realizados.

Cenário	Quantidade de talhões	Área média (ha)	Área total dos talhões (ha)	Área de carregadores (ha)
Situação inicial	14	9,21	128,95	4,75
USLE	7	18,66	130,69	3,02
USLE+L*	7	18,64	130,48	3,23
Lombardi Neto et al. (1994)	34	3,51	119,32	14,38
Espaçamento Arbitrado	25	4,89	122,48	11,23

*USLE+L: Dimensionamento dos talhões pela perda de solo calculada pela USLE e considerando a largura máxima dos talhões

Na Tabela 9 são apresentados os dados de quantidade, comprimento médio e comprimento total de terraços existentes na situação inicial da área de estudo, e dos terraços dimensionados pela USLE, pela USLE+L, pela metodologia Lombardi Neto et al. e pela metodologia Espaçamento Arbitrado. Vale ressaltar que os terraços existentes não eram usados como carregadores, e apresentavam descontinuidade na área agrícola e desnível de até 2 metros no mesmo terraço. Os resultados obtidos possibilitaram verificar que o dimensionamento pela USLE conseguiu reduzir em 82,9% o comprimento total de terraços, se comparado com o dimensionamento pela metodologia Lombardi Neto et al., e em 72,3% se comparado com os terraços existentes na área de estudo. A segurança da redução no número de terraços é baseada no fato de que a perda de solo admitida no dimensionamento pela USLE e pela USLE+L será sempre inferior ao limite de perda do solo da área, possibilitando o controle dos efeitos do processo erosivo.

Tabela 9. Resultados de quantidade, comprimento médio e comprimento total de terraços dimensionados.

Cenário	Quantidade de terraços	Comprimento médio (m)	Comprimento total (m)
Situação inicial	15	993,3	14900,0
USLE	3	1372,8	4118,4
USLE+L	3	1588,2	4764,5
Lombardi Neto et al. (1994)	24	1008,3	24199,8
Espaçamento Arbitrado	18	1045,3	18815,7

Após o dimensionamento dos talhões, a geração das linhas de plantio foi realizada nos sentidos para cima e para baixo dos eixos de cada talhão em cada cenário. Apenas no cenário antigo foram geradas as linhas considerando somente o sentido verificado em campo. O melhor resultado das linhas de cada talhão foi aquele com maior comprimento médio de linhas, pois deste modo, obtém-se menor número de linhas e conseqüentemente menor quantidade de manobras. Na Tabela 10 é possível visualizar os resultados para cada talhão do cenário antigo.

Tabela 10. Resultados das linhas geradas para os talhões do cenário inicial da área de estudo.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)
1_1	9,21	150	409,29	442,61	61393,70
1_2	6,31	180	233,72	447,86	42069,53
1_3	9,81	157	416,73	422,37	65427,09
1_4	7,42	166	297,96	460,59	49461,89
1_5	9,61	166	386,02	420,65	64079,89
1_6	7,30	323	150,69	192,25	48671,69
7_1	10,04	180	371,91	646,41	66943,18
6_1	12,12	162	498,81	834,17	80807,10
5_1	10,80	208	345,41	462,49	71845,52
4_1	13,24	286	308,39	450,59	88199,47
3_1	4,32	334	86,19	134,47	28788,45
2_1	11,25	178	420,94	476,15	74927,55
2_2	8,87	183	323,35	448,31	59172,35
2_3	8,63	132	435,98	652,80	57549,24

Nas Tabela 11 e Tabela 12 são apresentados os resultados das linhas geradas para cada talhão dimensionado considerando a USLE, com geração de linhas para baixo e para

cima, respectivamente. Observa-se que os talhões 1_1 e 1_2 as linhas somente foram geradas para cima, pois nestes talhões não havia eixo acima, e nos talhões 4_1 e 5_1 as linhas somente foram geradas para baixo pois nestes não haviam eixos abaixo. Nos talhões em que foram geradas linhas para cima e para baixo, procedeu-se a verificação dos melhores resultados, que foram aqueles com menor quantidade de linhas, e conseqüentemente menor número de manobras, e maior comprimento médio de linhas (Tabela 13).

Tabela 11. Resultados das linhas geradas no sentido para baixo para os talhões dimensionados considerando a USLE.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)
2_1	21,24	218	649,19	839,59	141524,42
2_2	14,80	295	334,23	772,15	98598,34
3_1	9,55	83	767,28	988,59	63684,17
4_1	19,64	223	587,10	1222,35	130922,95
5_1	3,36	50	447,17	718,42	22358,60

Tabela 12. Resultados das linhas geradas no sentido para cima para os talhões dimensionados considerando a USLE.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)
1_1	22,83	359	423,21	794,38	151931,70
1_2	39,26	410	638,12	821,37	261627,47
2_1	21,24	200	708,07	942,53	141614,37
2_2	14,79	156	632,26	1011,24	98632,64
3_1	9,55	88	723,64	957,46	63680,47

Tabela 13. Combinação dos melhores resultados das linhas geradas no sentido para cima e para baixo para os talhões dimensionados considerando a USLE.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)	Sentido
1_1	22,83	359	423,21	794,38	151931,70	Cima*
1_2	39,26	410	638,12	821,37	261627,50	Cima*
2_1	21,24	200	708,07	942,53	141614,40	Cima
2_2	14,8	156	632,26	1011,24	98632,64	Cima
3_1	9,55	83	767,28	988,59	63684,17	Baixo
4_1	19,64	223	587,10	1222,35	130923,00	Baixo*
5_1	3,36	50	447,17	718,42	22358,60	Baixo*

* Talhões com apenas um sentido possível de dimensionamento

O mesmo procedimento de geração de linhas foi adotado para os cenários considerando a USLE+L (Tabelas 14, 15 e 16), observando que nos talhões 1_1 e 2_1 as linhas foram geradas apenas para cima, e nos talhões 4_1 e 5_1 as linhas foram geradas apenas para baixo. Bem como as linhas geradas para os talhões obtidos com os terraços calculados pela metodologia Lombardi Neto (Tabelas Tabela 17. Resultados das linhas geradas no sentido para baixo para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia , Tabela 18 e Tabela 19), observando que as linhas do talhão 1_1 foram geradas apenas para cima, e nos talhões, 23_1, 23_2, 24_1 e 25_1 apenas para baixo. E finalmente o mesmo procedimento foi adotado para gerar as linhas dos talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia espaçamento arbitrado (Tabelas Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22), verificando que as linhas do talhão 1_1 foram geradas apenas para cima, e as linhas dos talhões 11_1, 18_1, 19_1 e 20_1 foram geradas apenas para baixo.

Tabela 14. Resultados das linhas geradas no sentido para baixo para os talhões dimensionados considerando a USLE+L.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)
2_1	15,86	389	271,84	738,01	105745,50
2_2	22,19	348	425,16	732,94	147955,80
3_1	19,61	203	643,43	873,51	130617,20
3_2	13,71	256	356,85	854,29	91353,77
4_1	17,61	196	598,68	1177,70	117340,40
5_1	11,87	122	648,24	983,60	79084,93

Tabela 15. Resultados das linhas geradas no sentido para cima para os talhões dimensionados considerando a USLE+L.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)
1_1	29,63	229	862,34	1219,75	197475,40
2_1	15,86	213	496,07	873,56	105662,00
2_2	22,19	258	572,93	857,86	147815,10
3_1	19,61	189	691,63	925,49	130718,90
3_2	13,71	147	621,83	1008,29	91408,85

Tabela 16. Combinação dos melhores resultados das linhas geradas no sentido para cima e para baixo para os talhões dimensionados considerando a USLE+L.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)	Sentido
1_1	29,63	229	862,34	1219,75	197475,40	Cima*
2_1	15,86	213	496,07	873,56	105662,00	Cima
2_2	22,19	258	572,93	857,86	147815,10	Cima
3_1	19,61	189	691,63	925,49	130718,90	Cima
3_2	13,71	147	621,83	1008,29	91408,85	Cima
4_1	17,61	196	598,68	1177,70	117340,40	Baixo*
5_1	11,87	122	648,24	983,60	79084,93	Baixo*

* Talhões com apenas um sentido possível de dimensionamento

Tabela 17. Resultados das linhas geradas no sentido para baixo para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Lombardi Neto et al.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)
10_1	5,22	82	424,45	834,92	34805,24
10_2	3,64	115	211,70	803,78	24346,00
11_1	5,09	83	408,84	866,80	33933,57
11_2	3,78	113	223,18	910,68	25219,04
12_1	5,74	64	597,49	899,03	38239,22
12_2	3,84	73	351,26	1023,60	25641,81
13_1	3,71	48	514,98	770,05	24719,15
14_1	3,68	42	585,39	996,58	24586,23
15_1	3,70	78	316,44	801,78	24682,42
16_1	3,39	38	594,31	974,57	22583,74
17_1	3,94	123	213,41	875,73	26248,93
18_1	2,93	30	650,06	838,04	19501,81
19_1	4,03	66	406,98	1072,78	26860,43
2_1	4,55	138	219,92	661,66	30349,06
20_1	2,65	31	569,87	718,69	17665,87
21_1	3,16	48	439,14	819,17	21078,74
22_1	0,32	32	66,55	120,91	2129,60
23_1	0,21	9	155,06	314,57	1395,54
23_2	0,11	11	68,63	132,29	754,88
24_1	0,44	18	164,96	286,78	2969,26
25_1	0,04	18	13,91	25,00	250,40
3_1	6,06	95	424,26	915,88	40304,70
4_1	7,01	92	507,28	1072,30	46669,90
5_1	4,04	91	296,05	571,51	26940,76
5_2	3,45	50	460,50	593,68	23024,77
6_1	3,84	91	281,57	528,87	25622,71
6_2	3,96	62	426,45	650,68	26439,80
7_1	4,61	73	420,68	711,68	30709,92
7_2	3,35	89	250,76	450,65	22317,80
8_1	5,05	84	400,25	756,57	33621,33
8_2	3,03	100	202,42	572,95	20242,49
9_1	5,22	94	369,51	797,95	34733,48
9_2	3,24	112	193,01	692,12	21616,86

Tabela 18. Resultados das linhas geradas no sentido para cima para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Lombardi Neto et al.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)
1_1	2,14	75	190,42	483,42	14281,70
10_1	5,22	70	496,59	873,40	34761,18
10_2	3,64	66	367,87	946,24	24279,35
11_1	5,09	61	556,37	904,08	33938,37
11_2	3,78	64	393,73	1058,40	25198,88
12_1	5,74	69	554,31	864,80	38247,61
12_2	3,84	64	400,53	1008,20	25633,90
13_1	3,71	72	343,50	766,29	24732,31
14_1	3,68	38	647,02	983,24	24586,77
15_1	3,70	76	324,82	752,83	24686,35
16_1	3,39	67	337,10	911,42	22585,77
17_1	3,94	51	514,33	1056,78	26230,63
18_1	2,93	35	557,18	802,68	19501,32
19_1	4,03	154	173,38	952,82	26700,98
2_1	4,55	99	306,41	757,89	30334,62
20_1	2,65	63	280,35	675,65	17662,16
21_1	3,16	101	201,65	762,09	20366,91
22_1	0,32	79	27,00	62,64	2133,25
3_1	6,06	69	583,92	993,05	40290,34
4_1	7,01	66	706,60	1115,48	46635,52
5_1	4,04	51	527,97	603,77	26926,58
5_2	3,45	45	511,65	604,01	23024,06
6_1	3,84	54	474,36	628,37	25615,54
6_2	3,96	57	463,76	671,36	26434,56
7_1	4,61	72	426,30	746,63	30693,42
7_2	3,35	62	359,98	647,89	22318,70
8_1	5,05	79	425,44	784,82	33610,13
8_2	3,03	71	284,60	726,66	20206,75
9_1	5,22	82	423,55	824,60	34731,35
9_2	3,24	69	312,63	833,11	21571,54

Tabela 19. Combinação dos melhores resultados das linhas geradas no sentido para cima e para baixo para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Lombardi Neto et al.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)	Sentido
1_1	2,14	75	190,42	483,42	14281,70	Cima*
10_1	5,22	70	496,59	873,40	34761,18	Cima
10_2	3,64	66	367,87	946,24	24279,35	Cima
11_1	5,09	61	556,37	904,08	33938,37	Cima
11_2	3,78	64	393,73	1058,40	25198,88	Cima
12_1	5,74	64	597,49	899,03	38239,22	Baixo
12_2	3,84	64	400,53	1008,20	25633,90	Baixo
13_1	3,71	48	514,98	770,05	24719,15	Cima
14_1	3,68	38	647,02	983,24	24586,77	Cima
15_1	3,70	76	324,82	752,83	24686,35	Cima
16_1	3,39	38	594,31	974,57	22583,74	Baixo
17_1	3,94	51	514,33	1056,78	26230,63	Cima
18_1	2,93	30	650,06	838,04	19501,81	Baixo
19_1	4,03	66	406,98	1072,78	26860,43	Baixo
2_1	4,55	99	306,41	757,89	30334,62	Cima
20_1	2,65	31	569,87	718,69	17665,87	Baixo
21_1	3,16	48	439,14	819,17	21078,74	Baixo
22_1	0,32	32	66,55	120,91	2129,60	Baixo
23_1	0,21	9	155,06	314,57	1395,54	Baixo*
23_2	0,11	11	68,63	132,29	754,88	Baixo*
24_1	0,44	18	164,96	286,78	2969,26	Baixo*
25_1	0,04	18	13,91	25,00	250,40	Baixo*
3_1	6,06	69	583,92	993,05	40290,34	Cima
4_1	7,01	66	706,60	1115,48	46635,52	Cima
5_1	4,04	51	527,97	603,77	26926,58	Cima
5_2	3,45	45	511,65	604,01	23024,06	Cima
6_1	3,84	54	474,36	628,37	25615,54	Baixo
6_2	3,96	57	463,76	671,36	26434,56	Cima
7_1	4,61	72	426,30	746,63	30693,42	Cima
7_2	3,35	62	359,98	647,90	22318,70	Cima
8_1	5,05	79	425,44	784,82	33610,13	Cima
8_2	3,03	71	284,60	726,66	20206,75	Cima
9_1	5,22	82	423,55	824,60	34731,35	Cima
9_2	3,24	69	312,63	833,11	21571,54	Cima

* Talhões com apenas um sentido possível de dimensionamento

Tabela 20. Resultados das linhas geradas no sentido para baixo para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Espaçamento Arbitrado.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)
10_1	4,82	60	535,23	836,26	32114,07
11_1	3,32	34	651,97	993,34	22166,84
12_1	4,28	104	274,90	842,85	28590,10
13_1	3,07	33	620,44	968,52	20474,37
14_1	4,83	68	473,51	1092,47	32198,51
15_1	2,63	26	676,06	838,16	17577,48
16_1	4,20	59	475,29	844,16	28042,07
17_1	2,46	32	511,84	724,31	16378,74
18_1	0,45	18	168,57	288,33	3034,29
19_1	0,79	25	211,24	614,26	5280,88
2_1	12,50	158	526,67	986,85	83213,76
20_1	0,38	50	51,42	122,70	2571,24
3_1	7,06	139	338,75	603,13	47086,32
3_2	6,84	102	447,24	634,94	45618,37
4_1	5,53	139	265,64	535,50	36923,43
4_2	7,45	115	432,34	713,02	49719,38
5_1	7,73	130	396,56	764,92	51552,79
5_2	4,72	154	204,26	591,88	31456,35
6_1	7,21	114	421,25	823,16	48022,60
6_2	4,98	152	218,32	771,30	33185,03
7_1	6,31	95	443,43	873,43	42125,81
7_2	4,64	127	243,87	914,08	30971,25
8_1	5,48	60	609,38	873,52	36562,54
9_1	3,65	63	386,65	1026,02	24359,23

Tabela 21. Resultados das linhas geradas no sentido para cima para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Espaçamento Arbitrado.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)
1_1	7,04	123	381,63	790,76	46940,79
10_1	4,82	100	321,49	780,35	32149,13
12_1	4,28	83	344,51	770,62	28594,70
13_1	3,07	51	401,52	911,48	20477,31
14_1	4,83	98	328,16	890,22	32159,62
15_1	2,63	28	627,35	815,27	17565,69
16_1	4,20	133	205,38	764,24	27315,91
17_1	2,46	54	303,34	697,07	16380,17
2_1	12,50	125	666,06	1098,66	83257,65
3_1	7,06	91	517,18	606,60	47063,16
3_2	6,84	88	518,40	659,87	45618,90
4_1	5,53	95	388,45	660,06	36902,36
4_2	7,45	110	451,93	754,39	49712,52
5_1	7,73	109	472,13	815,26	51462,67
5_2	4,72	89	352,88	792,24	31406,56
6_1	7,21	92	521,99	873,53	48022,85
6_2	4,98	85	390,10	936,25	33158,17
7_1	6,31	73	575,58	903,23	42017,38
7_2	4,64	67	462,32	1065,89	30975,42
8_1	5,48	64	571,72	846,17	36589,83
9_1	3,65	42	579,93	1002,95	24356,98

Tabela 22. Combinação dos melhores resultados das linhas geradas no sentido para cima e para baixo para os talhões dimensionados a partir dos terraços calculados pela metodologia Espaçamento Arbitrado.

Talhão	Área do Sub talhão (ha)	Quantidade de linhas	Comprimento médio (metros)	Comprimento máximo (metros)	Comprimento total (metros)	Sentido
1_1	7,04	123	381,63	790,76	46940,79	Cima*
10_1	4,82	60	535,23	836,26	32114,07	Baixo
11_1	3,32	34	651,97	993,34	22166,84	Cima
12_1	4,28	83	344,51	770,63	28594,70	Cima
13_1	3,07	33	620,44	968,52	20474,37	Baixo
14_1	4,83	68	473,51	1092,47	32198,51	Baixo
15_1	2,63	26	676,06	838,16	17577,48	Baixo
16_1	4,20	59	475,29	844,16	28042,07	Baixo
17_1	2,46	32	511,84	724,31	16378,74	Baixo
18_1	0,45	18	168,57	288,33	3034,29	Baixo*
19_1	0,79	25	211,24	614,26	5280,88	Baixo*
2_1	12,50	125	666,06	1098,66	83257,65	Cima
20_1	0,38	50	51,42	122,70	2571,24	Baixo*
3_1	7,06	91	517,18	606,60	47063,16	Cima
3_2	6,84	88	518,40	659,87	45618,90	Cima
4_1	5,53	95	388,45	660,06	36902,36	Baixo
4_2	7,45	110	451,93	754,39	49712,52	Cima
5_1	7,73	109	472,13	815,26	51462,67	Cima
5_2	4,72	89	352,88	792,24	31406,56	Cima
6_1	7,21	92	521,99	873,53	48022,85	Cima
6_2	4,98	85	390,10	936,25	33158,17	Cima
7_1	6,31	73	575,58	903,23	42017,38	Cima
7_2	4,64	67	462,32	1065,89	30975,42	Cima
8_1	5,48	60	609,38	873,52	36562,54	Baixo
9_1	3,65	42	579,93	1002,95	24356,98	Baixo

* Talhões com apenas um sentido possível de dimensionamento

Também foram gerados mapas de linhas de plantio, classificando-as de acordo com seu comprimento nas seguintes classes: abaixo de 50 metros, entre 100 e 350 metros, entre 350 e 700 metros e acima de 700 metros. Para os cenários com o espaçamento entre terraços dimensionados pela a USLE, pela USL+L, pela metodologia Lombardi Neto et al. e pela metodologia Espaçamento Arbitrado, foram obtidos mapas considerando os sentidos de geração de linhas de plantio (para cima ou para baixo) e os melhores resultados de cada cenário. Foi obtido apenas um mapa com as linhas de plantio dos talhões do cenário antigo, pois neste cenário a linha guia e o sentido de geração das linhas de plantio foi verificado em campo, não sendo possível sua modificação. No total foram obtidos 13 mapas, conforme

ilustram as Figuras

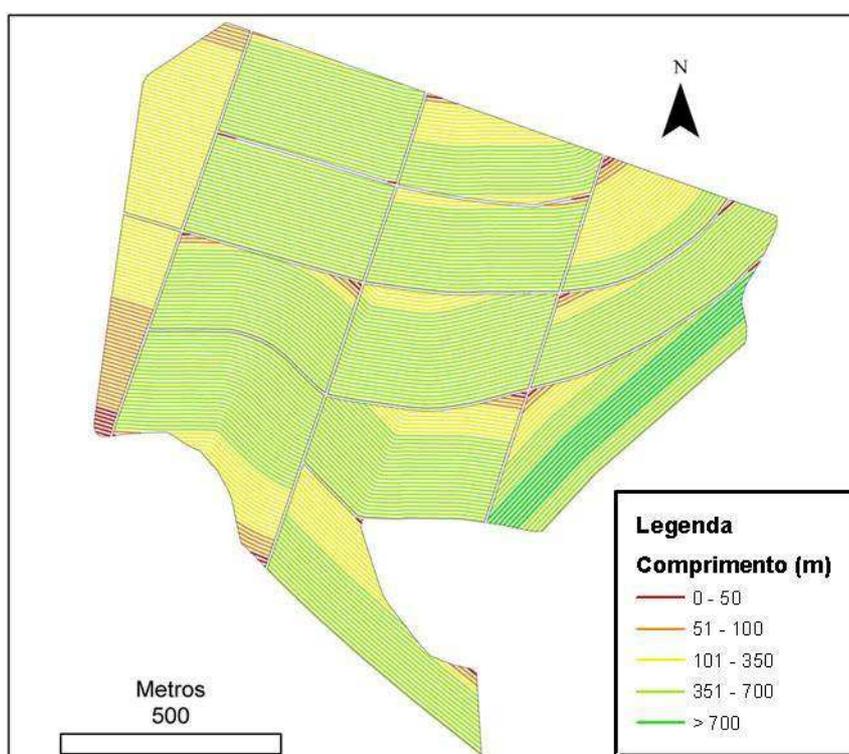


Figura 67 a Figura 79.

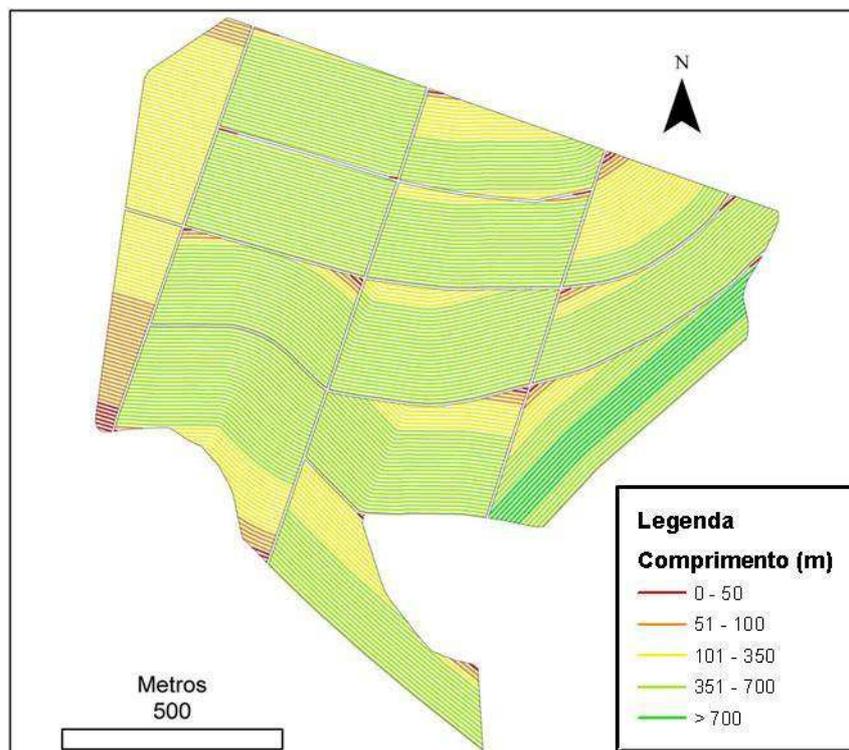


Figura 67. Mapa das linhas de plantio do cenário inicial.

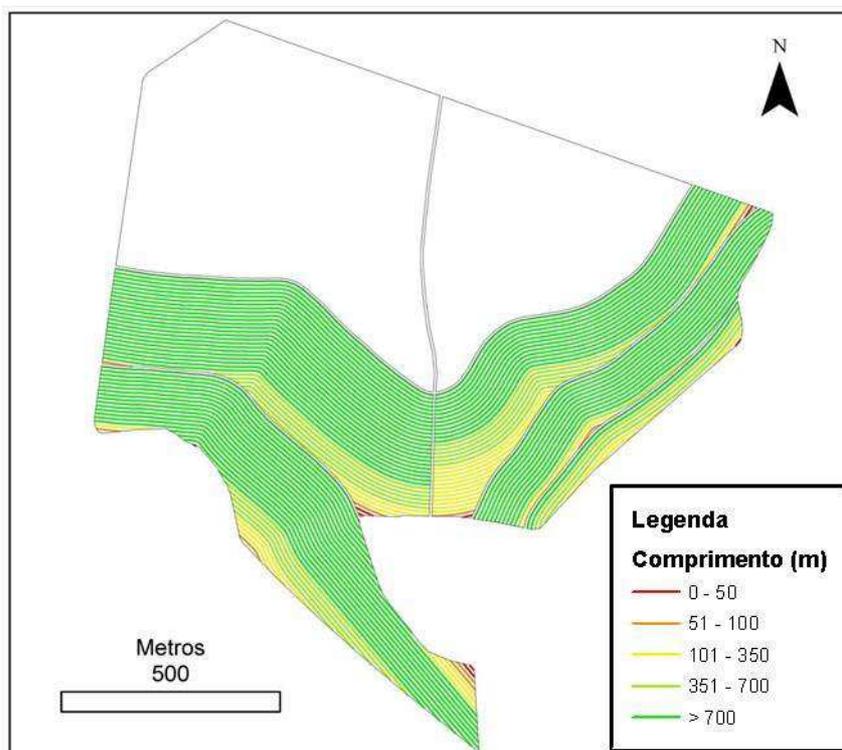


Figura 68. Mapa das linhas de plantio geradas para baixo, dos talhões obtidos com a USLE.

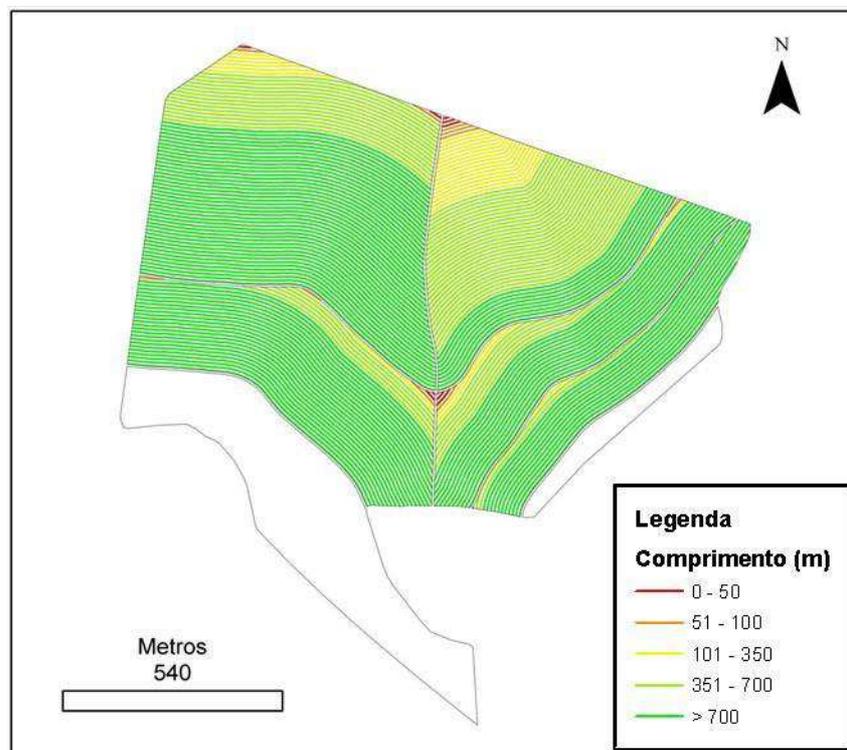


Figura 69. Mapa das linhas de plantio geradas para cima, dos talhões obtidos com a USLE.

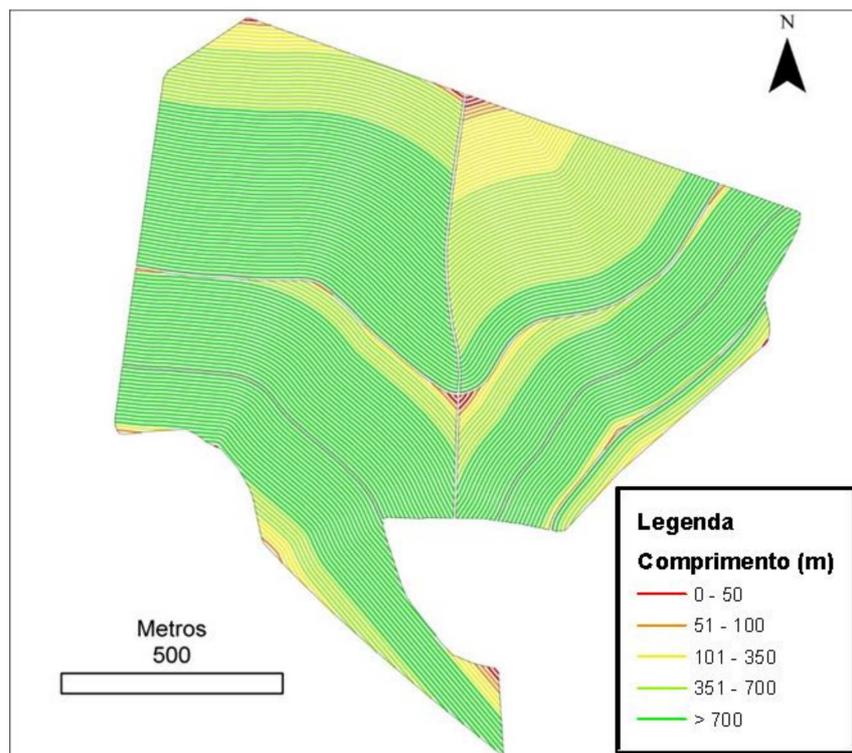


Figura 70. Mapa com a combinação dos melhores resultados das linhas de plantio geradas nos talhões obtidos com a USLE.

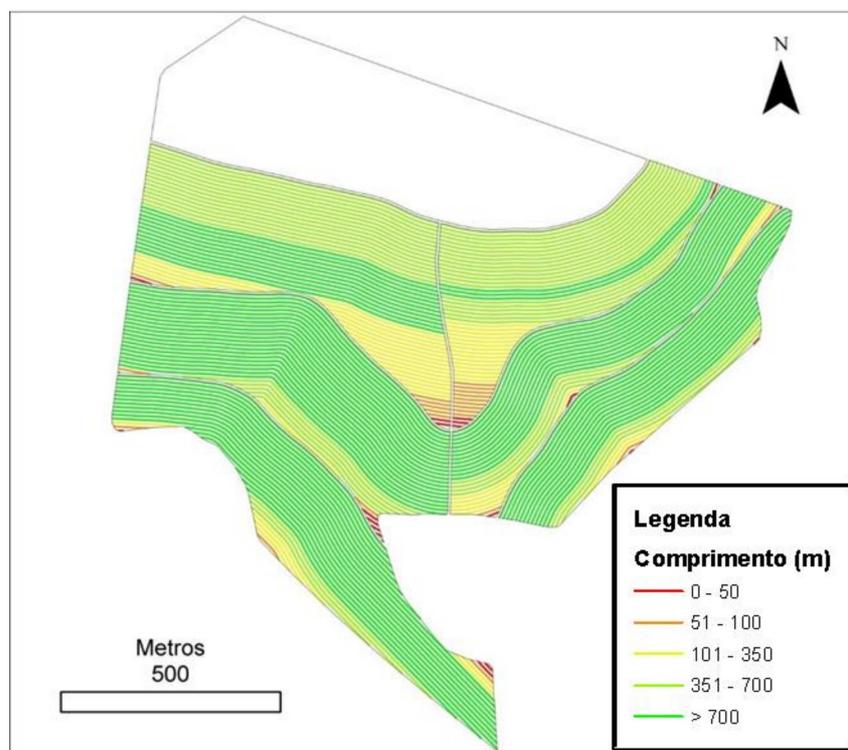


Figura 71. Mapa das linhas de plantio geradas para baixo, dos talhões obtidos considerando a USLE+L.

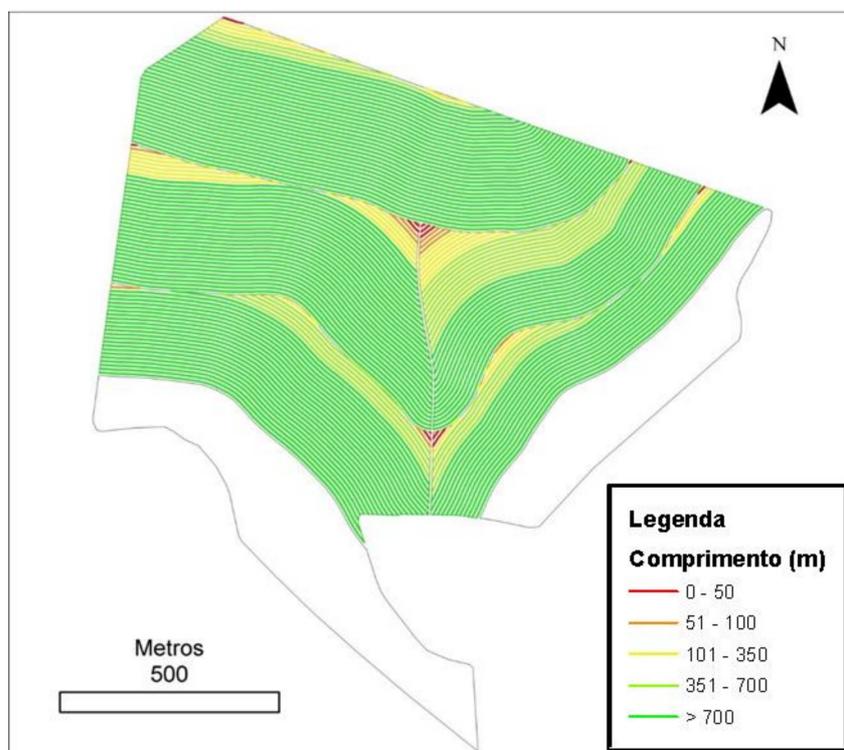


Figura 72. Mapa das linhas de plantio geradas para cima, dos talhões obtidos considerando a USLE+L.

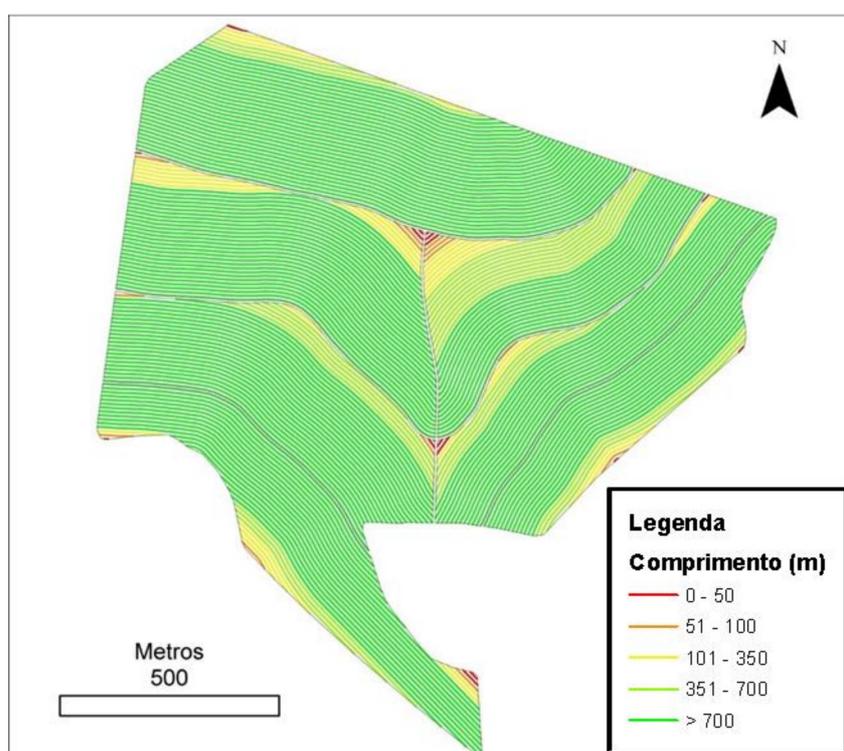


Figura 73. Mapa com a combinação dos melhores resultados das linhas de plantio geradas nos talhões obtidos considerando a USLE+L.

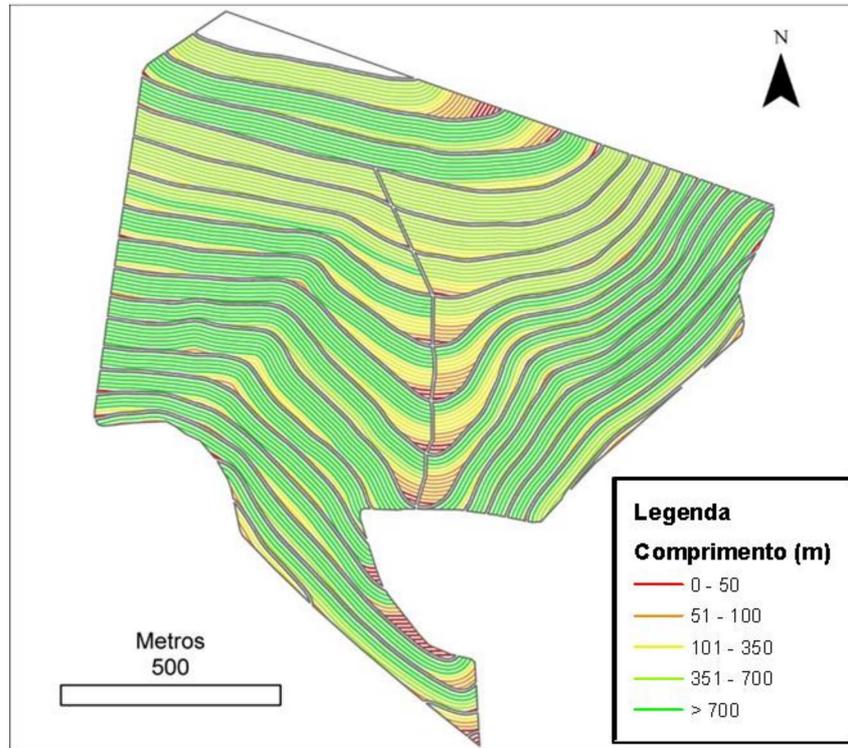


Figura 74. Mapa das linhas de plantio geradas para baixo, dos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al.

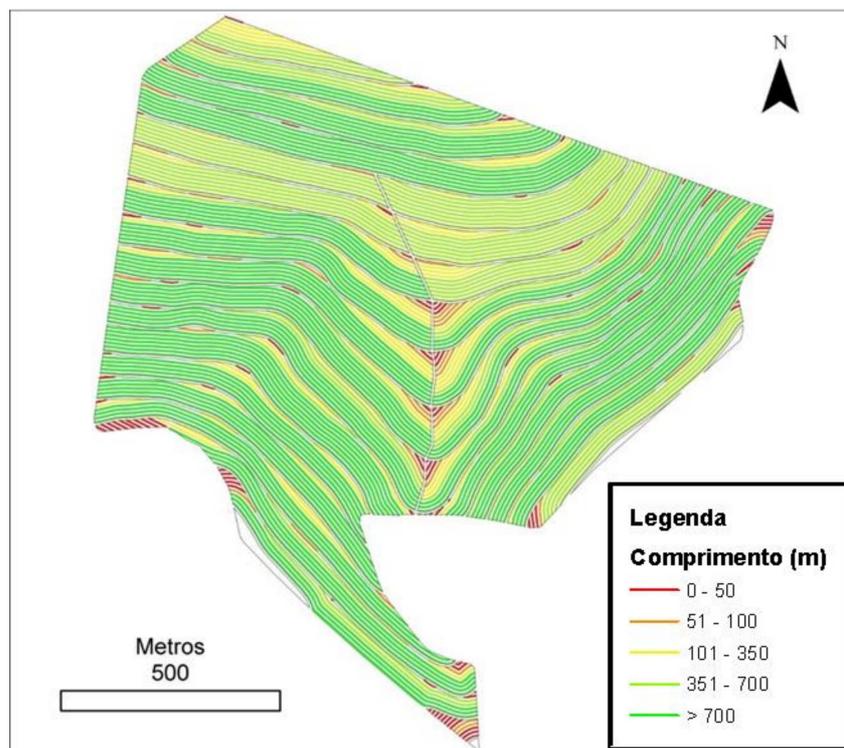


Figura 75. Mapa das linhas de plantio geradas para cima, dos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al.

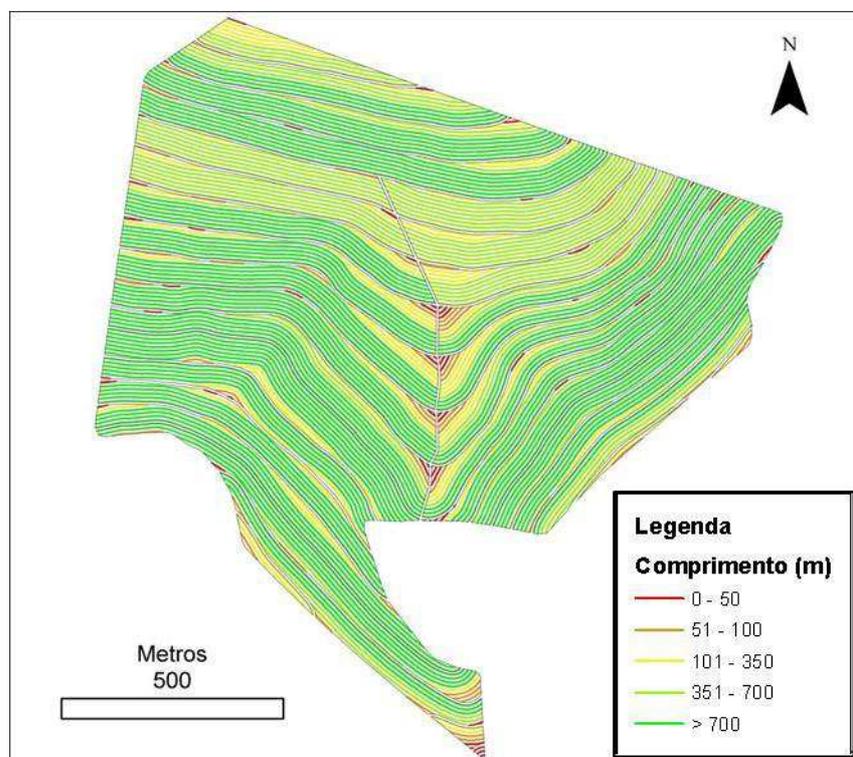


Figura 76. Mapa com a combinação dos melhores resultados das linhas de plantio geradas nos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al.

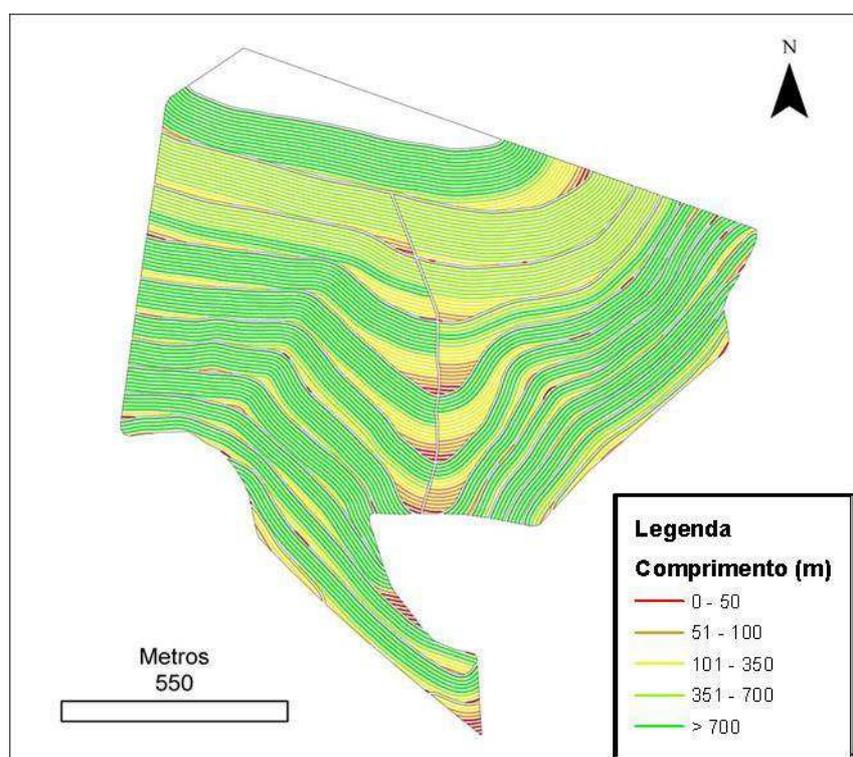


Figura 77. Mapa das linhas de plantio geradas para baixo, dos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Espaçamento arbitrado.

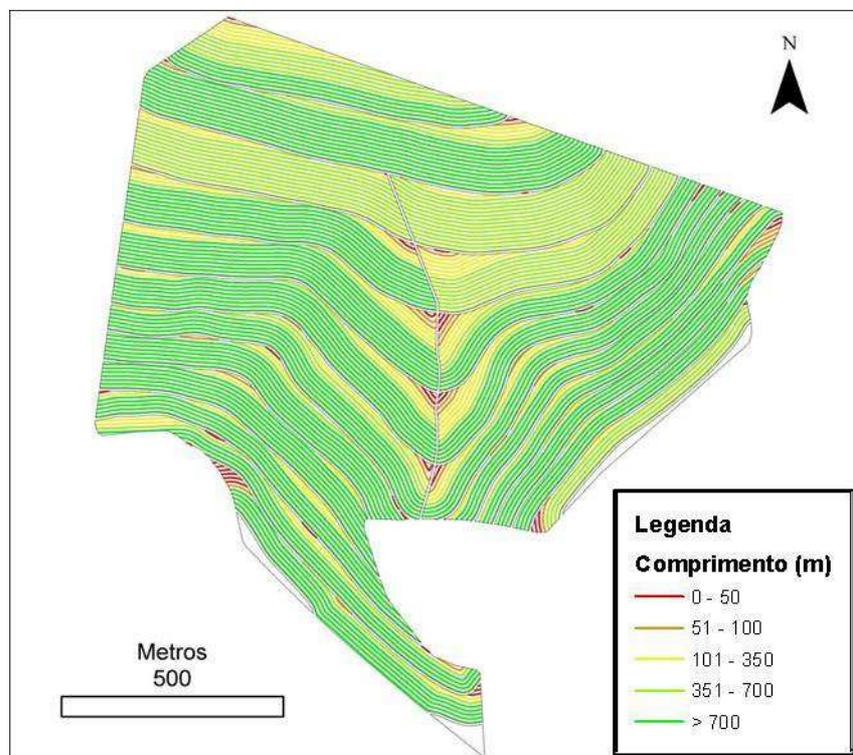


Figura 78. Mapa das linhas de plantio geradas para cima, dos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Espaçamento arbitrado.

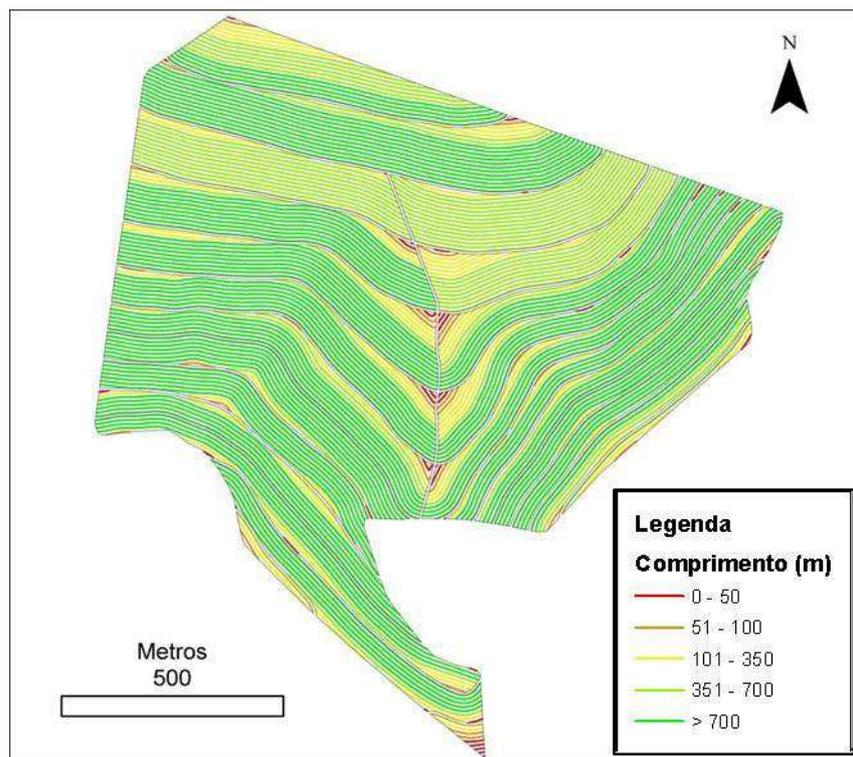


Figura 79. Mapa com a combinação dos melhores resultados das linhas de plantio geradas nos talhões obtidos com os terraços dimensionados pela metodologia Espaçamento arbitrado.

As linhas obtidas em um talhão em sentido para cima ou para baixo a partir da curva de nível de referência estão bastante sujeitas às variações do relevo, de modo que não se pode definir um sentido que sempre terá melhor resultado. Porém a comparação entre os sentidos de dimensionamento das linhas é muito importante uma vez que permite determinar para cada situação e condição de relevo, o sentido que possibilite menor número de linhas e maior comprimento total e médio de linhas para cada talhão.

Os dados de cada classe de comprimento de linha dos melhores dimensionamentos de cada cenário foram tabulados e o número de linhas de cada classe é apresentado na Tabela 23. Os percentuais de cada classe em relação ao total de cada cenário são apresentados na Tabela 24 e no gráfico da Figura 80. Verifica-se um grande contraste entre os cenários antigo e os cenários dimensionados, consequência do dimensionamento dos talhões em nível, priorizando o aumento do comprimento das linhas. Verificou-se que nos dimensionamentos baseados na USLE, e na USLE+L, as linhas com comprimento acima de 700 metros, limite recomendado por Benedini & Conde (2008) foi superior à 45%, enquanto no cenário inicial as linhas com este comprimento corresponderam a menos de 2%.

Embora as linhas dos dimensionamentos baseados na metodologia Lombardi e espaçamento arbitrado tenham apresentado valores consideráveis de linhas com comprimento acima de 700 metros, estes dimensionamentos também apresentaram índices expressivos de linhas com comprimento abaixo de 50 metros, correspondendo 17% e 13,7% das linhas destes dimensionamentos, respectivamente. Segundo Spekken et al. (2015) a produção de cana nas linhas com comprimento abaixo de 62 metros não cobre o custo da manobra, e a redução de custos de manobra de até 9,38 US\$ ha⁻¹ para áreas com comprimento de sulcos variando de 700 a 1000 metros, destacando a redução de custos para as linhas dimensionadas com a metodologia USLE e USLE+L.

Tabela 23. Quantidade de linhas de plantio dos melhores resultados de cada dimensionamento, para cada classe de comprimento.

Cenário	Quantidade de linhas para cada classe de comprimento (Metros)				
	0-50	51-100	101-350	351-700	>700
Cenário inicial	184	342	918	1332	52
USLE	98	84	225	382	705
USLE+L	101	83	196	176	813
Lombardi Neto et al.	329	235	380	355	561
Espaçamento Arbitrado	242	196	362	372	595

Tabela 24. Percentual de linhas de plantio dos melhores resultados de cada dimensionamento, para cada classe de comprimento.

Cenário	% de linhas para cada classe de comprimento (Metros)				
	0-50	51-100	101-350	351-700	>700
Cenário inicial	6,5	12,1	32,5	47,1	1,8
USLE	6,6	5,6	15,1	25,6	47,2
USLE+L	7,4	6,1	14,3	12,9	59,4
Lombardi Neto et al.	17,7	12,6	20,4	19,1	30,2
Espaçamento Arbitrado	13,7	11,1	20,5	21,1	33,7

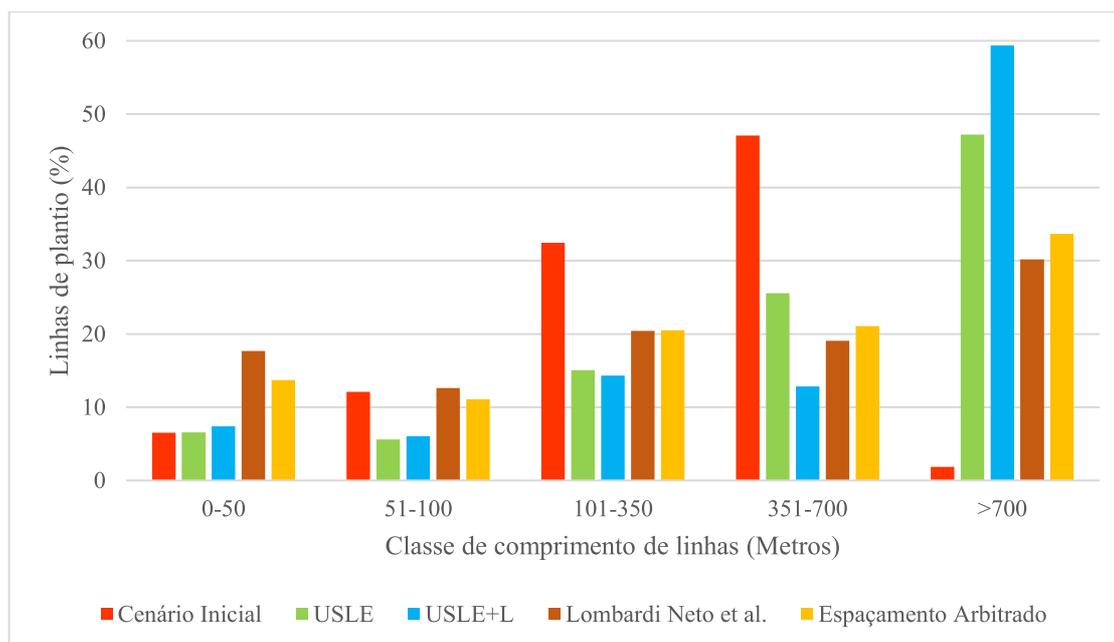


Figura 80. Percentual de linhas de plantio dos melhores resultados de cada dimensionamento, para cada classe de comprimento.

A Tabela 25 permite visualizar a totalização dos melhores dimensionamentos de linha para cada cenário, comparando-os com o número total de linhas, comprimento médio e comprimento total, além de uma comparação relativa, adotando os valores do cenário antigo como 100%. Verificou-se que todos os dimensionamentos apresentaram grande redução do número de linhas em relação ao cenário antigo, com destaque para o dimensionamento considerando a perda de solo calculada pela USLE+L, que obteve redução de número de linhas, e conseqüentemente de número de manobras superior à 50%. As linhas obtidas a partir dos talhões dimensionados apenas com a perda de solo calculada pela USLE também obteve bons resultados, com 47.18% de redução no número de linhas.

Tabela 25. Comparação da totalização quantitativa e relativa entre os melhores resultados dos dimensionamentos de linha de cada cenário e do cenário antigo.

Cenário	Número de linhas		Comp. médio		Comp. total	
	Un.	%	Metros	%	Quilômetros	%
Cenário Inicial	2828	100,00	303,867	100,00	859,337	100,00
USLE	1494	52,82	582,846	191,80	870,772	101,33
USLE + L	1369	48,40	635,139	209,01	869,506	101,18
Lombardi Neto et al.	1860	65,77	426,972	140,51	794,167	92,41
Espaçamento Arbitrado	1767	62,48	461,75	151,95	815,913	94,94

O comprimento médio das linhas, as linhas do cenário com os terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto e pela metodologia de Espaçamento arbitrado apresentaram aumento de 40,51% e 51,95% respectivamente, se comparado ao comprimento médio das linhas existentes anteriormente na área de estudo, e as linhas dos dimensionamentos pela USLE e USLE+L obtiveram 91,80% e 109,80% de aumento no comprimento médio, respectivamente.

Benedini & Conde (2008) realizaram a sistematização de áreas de cana de açúcar, conseguindo reduzir para 30,5% o número de linhas de plantio, e obtendo comprimento médio de 808,9 metros, frente aos 248 metros de comprimento médio de linha de plantio da situação inicial da área de estudo do referido trabalho, ou seja, um aumento para 326,16% no comprimento médio das linhas de plantio. Vale observar que os autores realizaram a implantação considerando um sistema de plantio direto, e realizaram a eliminação de alguns terraços na área agrícola, sem especificar qual a metodologia de dimensionamento de terraços foi utilizada.

A metodologia proposta conseguiu reduzir em até 51,6% o número de manobras, no caso do dimensionamento pela USLE+L, se comparado com o cenário inicial, correspondendo a uma redução de 1459 manobras em uma área de 133,7 ha. Utilizando o valor do custo de manobra obtido por Spekken et al. (2015), com valor de 1,61 US\$ para cada manobra da operação de colheita, a adoção da metodologia proposta possibilitou redução total de 2348,99 US\$ por operação de colheita, ou 11744,95 US\$ considerando os 5 cortes da cultura da cana de açúcar. Convertendo o valor para unidade de área, a adoção da metodologia proposta possibilitou redução no custo de produção de 17,56 US\$ ha⁻¹ ao ano, ou US\$ 87,84 US\$ ha⁻¹ considerando os 5 cortes da cultura da cana de açúcar, observando apenas a operação de colheita.

O comprimento total das linhas sofre influência direta de dois fatores: a área total dos carregadores do cenário, e o número de linhas. Como nos dimensionamentos Lombardi Neto et al. e Espaçamento Arbitrado houve aumento de 375% e 271% na área dos carregadores, em relação ao dimensionamento pela USLE, respectivamente. A área total plantada foi reduzida e conseqüentemente o comprimento total de linhas, chegando a 8,79% de redução no comprimento total de linhas para o cenário gerado pela metodologia Lombardi Neto et al., em relação ao dimensionamento pela USLE. Além disso os carregadores em desnível foram dispostos de forma a reduzir o número de linhas sem aumentar

excessivamente seu comprimento, possibilitando aumento até 1,33% no comprimento total das linhas se comparado ao cenário inicial.

A metodologia proposta, possibilitou redução do número de terraços, redução na área de carregadores, aumento da área média dos talhões, e aumento com comprimento médio e total das linhas de plantio, se comparada aos resultados encontrados tanto no cenário inicial, quanto aos obtidos com os dimensionamentos baseados nas metodologias tradicionais como Lombardi Neto et al. e Espaçamento Arbitrado. A segurança da redução no número de terraços é baseada no fato de que a perda de solo admitida pela metodologia será sempre inferior ao limite de perda do solo da área, possibilitando o controle dos efeitos do processo erosivo. Entretanto este método trabalha no limite de segurança quanto à ocorrência de erosão, assim a confiabilidade dos dados utilizados é de extrema importância, e a negligência por parte do usuário quanto à qualidade e confiabilidade dos dados utilizados é extremamente perigosa.

4.4. VOLUME ACUMULADO NAS LINHAS DE PLANTIO

Os terraços, talhões e linhas de plantio utilizados para avaliação do volume de escoamento superficial armazenado pelas linhas de plantio foram os dimensionados considerando a USLE e os dimensionados considerando a USL+L. Nas Figuras Figura 81 e Figura 82 é possível visualizar a localização dos terraços de cada cenário. Cada cenário obteve apenas 3 terraços, e os talhões inferiores de cada área não necessitaram de terraços, por atingirem valores inferiores aos limites de perda de solo. Entretanto, nestes talhões também foi calculado o volume de escoamento superficial armazenado pelas linhas de plantio em diferentes profundidades de sulco, geradas apenas em sentido para baixo uma vez que nos últimos talhões não existe linha guia na parte de baixo.

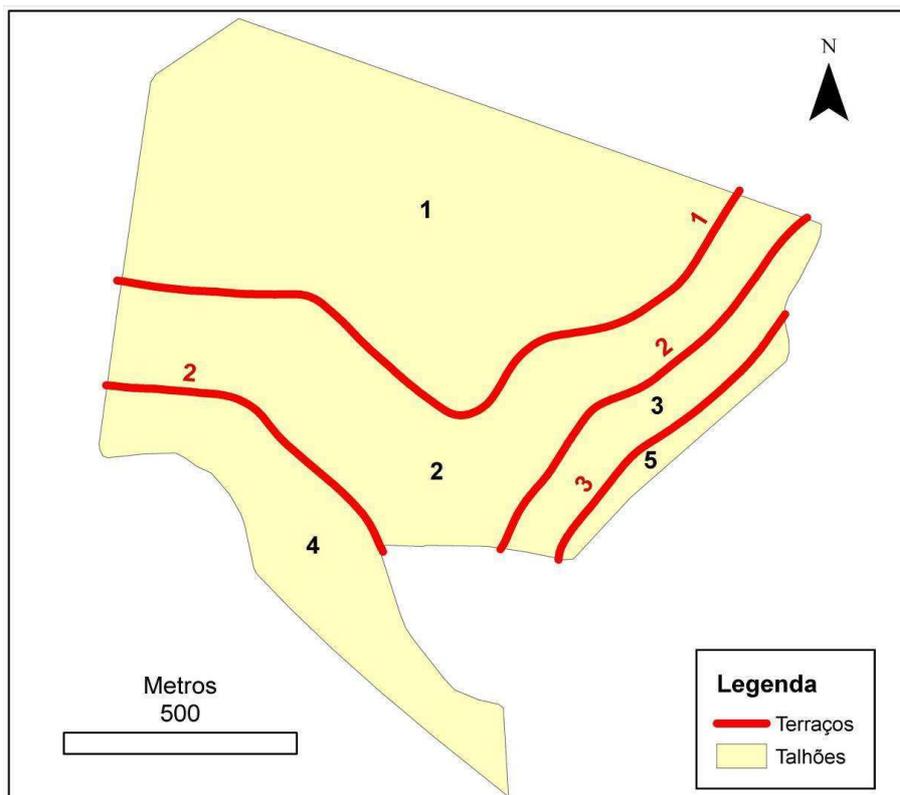


Figura 81. Localização dos terraços e talhões em nível dimensionados considerando a USLE.

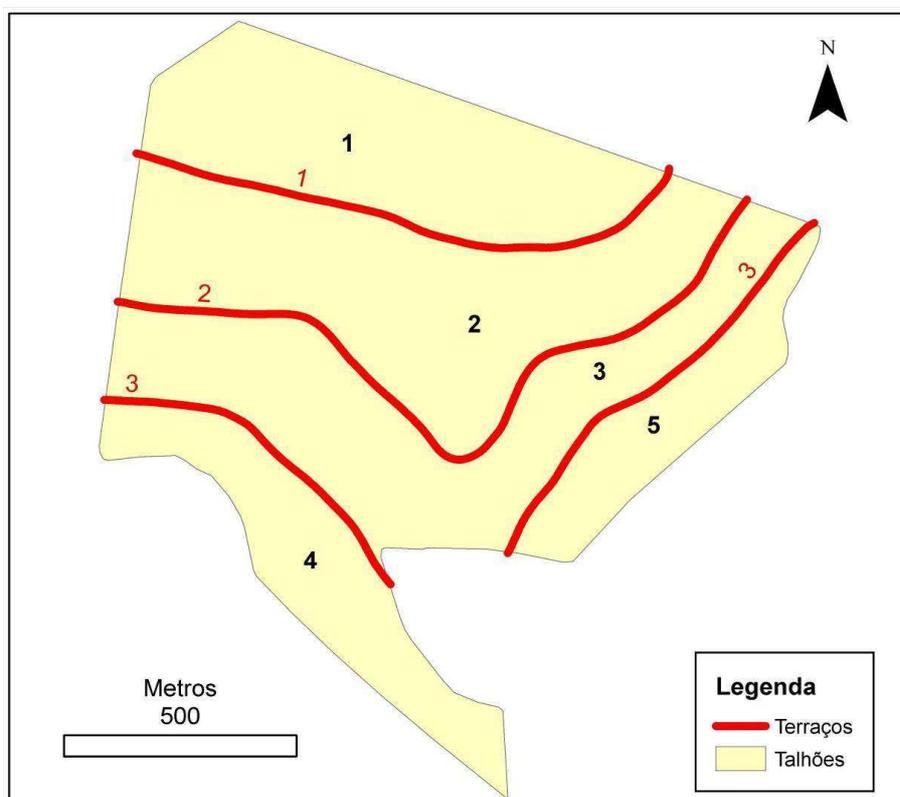


Figura 82. Localização dos terraços e talhões em nível dimensionados considerando a USLE+L

A título de ilustração é possível verificar na Figura 83, as diferentes regiões de volume acumulado nas linhas de plantio do talhão 2 gerado pela USLE, com sentido de geração de linhas para baixo, e 30 centímetros de profundidade de sulco. Pode-se observar que devido à variabilidade espacial do relevo, o acúmulo não é uniforme ao longo da linha de plantio, mesmo esta sendo gerada como linha paralela à linha de um terraço em nível. À medida em que a linha de plantio se afasta do terraço que a originou, perde-se gradativamente o nivelamento da linha, e acentua-se a redistribuição do acúmulo de escoamento superficial ao longo da linha de plantio. Para visualização dos diferentes acúmulos nas linhas de plantio em diferentes profundidades de sulco, na Figura 84 pode-se observar os perfis de uma região com grande acúmulo de escoamento superficial, para as profundidades de 0,00, 0,10, 0,20 e 0,30 metro.

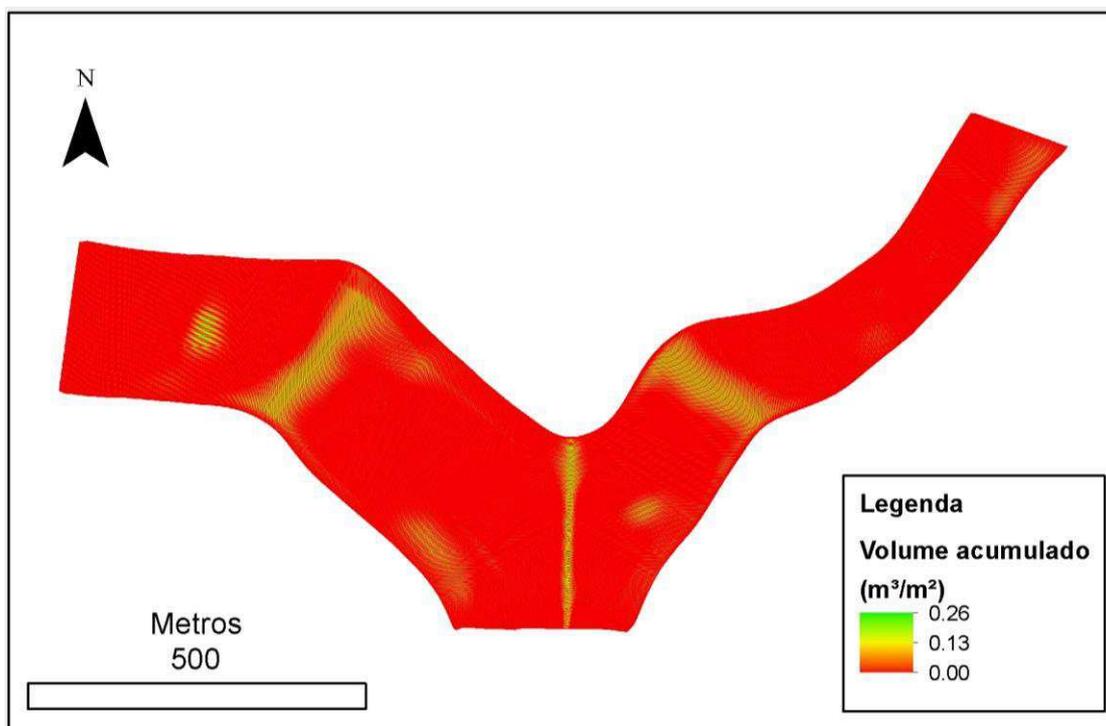


Figura 83. Mapa com os valores de volume acumulado na linha de plantio considerando o talhão 2 dimensionado pela USLE, com sentido de geração das linhas para baixo e profundidade de sulco de 0,30 m.

O volume acumulado nas linhas de plantio foi calculado para cada combinação de cenário e sentido de geração de linhas, sendo realizado o cálculo para as profundidades de sulco de 0,00, 0,10, 0,20 e 0,30 metro. As Tabelas Tabela 26 a Tabela 29 permitem visualizar os valores de volume acumulado nas linhas de plantio de cada talhão, para cada

profundidade. Verificou-se que houve uma pequena variação no volume acumulado em função do sentido de geração da linha de plantio, entretanto o volume acumulado em função da profundidade de sulco teve grande variação.

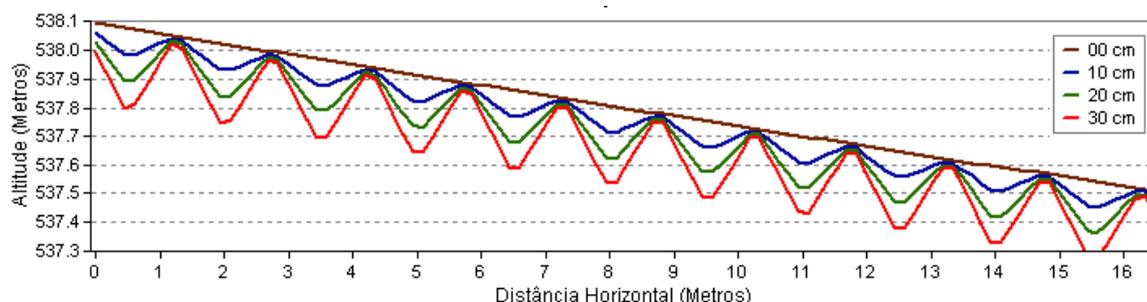


Figura 84. Representação dos perfis das linhas de plantio em diferentes profundidades de sulco.

Tabela 26. Volume acumulado (m^3) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados pela USLE, com linhas geradas para baixo, em diferentes profundidades de sulco.

Talhão	Área do talhão (ha)	Profundidade de sulco (metro)			
		0,0	0,1	0,2	0,3
1	62,996	0	746	1844	3066
2	37,211	1	582	1867	3208
3	10,0681	0	157	598	953
4	19,8649	0	246	1046	1936
5	3,5733	0	67	258	393

Tabela 27. Volume acumulado (m^3) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados pela USLE, com linhas geradas para cima, em diferentes profundidades de sulco.

Talhão	Área do talhão (ha)	Profundidade de sulco (metro)			
		0,0	0,1	0,2	0,3
1	62,996	0	746	1844	3066
2	37,211	1	708	2077	3403
3	10,0681	0	109	396	801
4	19,8649	0	246	1046	1936
5	3,5733	0	67	258	393

Tabela 28. Volume acumulado (m^3) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados considerando a USLE+L, com linhas geradas para baixo, em diferentes profundidades de sulco.

Talhão	Área do talhão (ha)	Profundidade de sulco (metro)			
		0,0	0,1	0,2	0,3
1	29,9976	0	1244	3185	4742
2	39,2316	0	659	1952	3050
3	34,4805	1	658	1945	3730
4	17,4807	1	235	912	1681
5	12,1618	0	174	726	1211

Tabela 29. Volume acumulado (m^3) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados considerando a USLE+L, com linhas geradas para cima, em diferentes profundidades de sulco.

Talhão	Área do talhão (ha)	Profundidade de sulco (metro)			
		0,0	0,1	0,2	0,3
1	29,9976	0	1244	3185	4742
2	39,2316	0	673	1642	2597
3	34,4805	1	699	2379	3854
4	17,4807	1	235	912	1681
5	12,1618	0	174	726	1211

Não foi possível observar um padrão de volume acumulado por hectare, devido à variação de declividade entre os talhões e à variabilidade espacial do relevo dentro do talhão. Nas Tabelas **Tabela 30** a **Tabela 33**, são apresentados os valores de volume acumulado por hectare nas linhas de plantio cada talhão, para cada profundidade de sulco. Na profundidade de 0,1m os valores ficaram entre 11,8 e 41,4 $m^3 ha^{-1}$, com média de 18,7 $m^3 ha^{-1}$ a 0,2m de profundidade de sulco os valores variaram entre 29,3 e 106,2 $m^3 ha^{-1}$, com média de 58,1 $m^3 ha^{-1}$, e na profundidade de 0,3m variaram entre 48,7 e 158,1 $m^3 ha^{-1}$, com média de 95,8 $m^3 ha^{-1}$.

Tabela 30. Volume acumulado por hectare ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados pela USLE, com linhas geradas para baixo, em diferentes profundidades de sulco.

Talhão	Área do talhão (ha)	Profundidade de sulco (metro)		
		0,1	0,2	0,3
1	62,996	11,8	29,3	48,7
2	37,211	15,7	50,2	86,2
3	10,0681	15,6	59,4	94,6
4	19,8649	12,4	52,7	97,5
5	3,5733	18,7	72,1	109,9

Tabela 31. Volume acumulado por hectare ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados pela USLE, com linhas geradas para cima, em diferentes profundidades de sulco.

Talhão	Área do talhão (ha)	Profundidade de sulco (metro)		
		0,1	0,2	0,3
1	62,996	11,8	29,3	48,7
2	37,211	19,0	55,8	91,5
3	10,0681	10,8	39,3	79,6
4	19,8649	12,4	52,7	97,5
5	3,5733	18,7	72,1	109,9

Tabela 32. Volume acumulado por hectare ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados considerando a USLE+L, com linhas geradas para baixo, em diferentes profundidades de sulco.

Talhão	Área do talhão (ha)	Profundidade de sulco (metro)		
		0,1	0,2	0,3
1	29,9976	41,5	106,2	158,1
2	39,2316	16,8	49,7	77,7
3	34,4805	19,1	56,4	108,2
4	17,4807	13,4	52,2	96,2
5	12,1618	14,3	59,7	99,6

Tabela 33. Volume acumulado por hectare ($m^3 \cdot ha^{-1}$) nas linhas de plantio dos talhões dimensionados considerando a USLE+L, com linhas geradas para cima, em diferentes profundidades de sulco.

Talhão	Área do talhão (ha)	Profundidade de sulco (metro)		
		0,1	0,2	0,3
1	29,9976	41,5	106,2	158,1
2	39,2316	17,1	41,8	66,2
3	34,4805	20,3	69,0	111,8
4	17,4807	13,4	52,2	96,2
5	12,1618	14,3	59,7	99,6

Após a geração das linhas de plantio e obtenção dos valores de volume de escoamento superficial armazenado pelas linhas, obteve-se o valor da altura dos terraços, conforme pode ser visualizado nas Tabelas Tabela 34 a Tabela 37. Em algumas situações o aumento da profundidade do sulco reduziu em até 0,1 metros na altura recomendada dos terraços.

Tabela 34. Altura dos terraços (metros) dimensionados pela USLE, considerando o armazenamento das linhas geradas para baixo, nas diferentes profundidades de sulco.

Terraço	Profundidade de sulco (metro)			
	0,0	0,1	0,2	0,3
1	0,814	0,803	0,787	0,769
2	0,777	0,764	0,733	0,699
3	0,758	0,745	0,707	0,674

Tabela 35. Altura dos terraços (metros) dimensionados pela USLE, considerando o armazenamento das linhas geradas para cima, nas diferentes profundidades de sulco.

Terraço	Profundidade de sulco (metro)			
	0,0	0,1	0,2	0,3
1	0,814	0,803	0,787	0,769
2	0,770	0,761	0,728	0,694
3	0,758	0,749	0,725	0,688

Tabela 36. Altura dos terraços (metros) dimensionados pela USLE+L, considerando o armazenamento das linhas geradas para baixo, nas diferentes profundidades de sulco.

Terraço	Profundidade de sulco (metro)			
	0,0	0,1	0,2	0,3
1	0,596	0,568	0,522	0,481
2	0,671	0,658	0,633	0,610
3	0,759	0,743	0,711	0,662

Tabela 37. Altura dos terraços (metros) dimensionados pela USLE+L, considerando o armazenamento das linhas geradas para cima, nas diferentes profundidades de sulco.

Terraço	Profundidade de sulco (metro)			
	0,0	0,1	0,2	0,3
1	0,596	0,568	0,522	0,481
2	0,671	0,658	0,639	0,620
3	0,759	0,742	0,699	0,659

A redução média da altura do terraço, entre o sulco com 0,0m de profundidade e 0,3m de profundidade foi de 0,09 metros para os terraços dimensionados considerando a USLE+L, e 0,066 metros para os terraços dimensionados pela USLE. Na Figura 85 visualiza-se o gráfico com a variação de altura dos terraços dimensionados pela USLE em função das diferentes profundidades de sulco, e na Figura 86 é possível verificar o gráfico com a variação de altura dos terraços dimensionados considerando a USLE+L, em função das diferentes profundidades de sulco.

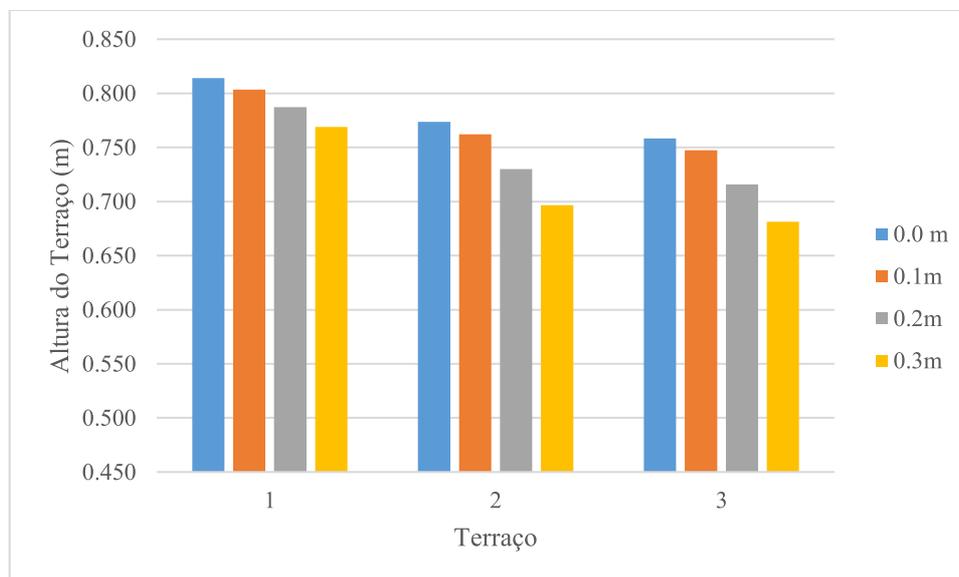


Figura 85. Variação de altura dos terraços dimensionados pela USLE em função das diferentes profundidades de sulco.

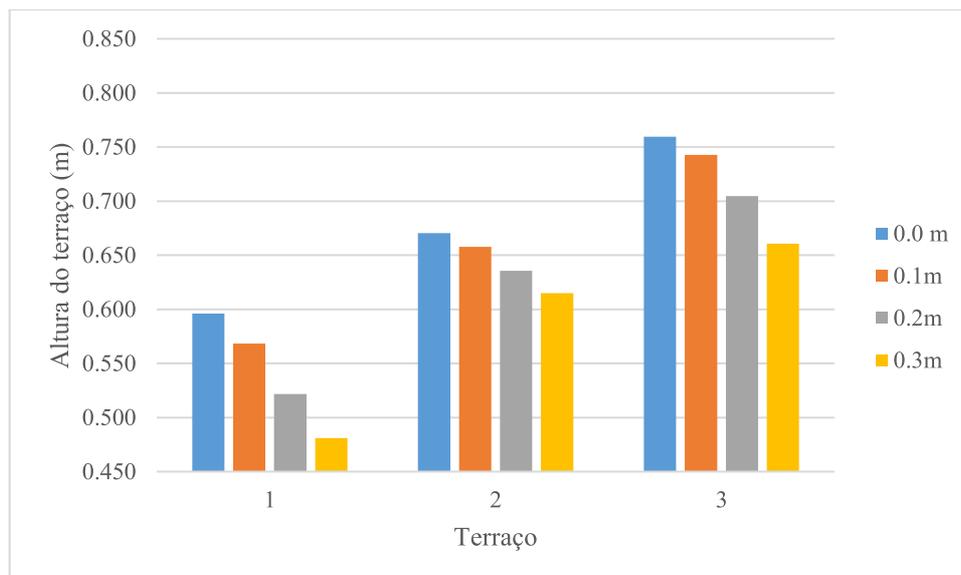


Figura 86. Variação de altura dos terraços dimensionados considerando USLE+L, em função das diferentes profundidades de sulco.

Diante do exposto, mudanças nas práticas agrícolas podem influenciar no acúmulo do escoamento superficial ao longo das linhas de plantio, interferindo nos parâmetros de dimensionamento de terraços. A alteração da rugosidade superficial também influencia os parâmetros dos modelos de estimativa de perda de solo, e os parâmetros hidráulicos do escoamento superficial, reduzindo sua energia, e interferindo nos componentes do processo erosivo. A modelagem espacial do micro relevo e suas alterações decorrentes do planejamento de linhas de plantio possibilita novos estudos, bem como a aplicação das geotecnologias no que se refere à gestão agroambiental de áreas agrícolas.

5. CONCLUSÕES

Os dados coletados nas velocidades de 2,02, 3,89 e 6,54 m s⁻¹ atenderam ao padrão de exatidão cartográfico atingindo a classe A para elaboração de produtos cartográficos com equidistância vertical de 0,30m em todas as declividades e sentidos. Em todas as situações estudadas, o desvio padrão das diferenças verticais manteve-se abaixo de 0,07 metros, e com mais de 90% dos dados com diferença vertical abaixo de 0,10 metros. Considerando as diferentes velocidades, a menor amplitude de diferenças verticais foi observada na velocidade de 2,02, m s⁻¹, com valor de 0,28 metros, e a maior amplitude foi observada na velocidade de 6,54 m.s⁻¹, com valor de 0,9321.

A ferramenta computacional desenvolvida mostrou-se de utilização amigável, e realizou com sucesso o dimensionamento dos talhões, linhas de plantio e terraços. Espera-se que futuros trabalhos com a implantação dos sistemas dimensionados possibilitem a avaliação quanto à perda de solo real, e avaliação em campo da metodologia proposta.

Verificou-se que o modelo de dimensionamento de áreas agrícolas possibilitou redução de até 51,6 % no número de manobras, se comparado à situação inicial da área agrícola, bem como aumento do comprimento médio das linhas em até 109,80% e redução da área destinada ao uso de carregadores em até 77,81%. A redução do número de manobras possibilita uma economia anual de até 17,56 US\$ ha⁻¹ considerando apenas os custos de manobra da operação de colheita, utilizando como referência os valores de custo de manobra obtidos por Spekken et al. (2015). O método de cálculo de espaçamento entre terraços reduziu em até 83,0% o comprimento total dos terraços dimensionados, se comparado com os terraços dimensionados pela metodologia Lombardi Neto et al. (1994).

A avaliação do acúmulo do volume de escoamento superficial nas linhas de plantio em função da profundidade de sulco verificou capacidade de armazenamento de até 158,1 m³ ha⁻¹, com média de 95,8 m³ ha⁻¹ para sulcos com 0,3 m de profundidade, ocasionando em uma redução de até 10,1 m na altura dos terraços.

6. REFERENCIAS

A.B.N.T., A. B. D. N. T. **NBR 13.133 - Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

A.B.N.T., A. B. D. N. T. **NBR 14.166 -Rede de Referência Cadastral**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ALBERTS, E. E.; NEARING, M. M. A.; WELTZ, L.; RISSE, M.; PIERSON, F. B. Soil component. In: FLANAGAN, D. C. (Ed.). **Water Erosion Prediction Project (WEPP) - Technical Documentation**. West Lafayette: USDA/NSEAL, 1995.

ALMEIDA, R. T. S. **Comparação entre bases de dados para mapeamento e modelagem em bacias hidrográficas**. 2015. 99 f. Mestre em Agronomia - Solo e Água—Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

AMORIM, R. S. S. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras**. 2004. 143 f. Doutorado em Engenharia Agrícola—Programa de pós graduação em engenharia agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas. In: PRUSKI, F. F. (Ed.). **Conservação de solo e água**. Viçosa: Editora UFV, 2009.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. D. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1046-1049, 2010.

APARECIDO, C. F. F.; BRANDÃO, L. M. Estudo de locação de terraço em nível usando equipamentos topográficos e elaboração de mapas na cultura da cana-de-açúcar. **Organizações e Sociedade**, v. 4, n. 2, p. 5-17, 2015.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>>.

ARRAES, C. L.; PAES BUENO, C. R.; TARLE PISSARRA, T. C. ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE DO SOLO PARA FINS CONSERVACIONISTAS NA MICROBACIA CÓRREGO DO TIJUCO, SP. **Bioscience Journal**, v. 26, p. 849-857 ST - SOIL

ERODIBILITY ESTIMATION FOR CONV, 2010. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000285687300003>.

ARUN, P. V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 16, n. 2, p. 133-139, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982313000276>>.

AUGUSTO, I.; MAGALHÃES, L.; VINICIUS, C.; NERY, M.; ZANETTI, S. S.; ROSA, A. Uso de geotecnologias para estimativa de perda solo e identificação das áreas susceptíveis a erosão laminar na sub-bacia hidrográfica do rio Vieira, município de Montes Claros, MG. **Cadernos de Geociências**, v. 9, n. 2, p. 74-84, 2012.

BAPTISTA, G. M. M.; EID, N. J. Análise de quatro métodos indiretos de determinação da erodibilidade (Fator da USLE) dos grandes grupos de solos do Distrito Federal. **Sociedade & Natureza**, v. 12, n. 24, p. 63-70, 2000.

BARROSO, D. G.; SILVA, M. L. N. Poluição e conservação dos recursos naturais: solo e água. **Informe Agropecuário**, v. 176, n. 16, p. 17-24, 1992.

BENEDINI, M. S.; CONDE, A. J. Sistematização de área para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Revista Coplana**, p. 23-25, 2008.

BERTOL, I. **Comprimento crítico de declive em sistemas de preparos conservacionistas de solo**. 1995. 185 f. Doutorado em Agronomia)–Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, n. 2, p. 657-668, 2000.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; CASSOL, E. A. Distância entre terraços utilizando o comprimento crítico de rampa em dois preparos conservacionistas de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, n. 1, p. 417-425, 2000.

BERTONI, J. O espaçamento de terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão. **Bragantia**, v. 18, n. 1, p. 113-140, 1959.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7 ed. São Paulo: Ícone, 2010a.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Equação de perdas de solo. In: BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (Ed.). **Conservação do Solo**. 7 ed. São Paulo: Ícone, 2010b.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grand River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009.

BODANSKY, E.; GRIBOV, A.; PILOUK, M. Smoothing and Compression of Lines Obtained by Raster-to-Vector Conversion. In: BLOSTEIN, D.; KWON, Y.-B. (Ed.). **Graphics Recognition Algorithms and Applications: 4th International Workshop, GREC 2001 Kingston, Ontario, Canada, September 7–8, 2001 Selected Papers**. Berlin,

Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-45868-9_22>. p. 256-265.

BRASIL. **Normas Técnicas da Cartografia Nacional (Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984)**, Diário Oficial da União, 1984.

BURROUGH, P. A.; MCDONELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998.

BUSNELLO, F. J.; CONTE, P. R. Levantamento topográfico planialtimétrico com diferentes métodos de levantamento de dados a campo. **Revista Científica Tecnológica**, v. 3, n. 2, p. 196-205, 2015.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: FINATEC, 2006, 464 p.

CARMO, E. J. D.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R. D. AVALIAÇÃO DOS INTERPOLADORES KRIGAGEM E TOPO TO RASTER PARA GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO A PARTIR DE UM "AS BUILT". **Boletim de Ciências Geodesicas**, v. 21, p. 674-690, 2015.

CARVALHO, F. T. D.; MORETTI, T. B. Manejo de plantas daninhas em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) cultivada com a operação de quebra-lombo visando à colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2010.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CASTRO, O. M. Preparo do solo para sulturas anuais. In: RAIJ, B. E. A. (Ed.). **Manual técnico de manejo e conservação do solo e água**: Manual Técnico, 40. Campinas: Coordenadoria de assistência técnica Integral, v. 3, 1993.

CECÍLIO, R. A.; RODRIGUEZ, R. D. G.; BAENA, L. G. N.; OLIVEIRA, F. G. D.; PRUSKI, F. F. Aplicação dos modelos RUSLE e WEPP para a estimativa da erosão hídrica em microbacia hidrográfica de Viçosa (MG). **Revista Verde**, v. 4, n. 2, p. 39-45, 2009.

CHILDS, C. Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. **ArcUser**, p. 32-35, 2004. Disponível em: <<https://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf>>.

CODASP. **Manual técnico de motomecanização agrícola**. São Paulo, 1994.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**. Brasília: Companhia nacional de abastecimento, v. 2, 2015, 70 p.

CORRÊA, C. M. C.; ROLOFF, G.; SILVA, I. C. Erosão real e estimada através da RUSLE em estradas florestais, em duas condições de solo e relevo e quatro perfis de solo. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 76, p. 57-66, 2007.

CORSEUIL, C. W.; ROBAINA, A. D. Determinação altimétrica através do sistema de posicionamento global. **Ciência Rural**, v. 33, n. 4, p. 673-678, 2003.

CREMONINI, L. C. M. **Acurácia de mapas altimétricos obtidos com DGPS na colheita de cereais**. 2002. 61 f. Mestrado)–Mestrado em Máquinas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.

CUNHA, F. F.; LEAL, A. J. F.; ROQUE, C. G. Planejamento de sistemas de terraceamento utilizando o software Terraço 3.0. **Brazilian Geographical Journal**, v. 2, n. 1, p. 41-49, 2011.

DE ROO, A. P. J.; OFFERMANS, R. LISEM: a physically-based hydrological and soil erosion model for basin-scale water and sediment management. **Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resource Systems**, n. 231, p. 399-407, 1995. Disponível em: <http://hydrologie.org/redbooks/a231/iahs_231_0399.pdf>.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; DE MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015.

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

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 81 f. Doutorado)–Agronomia/Solos e nutrição de plantas, Escola superior de agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A. A GIS procedure for automatically calculatins the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, p. 427-433, 1996.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011, 230 p.

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

F.A.O., F. A. A. O. La erosión del suelo por el agua: Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. **Cuadernos de fomento agropecuario da Organizacion De Las Naciones Unidas**. Roma: FAO, v. 81, 1967. p. 207.

FLANAGAN, D. C.; ASCOGH, J. C.; NICKS, A. D.; NEARING, M. A.; LAFLEN, J. M. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: FLANAGAN, D. C. (Ed.). **Water erosion prediction project - WEPP**. West Lafayette: USDA, 1995.

FLANAGAN, D. C.; GILLEY, J. E.; FRANTI, T. G. Water erosion prediction project (WEPP): development history, model capabilities, and future enhancements. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 5, p. 1603-1612, 2007.

FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENARD, K., G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981.

G.P.R.H. **Plúvio 2.1: Chuvas intensas para o Brasil**. Viçosa: UFV - Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos/DEA, 2006.

GALDINO, S.; RISSO, A.; SORIANO, B. M. A.; VIEIRA, L. M.; PADOVANI, C. R.; POTT, A.; MELO, E. C.; JÚNIOR, N. D. A. **Perdas de Solo na Bacia do Alto Taquari**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2003, 40-40 p.

GALETI, P. A. **Práticas de controle à erosão**. Campinas: Instituto campineiro de ensino agrícola, 1987, 278 p.

GOODRICH, D. C.; BUMS, I. S.; UNKRICH, C. L.; SEMMENS, D. J.; GUERTIN, D. P.; HERNANDEZ, M.; YATHEENDRADAS, S.; KENNEDY, J. R.; LEVICK, L. R. KINEROS 2/AGWA: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1561-1574, 2012.

GRIEBELER, N. P. **Software para o planejamento e a racionalização do uso de sistemas de terraceamento em nível**. 1998. 87 f. Mestrado em engenharia agrícola)–Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

GRIEBELER, N. P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. 2002. 134-134 f., 2002.

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; MARTINS JÚNIOR, D.; SILVA, D. D. Avaliação de um modelo para a estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 411-417, 2001.

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A. D.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D. D. Modelo para a determinação do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 397-405, 2005a. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832005000300010&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; TEIXEIRA, A. F.; OLIVEIRA, L. F. C. D. Software para o planejamento e a racionalização do uso de sistemas de terraceamento em nível. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 841-851, 2005b.

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; TEIXEIRA, A. F.; SILVA, D. D. D. Modelo para o dimensionamento e a locação de sistemas de terraceamento em nível. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 696-704, 2005c.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Ed.). **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 149-199.

HONDA, M. H. D. A. L. **Manual do proprietário - FOUTRAX TRX420TM/TRX420FM**. Manaus: Moto Honda da Amazônia LTDA, 2014, 243 p.

HUANG, C.-H.; BRADFORD, J. M. Applications of a Laser Scanner to Quantify Soil Microtopography. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 1, 1992. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010002x>>.

HUDSON, N. W. **The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion with particular reference to northern Rhodesia**. 1965. Tese de Mestrado—, University of Cape Town, Cape Town, 1965.

HUTCHINSON, M. F. **Anudem Version 5.3 User Guide**. Canberra: Australian National University, 2011, 30-30 p.

HUTCHINSON, M. F.; DOWLING, T. I. A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 45-58, 1991.

IHLENFELD, R. G. K. **Obtenção dos valores básicos dos parâmetros de erodibilidade do modelo WEPP, para um Latossolo Vermelho Escuro Argiloso, através de técnicas de otimização**. 1996. 1)–, 1996.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data dos geographic information system analysis. **Journal of photogrametric and remote sensing**, v. 54, n. 3, p. 1593-1600, 1988.

KAMPHORST, E. C.; JETTEN, V.; GUÉRIF, J.; PITK A " NEN, J.; IVERSEN, B. V.; DOUGLAS, J. T.; PAZ, A. Predicting Depressional Storage from Soil Surface Roughness 1 Trade names are included for the benefit of the reader and do not imply endorsement of the INRA or the UU. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 5, 2000. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2000.6451749x>>.

LACROIX, M. P.; MARTZ, L. W.; KITE, G. W.; GARBRECHT, J. Using digital terrain analysis modeling techniques for the parametrization of a hydrological model. **Environmental Modelong & Software**, v. 17, p. 127-136, 2002.

LAFLEN, J. M.; LANE, L. J.; FOSTER, G. R. The water erosion prediction project - a new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, n. 1, p. 34-38, 1991.

LAL, R. Soil erosion on alfisols in western Nigeria. III. Effects of rainfall characteristics. **Geoderna**, v. 16, p. 389-401, 1976.

LEITE, M. H. S. **Avaliação das perdas de solo, água e nutrientes em diferentes sistemas de preparo num Latossolo Vermelho-Amarelo sob chuva natural**. 2007. 83 f. Mestrado em Agricultura Tropical)–, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2007.

LIONÇO, E.; BRESSAN, J.; SILVA, C. M. Sistematização da área para implantação da colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Campo Digit@l**, v. 5, n. 1, p. 20-25, 2010.

LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J. B.; BERTOLINI, D.; GALETI, P. A.; DRUGOWICH, M. I. **Terraceamento agrícola**.

Campinas: Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Estado de São Paulo - Coordenadoria de Assistência Técnica Integral, v. Boletim técnico CATI - 206, 1994, 39 p.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terras para solos do Estado de São Paulo**: Boletim técnico, 28. Campinas: Instituto Agrônômico, 1975.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. **Bragantia**, v. 51, n. 1, p. 189-196, 1992.

LÓPEZ-VICENTE, M.; PÉREZ-BIELSA, C.; LÓPEZ-MONTERO, T.; LAMBÁN, L. J.; NAVAS, A. Runoff simulation with eight different flow accumulation algorithms: Recommendations using a spatially distributed and open-source model. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 11-21, 2014.

MACHADO, M. M. M. PROJETO EM GEOPROCESSAMENTO: Aplicação em ambiente ArcView. p. 1-51, 2006.

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. D. P. E.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. D. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MARQUES, J. Q. A. **Conservação do solo em cafezal**: Boletim de superintendência dos serviços do café. São Paulo: Superintendência dos Serviços do Café, 1950, 234 p.

MENDONÇA, D. C.; BELO, A. F. C. F.; CORRECHEL, V.; SPAROVEK, G.; ARTHUR, R.; BACCHI, O. O. S., Erosividade das chuvas em Goiatuba, GO. In: 8 Simpósio nacional de Controle de Erosão, 2009, São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 8-9, p. 761-799, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815203000781>>. Acesso em: 2003/11//.

MIRANDA, A. C. R.; SILVA, D. P.; MELLO, E. L.; PRUSKI, F. F. Assessment of efficiency and adequacy of retention terraces. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 35, p. 577-586, 2012.

MIRANDA, J. H. D.; DUARTE, S. N.; SILVA, K. O.; LIER, Q. D. J. V.; NOVA, N. A. V. Dimensionamento de terraços de infiltração pelo método do balanço volumétrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2/3, p. 169-174, 2004.

MORAIS, L. F. B.; SILVA, V.; NASCHENVENG, T. M. C.; HARDOIN, P. C.; ALMEIDA, J. E. L.; WEBER, O. L. S.; BOEL, E.; DURIGON, V. Índice EI30 de chuva e sua relação com o coeficiente de chuva do sudoeste de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, p. 339-344, 1991.

MORAIS, N. R. D. **Erosividade, padrões hidrológicos e estimativa da erosão em Latossolos de Goiás**. 2012. 41-41 f., 2012.

NEARING, M. M. A. A single, continuous functions for slope steepness influence on soil loss. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 3, p. 917-919, 1997.

NOGUEIRA, C.; FIGUEIREDO, T.; FONSECA, F.; GUERRA, A.; MARTINS, A. Comparação das perdas de solo por erosão estimadas usando o modelo WEPP com as medidas num povoamento florestal em fase de instalação. v. 1, 2007. p. 97-102.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer vision, graphics and image processing**, v. 28, p. 232-344, 1984.

OLIVEIRA, A. H. **Erosão hídrica e seus componentes na sub-bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, Eldorado do Sul (RS)**. 2011. 181-181 f. Doutorado em Ciência do Solo—Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; KILINKE NETO, G.; SILVA, M. A.; ARAUJO, E. F. Consistência hidrológica de modelos digitais de elevação (MDE) para definição de rede de drenagem na sub-bacia do horto florestal Terra Dura, Eldorado do Sul, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 1259-1267, 2012a.

OLIVEIRA, F. P. D.; SANTOS, D.; SILVA, I. D. F. D.; SILVA, M. L. N. Tolerância de Perda de Solo por Erosão para o Estado da Paraíba. **Revista de biologia e ciências da terra**, v. 8, n. 2, p. 60-71, 2008.

OLIVEIRA, G.; PEREIRA, J.; MESQUITA, M. Espaçamento entre terraços em função dos fatores que afetam as perdas por erosão. **Informe Agropecuário, Belo Horizonte**, v. 16, n. 176, p. 51-56, 1992.

OLIVEIRA, J. F. D.; GRIEBELER, N. P.; GARVIL, R. A.; OLIVEIRA, J. D. M.; RABELO, M. W. D. O. Uso do software Estradas para determinação do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas do interior de Goiás. **Revista Ceres**, v. 58, n. 1, p. 17-22, 2011.

OLIVEIRA, J. M. **Atenuação de riscos de sistemas de terraceamento em Goiás**. 2009. 2009.

OLIVEIRA, J. R. S.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A.; SILVA, D. P. Comparative analysis of the performance of mixed terraces and level and graded terraces. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 34, n. 4, 2012b.

ONSTAD, C. A. Depression storage on tillage soil surfaces. **Transactions of the ASABE**, v. 27, n. 3, p. 729-732, 1984.

PAES, F. D. S.; DUPAS, F. A.; SILVA, F. D. G. B. D.; PEREIRA, J. C. D. Espacialização Da Perda De Solo Nas Bacias Hidrográficas Que Compõem O Município De Santa Rita Do Sapucaí (Mg). **Geociências**, v. 29, n. 4, p. 589-601, 2010.

PARANÁ. **Manual técnico do subprograma de manejo e conservação do solo**. Curitiba: Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento, 1994, 306 p.

PEDROSO, R. F.; ELTZ, F. L. F.; RONCATO, M. L.; GRAMINHO, D. H.; DOS SANTOS, M. V. C. 2003, Ribeirão Preto. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

PENATTI, C. P. Planejamento da sulcação para plantio e colheita mecanizada. **Revista Coplana**, n. 26, 2006.

PEREIRA, J. C. D. **Aplicação do modelo hidrossedimentológico AVSWAT na bacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeirinha – MG**. 2010. 134 f. Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos)–Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

PEYRET, F.; BÉTAILLE, D.; HINTZY, G. High-precision application of GPS in the field of real-time equipment positioning. **Automation in construction**, v. 9, n. 3, p. 299-314, 2000.

PLANCHON, O.; ESTEVES, M.; SILVERA, N.; LAPETITE, J.-M. Microrelief induced by tillage: measurement and modelling of Surface Storage Capacity. **Catena**, v. 46, n. 2–3, p. 141-157, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816201001631>.

POLONI, D. M. **Desenvolvimento e aplicação de procedimentos metodológicos em suporte ao planejamento participativo para redução de perda de solos em pequenas bacias hidrográficas com emprego da EUPS**. 2010. 124 f. Mestre em Engenharia Ambiental)–Programa de pós graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

PRADO, A. D.; KRUEGER, C. P. análise da acuracia nos posicionamentos diferenciais aplicando as tecnicas dgps e rtk. **revista brasileira de cartografia**, v. 55, 2001.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: UFV, 2009a, 279 p.

PRUSKI, F. F. Escoamento Superficial. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: UFV, 2009b. p. 279. 5 cap.

PRUSKI, F. F. Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. In: PRUSKI, F. F. (Ed.). **Conservação do solo e da água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009c. 3 cap.

PRUSKI, F. F. Processo físico de ocorrência da erosão hídrica. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: UFV, 2009d. p. 279. 2 cap.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento Superficial**. Viçosa: Editora UFV, 2004, 87 p.

PRUSKI, F. F.; FERREIRA, P. A.; M.M., R.; CECON, P. R. A model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 123, n. 1, p. 8-12, 1997.

PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, D. D. Comparação Entre Dois Métodos Para a Determinação Do Volume De Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 403-410, 2001a. Disponível em: <<http://sbcs.solos.ufv.br/solos/revistas/v25n2a16.pdf>>.

PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, J. M. A.; OLIVEIRA, J. R. S. Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica em áreas agrícolas. In: PRUSKI, F. F. (Ed.). **Conservação do solo e da água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001b.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. S.; TEIXEIRA, A. F.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, J. M. A.; GRIEBELER, N. P. **HIDROS: Dimensionamento de sistemas hidroagrícolas**. Viçosa: Editora UFV, 2006, 259 p.

RABELO, M. W. D. O. **Levantamento altimétrico com tratores agrícolas e dimensionamento e implantação automatizada de práticas mecânicas de conservação do solo**. 2011a. Mestrado em Agronomia - Solo e Água)–Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011a.

RABELO, M. W. D. O. **Levantamento altimétrico com tratores agrícolas e dimensionamento e implantação automatizada de práticas mecânicas de conservação do solo**. 2011b. 64 f. Mestrado)–Programa de Pós graduação em Agronomia, Universidade Federal de Goiás, 2011b.

RABELO, M. W. D. O.; GRIEBELER, N. P. Determinação de incremento de altura de camalhão na integração terraço-estrada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 1, p. 49-55, 2012.

RAMOS, R. C.; NACHILUK, K. Diagnóstico do setor sucro energético em 2014. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 10, n. 10, p. 6, 2015.

RAMPI, L. P.; KNIGHT, J. F.; LENHART, C. F. Comparison of flow direction algorithms in the application of the CTI for mapping wetlands in Minesota. **Wetlands**, v. 34, n. 3, p. 513-525, 2014.

RENARD, K., G.; FERREIRA, V. A. RUSLE model description and database sensitivity. **Journal Environment Quality**, v. 22, n. 1, p. 458-466, 1993.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. 1997, 404-404 p. Disponível em: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64080530/RUSLE/AH_703.pdf>.

RESCK, D. V. S. A. **Conservação da água via terraceamento em sistemas de plantio direto e convencional no cerrado**: Circular Técnica 22. Planaltina: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2002, 8 p.

RODRIGUES, L. N. **Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central**. 1999. 145 f. Doutorado em Engenharia Agrícola)–Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

SALES, S. J. **Análise comparativa de metodologias para espaçamento entre terraços**. 1998. 98 f. Mestrado em planejamento e produção agropecuária)–Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

SAVABI, M. R.; WILLIAMS, J. R. Water balance and percolation. **Water erosion prediction project - WEPP**. West Laffayette: USDA, 1995.

SCALOPPI, E. J.; GARCIA, C. J. B. Dimensionamento simplificado de terraços para conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**2, v. 9, n. 6, p. 340-348, 2015.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 57, n. 3, p. 251-259, 2004.

SILVA, J. M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; CECÍLIO, R. A. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais. Parte II: Modelo Computacional e Análise de sensibilidade. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 704-712, 2006.

SILVA, J. M. A. D. A. **Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: desenvolvimento e aplicação**. 2002. Tese de Doutorado)–, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; DE LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M. Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos Brasileiros. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 35, n. 6, p. 1207-1220, 2000.

SILVA, M. L. N.; FREITAS, P. L.; BLANCANEUAX, P.; CURI, N.; LIMA, J. M. Relação entre parâmetros da chuva e perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro em Goiânia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 131-137, 1997a.

SILVA, M. L. N.; FREITAS, P. L. D.; BLANCANEUAX, P.; CURI, N. Índices de erosividade das chuvas da região de goiânia, GO. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 32, n. 10, p. 977-985, 1997b.

SKIDMORE, E. L. Soil loss tolerance. In: KRAL, D. M. (Ed.). **Determinants of soil loss tolerance**: ASA Special Publication, 45. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p. 87-93. 8.

SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C.; WOOLHISER, D. A.; L., U. C. KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model. In: SINGH, V. J. (Ed.). **Computer Models of Watershed Hydrology**. Colo: Highlands Ranch, 1995.

SOIL CONSERVATION SERVICE. **Drenage of agricultural land**. New York: Water Information Center, 1973.

SPEKKEN, M.; BRUIN, S. Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 2, p. 224-244, 2013.

SPEKKEN, M.; MOLIN, J. P.; ROMANELLI, T. L. Cost of boundary manoeuvres in sugarcane production. **Biosystems Engineering**, v. 129, p. 112-126, 2015.

SPERANDIO, H. V.; CECILIO, R. A.; CAMPANHARO, W. A.; CARO, C. F. D.; HOLLANDA, M. P. D. Avaliação da erosão hídrica pela alteração na superfície do solo em diferentes coberturas vegetais de uma sub-bacia hidrográfica no Município de Alegre, ES. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 4, p. 1411-1418, 2012. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/6760>>.

TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, 1997.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 81-100, 1991. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.3360050107>>.

TARBOTON, D. G.; SAZIB, N.; DASH, P. **Quick start guide to using the TAUDDEM ArcGIS toolbx**. Utah State University, 2015, 39-39 p. Disponível em: <<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/TauDEM53GettingStartedGuide.pdf>>.

VAL, L. A.; BAHIA, V. G.; FREIRE, J. C.; DIAS JUNIOR, M. S. Erosividade das chuvas em Lavras, MG. **Ciência Prática**, v. 10, n. 1, p. 199-209, 1986.

VALENTIN, E. F. D. **Modelagem Dinâmica de Perdas de Solo : o Caso do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto-DF / GO**. 2008. 113-113 f., 2008.

VALLE JÚNIOR, R. F. D.; GALBIATTI, J. A.; MARTINS FILHO, M. V.; PISSARRA, T. C. T. Potencial de erosão da bacia do Rio Uberaba. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 897-908, 2010.

WADT, P. G. S. Práticas de Conservação do Solo e Recuperação de Áreas Degradadas. **Documentos 90**, p. 32-32, 2003. Disponível em: <<http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGB.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=222224>>.

WILLIAMS, J. D.; LONG, D. S.; WUEST, S. B. Capture of plateau runoff by global positioning system-guided seed drill operation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 66, n. 6, p. 355-361, 2012.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 26, n. 5, p. 198-193, 1971.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 39, n. 1, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains. **Agricultural Handbook 282**, v. 1, p. 49-49, 1972a.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains. **Agricultural Handbook 282**, v. 1, n. 1, p. 49-49, 1972b.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a Guide to Conservation Planning**. Washington: USDA, v. 537, 1978a, 58 p.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning**. Washington: USDA, 1978b, 58 p.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. **KINEROS, a kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual**. USDA, 1990, 130-130 p.

ZAMUNER FILHO, A. N. **Planejamento e projeto de áreas de cana-de-açúcar: conservação do solo e logística de colheita**. 2015. 214 f. Doutorado em Ciências)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.