**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

ANTONIO NILSON ZAMUNÉR FILHO

**Planejamento e projeto de áreas de cana-de-açúcar:
conservação do solo e logística da colheita**

São Carlos

2015

ANTONIO NILSON ZAMUNÉR FILHO

**Planejamento e projeto de áreas de cana-de-açúcar:
conservação do solo e logística da colheita**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes.

Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

**ORIENTADOR: Prof. Dr.
João Alexandre Widmer**

**São Carlos
2015**

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

Z23p

Zamunér Filho, Antonio Nilson

Planejamento e projeto de áreas de cana-de-açúcar:
conservação do solo e logística da colheita / Antonio
Nilson Zamunér Filho; orientador João Alexandre Widmer.
São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2015.

1. Colheita mecânica. 2. Microterraço de drenagem.
3. Rendimento operacional. 4. Cana-de-açúcar. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANTONIO NILSON ZAMUNÉR FILHO.**

Título da tese: "Planejamento e projeto de áreas de cana de açúcar: conservação do solo e logística da colheita"

Data da defesa: 18/06/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **João Aleandre Widmer**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Titular **Paulo Sergio Graziano Magalhães**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Dr. **Marcílio Vieira Martins Filho**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
UNESP - Jaboticabal)

APROVADO

Prof. Dr. **Edgar Gomes Ferreira de Beauclair**
(Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
da Universidade de São Paulo/ESALQ)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Seganfina**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Seganfina**

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Nilson Zamunér
Por acreditar em meu sonho e me apoiar incontestavelmente.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por nos mostrar diariamente a existência do amor.

Aos meus pais Antonio e Neusa, pelo amor, confiança, exemplo e oportunidade ímpar.

Ao meu irmão Noriel, eterno amigo e companheiro.

Aos meus avós pelo amor e ensinamentos, em especial minha avó Nilth por seu amor maternal e incansáveis orações.

A minha noiva, Marília Gabriela, pela confiança, carinho, amizade e respeito.

A minha colega, Marília Gabriela, pelo apoio, ensinamentos, tempo disponível e parceria acadêmica durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor João A. Widmer, pela orientação, dedicação, paciência, amizade, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, mas, principalmente, por me guiar em meu sonho.

Ao professor Edgar de Beauclair, por me orientar nas questões relativas aos processos agrícolas da cana-de-açúcar e especialmente, por sua amizade.

Aos professores Gerd Sparovek (ESALQ/USP) e Edson Wendland (EESC/USP) por me co-orientarem nos momentos mais críticos deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação pelas incansáveis horas de estudo e aprendizado coletivo, pela amizade e companheirismo.

Aos colegas do GECA (Grupo de Estudos em Cana-de-açúcar), pelos incentivos e oportunidades únicas.

Aos professores e funcionários da EESC/USP, em especial a todos do Departamento de Transportes – STT, por possibilitarem a realização deste projeto.

A Usina Santa Fé, nas pessoas de Sílvio Malzonni e Matheus Lopes, pelo apoio, amizade e por colocar à disposição a área experimental, bem como seu financiamento.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Se você quer transformar o mundo, experimente primeiro promover o seu aperfeiçoamento pessoal e realizar inovações no seu próprio interior”.

Dalai Lama

RESUMO

Zamunér Filho, A. N. **Planejamento e projeto de áreas de cana-de-açúcar: conservação do solo e logística da colheita**. 2015. 214p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

No cenário atual do setor sucroenergético, as operações mecanizadas da colheita são importantes para garantir a competitividade econômica. Entretanto, as atuais técnicas mecânicas de conservação do solo e água, atreladas a inexistência de uma fase de projeto, reduzem a eficiência operacional e econômica das máquinas e equipamentos. Diante disto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa conservacionista baseada na drenagem superficial do excesso de chuva via microterraços de drenagem, dimensionados através de conceitos de hidráulica de canais abertos, através do planejamento e projeto detalhado das áreas de plantio visando otimizar as operações de colheita mecanizada. Foram elaborados os fluxogramas das etapas de planejamento e projeto para o plantio de cana-de-açúcar, buscando organizar e auxiliar as tomadas de decisão com a compreensão facilitada dos processos através de uma representação gráfica simples. Também foi realizada uma aplicação experimental do método proposto, para a situação analisada, os parâmetros hidráulicos atenderam às restrições conservacionistas de erosão, além do novo projeto possibilitar um incremento de 2,7% em área útil de plantio, resultando em um aumento de produção de matéria-prima. Soma-se ainda, um incremento no desempenho das colhedoras da ordem de 8,4% refletindo na redução dos custos de colheita. Concluindo, o método alternativo de conservação do solo através dos microterraços de drenagem se mostra promissor. Os conceitos de hidráulica de canais abertos, aplicados em conjunto com modelos digitais do terreno, na avaliação de alternativas de conservação do solo e da água nas etapas de planejamento e projeto de áreas de plantio, favorecem o manejo cultural, a conservação do solo e o rendimento operacional das máquinas e equipamentos de colheita de cana-de-açúcar. No exemplo prático de aplicação, os custos de implantação/ha são da mesma ordem de grandeza do método convencional de terraços de infiltração. Assim, neste caso, o lucro é maior quando se aplica o método dos microterraços de drenagem, para um ciclo de produção de cinco anos.

Palavras-chave: colheita mecânica; microterraço de drenagem; rendimento operacional; cana-de-açúcar.

ABSTRACT

Zamunér Filho, A. N. **Project and planning of sugarcane areas: soil conservation and harvest logistics**. 2015. 214p. Thesis (Doctor of Science) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

In the current scenario of the sugarcane industry, mechanized harvesting operations are important to ensure economic competitiveness. However, the current mechanical techniques of soil and water conservation, linked to the lack of a design phase reduce operational and economic efficiency of machinery and equipment. Thus, this work aims to present a conservation alternative based on the surface drainage of the rain excess by microterraces, sized through hydraulics concepts of open channel flow, through the planning and detailed design of the planting areas to optimize the operations of mechanical harvesting. Flowcharts were elaborated to represent the stages of planning and design for the sugarcane plantation, seeking to organize and assist the decision making with easier understanding of the processes through a simple graphical representation. Also an experimental implementation of the proposed method was performed, for the analyzed situation, the hydraulic parameters met the conservation restrictions of erosion, and the new design allows for increased 2.7% in planting area, resulting in increased production of raw material. Added to an increase in the performance of harvesters in the order of 8.4% reflecting the reduction of costs and increase profit. In conclusion, the alternative method of soil conservation through microterraces drain shows promising. The concepts of hydraulics of open channels, applied in conjunction with digital models of the terrain, in the evaluation of alternatives for the conservation of soil and water in the stages of planning and design of planting areas, promote the cultural management, soil conservation and the operating performance of the machines and equipment for harvesting of sugarcane. In the practical example of application, the deployment costs/ha are at the same order of magnitude, compared with the conventional method of infiltration terraces. Thus, in this case, the profit is greater when applying the method of drainage microterraces, for a production cycle of five years.

Key-words: harvesting; drainage terrace; machinery productivity measurement; sugarcane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Variação da taxa de infiltração com o tempo sob condições de intensidade de precipitação constante (i_p).....	38
Figura 4.2 – Efeito da declividade do terreno no valor do LS, parâmetro do modelo USLE.	58
Figura 4.3 – Perfil esquemático de um terraço tipo Nichols.	71
Figura 4.4 – Perfil esquemático de um terraço tipo Mangum.	72
Figura 4.5 – Perfil esquemático de um terraço tipo “embutido”.	73
Figura 4.6 – Perfil esquemático de um terraço tipo “murundum”.....	74
Figura 4.7 – Perfil esquemático de um terraço tipo patamar.....	74
Figura 4.8 – Efeitos do acúmulo de água no canal do terraço.....	82
Figura 4.9 – Representação esquemática de um terraço de infiltração com seção triangular.....	84
Figura 4.10 – Representação esquemática de um terraço de retenção com seção trapezoidal.....	84
Figura 4.11 – Representação esquemática de um terraço de drenagem com seção triangular.....	87
Figura 4.12 – Seções dos canais escoadouros: A – Parabolóide, B – Trapezoidal e C – Triangular.....	91
Figura 4.13 – Exemplo de estrutura de uma árvore de decisão.	93
Figura 4.14 – Visão geral da planilha eletrônica que representa o Simulador de Colheita.....	104
Figura 4.15 – Capacidade efetiva da colhedora de cana-de-açúcar em função do comprimento da linha de colheita.....	105
Figura 4.16 – Capacidade efetiva da colhedora de cana-de-açúcar em função do tempo de manobra e do comprimento da linha de colheita.	106
Figura 5.1 – Fluxograma da etapa de Levantamento de dados e avaliação da área para a colheita mecanizada.	109
Figura 5.1 – Continuação... ..	110
Figura 5.2 – Validação do levantamento planialtimétrico e geração do modelo digital do terreno no Sistema de Informações Geográficas.	117
Figura 5.3 – Visualização do escoamento estático no <i>software</i> AutoCAD Civil 3D®.	120
Figura 5.4 – Visualização do escoamento dinâmico no <i>software</i> NetLogo®.	121
Figura 5.5 – Visualização do escoamento estático no <i>software</i> AutoCAD Civil 3D®.	124

Figura 5.6 – Visualização do escoamento dinâmico no <i>software</i> NetLogo®.	126
Figura 5.7 – Métodos de conservação do solo.	127
Figura 5.8 – Método do terraço de infiltração tradicional (base em nível).	130
Figura 5.8 – Continuação... ..	131
Figura 5.8 – Continuação... ..	132
Figura 5.9 – Método do terraços de infiltração paralelo (base em desnível).....	136
Figura 5.9 – Continuação... ..	137
Figura 5.9 – Continuação... ..	138
Figura 5.10 – Método do terraço de drenagem convencional.	140
Figura 5.10 – Continuação... ..	141
Figura 5.10 – Continuação... ..	142
Figura 5.11 – Modelo esquemático em 3D do Método do Microterraço de Drenagem em plantio de cana-de-açúcar em espaçamento combinado (0,9 x 1,5 m).	144
Figura 5.12 – Modelo esquemático em perfil do Microterraço de Drenagem em plantio de cana-de-açúcar em espaçamento combinado.	145
Figura 5.13 – Vista do Microterraço de Drenagem (entrelinha de plantio ou linha de tráfego) em plantio de cana-de-açúcar.....	146
Figura 5.14 – Vista dos canais escoadouros vegetados no Método do Microterraço de Drenagem em plantio de cana-de-açúcar.....	147
Figura 5.15 – Método do microterraço de drenagem.	148
Figura 5.15 – Continuação... ..	149
Figura 5.15 – Continuação... ..	150
Figura 5.15 – Continuação... ..	151
Figura 5.16 – Elementos geométricos da seção trapezoidal.....	158
Figura 5.17 – Método do microterraço de drenagem: dimensionamento dos canais escoadouros.....	160
Figura 5.17 – Continuação... ..	161
Figura 5.18 – Elementos geométricos da seção triangular.	163
Figura 5.19 – Implantação do projeto no campo.	168
Figura 6.1 – Imagem da área experimental.	173
Figura 6.2 – Projeto de conservação convencional com Terraços de Infiltração Tradicional (Base em nível).....	174
Figura 6.3 – Projeto de conservação híbrida com Microterraços de Drenagem e Terraços de Infiltração Paralelo (Base em desnível).	175
Figura 6.4 – Eliminação de terraço de infiltração tradicional inoperante.	177

Figura 6.5 – Nivelamento detalhado do terreno.	177
Figura 6.6 – Tubos de drenagem conectando os canais escoadouros.....	178
Figura 6.7 – Projeto de conservação Convencional – Blocos de colheita.	182
Figura 6.8 – Projeto de conservação Híbrida – Blocos de colheita.....	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Velocidade terminal de gotas de chuva de vários diâmetros.....	23
Tabela 4.2 – Energia cinética da chuva e da enxurrada.....	23
Tabela 4.3 – Efeito do tipo de cultura sobre as perdas por erosão.	27
Tabela 4.4 – Valores de C recomendados pelo <i>Soil Conservation Service</i> – USDA.	41
Tabela 4.5 – Valores de coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning.....	44
Tabela 4.6 – Relação de erosão dos horizontes superficiais e subsuperficiais para várias unidades de dois agrupamentos de solo do Estado de São Paulo.	56
Tabela 4.7 – Razão de perdas de solo entre área cultivada e área continuamente descoberta.	59
Tabela 4.8 – Valores de P da equação de perdas de solo para algumas práticas conservacionistas.	62
Tabela 4.9 – Tipos de terraços recomendados de acordo com a declividade local. ..	75
Tabela 4.10 – Valores de espaçamento vertical (EV) e horizontal (EH) recomendados pelo método do Paraná.....	77
Tabela 4.11 – Agrupamentos de solos segundo suas qualidades, características e resistências à erosão e os respectivos valores de k.	79
Tabela 4.12 – Grupos de culturas e respectivos fatores de uso do solo (μ).	80
Tabela 4.13 – Grupos de solo e manejo de restos culturais com respectivos valores do fator m.....	80
Tabela 4.14 – Valores de EV e EH para os diferentes métodos de cálculo.....	81
Tabela 4.15 – Vazões dos canais dos terraços.....	85
Tabela 4.16 – Velocidade permissível da enxurrada no canal do terraço de drenagem.	88
Tabela 4.17 – Velocidade máxima permitida em canais abertos ($m\ s^{-1}$).....	90
Tabela 5.1 – Legenda e critérios para a classificação da aptidão climática.	113
Tabela 5.2 – Valores de C recomendados pelo <i>Soil Conservation Service</i> – USDA.	157
Tabela 5.3 – Velocidade máxima permitida em canais abertos ($m\ s^{-1}$).....	162
Tabela 6.1 – Comparativo numérico das estruturas nos diferentes projetos de plantio.	176
Tabela 6.2 – Medidas específicas para os diferentes tipos de projetos de plantio. .	178
Tabela 6.3 – Parâmetros hidráulicos calculados no projeto de sulcação Híbrida....	179
Tabela 6.4 – Parâmetros hidráulicos calculados para os canais escoadouros no projeto de sulcação Híbrida.....	180

Tabela 6.5 – Rendimentos de colheita para os diferentes projetos.....	181
Tabela 6.6 – Compartivo de rendimentos.....	185
Tabela 6.7 – Custos de plantio no sistema Convencional.	186
Tabela 6.8 – Custos de plantio no sistema Híbrido.	187
Tabela 6.9 – Análise comparativa dos custos e ganhos.....	188

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVO	19
2.1 Objetivo geral.....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3 JUSTIFICATIVA	20
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
4.1 O processo de erosão hídrica.....	21
4.1.1 Chuva.....	22
4.1.2 Solo.....	24
4.1.3 Topografia do terreno.....	26
4.1.4 Uso e manejo do solo	27
4.2 Selamento superficial	29
4.3 Infiltração da água no solo	30
4.3.1 Modelos de infiltração.....	32
4.3.2 Fatores que interferem e métodos para aumentar a infiltração.....	34
4.4 Escoamento superficial.....	38
4.4.1 Representação matemática do escoamento sobre uma grande superfície.....	39
4.4.2 Representação matemática do escoamento em canais abertos	43
4.5 Modelos para estimar a erosão e o transporte de sedimentos.....	49
4.5.1 Equação Universal de Perdas de Solo – USLE	52
4.5.2 Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – RUSLE	64
4.5.3 Water Erosion Prediction Project – WEPP.....	64
4.6 Práticas de controle da erosão	66
4.6.1 Práticas edáficas	66
4.6.2 Práticas vegetativas	67
4.6.3 Práticas mecânicas.....	69
4.6.4 Definição do tipo de terraço	75
4.6.5 Modelos de cálculo de distância entre terraços	75
4.6.6 Modelo de dimensionamento de terraços de infiltração	83
4.6.7 Modelos de dimensionamento de terraços de drenagem	87
4.6.8 Modelo de dimensionamento dos canais escoadouros	89
4.7 Planejamento e projeto no setor sucroenergético	92
4.7.1 Planejamento da conservação do solo e água no setor sucroenergético	95
4.8 Agricultura de Precisão	97
4.9 Ferramentas computacionais	101
4.10 Desempenho operacional e econômico de colhedoras de cana-de-açúcar.....	102
5 MÉTODO	107

5.1 Primeira etapa – Levantamento de dados e avaliação	108
5.2 Segunda etapa – Projeto da área de plantio	116
5.2.1 Fase 1: Validação do levantamento planialtimétrico e geração do modelo digital do terreno (MDT) no Sistema de Informações Geográficas (SIG).	116
5.2.2 Fase 2: Visualização do escoamento superficial no MDT.....	119
5.2.3 Fase 3: Geração das alternativas de conservação do solo e dimensionamento hidráulico correspondente	126
5.2.4 Método do Microterraço de Drenagem	143
5.2.5 Fase 4: Implantação do projeto no campo	166
5.3 Terceira etapa – Avaliação dos custos.....	169
6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO	173
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	184
8 CONCLUSÕES	189
8.1 Conclusões genéricas	189
8.2 Conclusões do exemplo de aplicação	190
9 CONTINUIDADE DA PESQUISA.....	191
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil possui um dos maiores e mais importantes projetos de produção de biocombustíveis fundamentado, principalmente, na cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), com capacidade para oferecer ao mundo uma alternativa energética eficiente e renovável.

A produção nacional desta cultura, na safra 2014/15, está estimada em 642,1 milhões de toneladas em uma área de aproximadamente 9 milhões de hectares e produtividade média de 71,3 t ha⁻¹ (Brasil, 2014). Diante da importância social e econômica que exerce no agronegócio brasileiro, das restrições legais impostas ao emprego do fogo para despalha durante a colheita (Lei Estadual 11.241, de 19 de setembro de 2002) e da evolução das técnicas de cultivo, as inovações tecnológicas são importantes, pois podem aumentar a produtividade e reduzir os custos.

Diferentemente das regiões produtoras de cana dos países como Estados Unidos e Austrália, os quais possuem topografias planas, no Brasil a cultura pode ser encontrada em áreas com declividades superiores a 12% onde a mecanização da colheita é limitada devido aos riscos de escorregamento e/ou tombamento das colhedoras e dos veículos de transbordo. Além disso, nessas áreas os problemas de conservação do solo são agravados, uma vez que a declividade é um fator importante no processo erosivo.

Benedini e Conde (2008) afirmam que o sistema de conservação do solo tradicional é eficiente no controle de erosões, porém a construção indiscriminada de terraços prejudica todas as operações mecanizadas pela ausência de paralelismo entre os mesmos. Esses servem, também, como guias para o plantio, que se torna descontínuo originando linhas mortas, consequentemente, afetando o rendimento operacional das máquinas e equipamentos (maior número de manobras e menor comprimento médio das linhas de cana). Os autores afirmam, ainda, que os sistemas de controle de erosão podem ser modificados, sendo possível até a eliminação de terraços em áreas menos declivosas (até 4%), desde que o solo esteja protegido através de algum tipo de cobertura vegetal durante a reforma ou plantio.

No setor sucroenergético, a prática comum é a construção de terraços de infiltração (em nível). Entretanto, estes são alocados com distâncias fixas consagradas pelo uso prático ignorando, muitas vezes, as pesquisas sobre conservação.

Uma alternativa para esse paradigma da cultura canavieira no Brasil é a construção das linhas de plantio em desnível e a utilização das linhas de tráfego das máquinas e equipamentos como um canal de drenagem do excesso de água. Ao invés de reter a água em terraços de

infiltração a água seria conduzida por essas linhas, que possuem uma geometria definida e são compactadas pelo trânsito, canalizando o escoamento excessivo até seu destino final (canal escoadouro, córregos e rios).

A elaboração de um projeto de plantio a partir do planejamento da drenagem da água pode levar à otimização dos desempenhos operacional e econômico da colheita mecanizada. Os custos totais de produção de cana-de-açúcar são significativos e, portanto, qualquer possibilidade de redução merece uma investigação mais detalhada. Segundo Nunes Júnior et al. (2014), os custos médios para formação do canavial, durante a safra 2013/2014 na região Centro-Sul variaram entre 5.643,76 R\$ ha⁻¹ até 6.663,51 R\$ ha⁻¹. Já os custos médios da colheita (corte mecanizado, carregamento, transporte e transbordo) variaram entre 32,3 R\$ t⁻¹ e 37,88 R\$ t⁻¹.

A maximização das operações de colheita e transporte é importante na cadeia de suprimentos da indústria sucroalcooleira, pois representam cerca de 30% do custo de produção de uma tonelada de açúcar ou mil litros de álcool (CAIXETA FILHO et al., 2001). Nesse contexto, um planejamento mais elaborado dessas operações, associado a um projeto geométrico da área de plantio, que considere o sistema viário e de drenagem da água de forma a otimizar o valor econômico do processo de produção de cana-de-açúcar, é atraente no âmbito acadêmico e empresarial.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de representação genérica para os custos de plantio e colheita mecânica, nas fases de planejamento e projeto, de uma área para cana-de-açúcar, em função de alternativas de sulcação e manejo do excesso da água da chuva.

2.2 Objetivos específicos

Sendo a temática da otimização da colheita conflitante com a conservação do solo, pois as próprias máquinas e equipamentos podem degradar o solo e a própria cultura, alguns objetivos específicos devem ser alcançados:

- Propor um sistema de conservação do solo compatível com o novo projeto de plantio; e
- Propor um aumento na produtividade da área.

3 JUSTIFICATIVA

A colheita mecanizada é uma realidade crescente do setor canavieiro e, em 2014, estima-se que mais de 90% da área plantada no Estado de São Paulo tenha sido colhida mecanicamente. Entretanto, muitos plantios ainda não estão projetados para essa operação devido a limitações como topografia desfavorável, geometria irregular das áreas, terraceamento inapropriado, espaçamento incompatível com o tamanho das máquinas, custo inicial elevado e falta de mão de obra qualificada, resultando em processos de colheita com baixos níveis de desempenho operacional das máquinas e equipamentos.

Essa inadequação do projeto da área de plantio estende-se à etapa de transporte. A transferência da matéria-prima colhida até a indústria é realizada por veículos combinados de grande capacidade de carga que requerem um planejamento de seu tráfego nas vias internas dos blocos de colheita e do seu acesso a determinados pontos de transbordo de forma a aumentar a eficiência da operação reduzindo, por exemplo, os tempos de movimentação da cana-de-açúcar no trajeto colhedora-veículo de transporte.

Uma configuração geométrica mais elaborada, considerando o formato dos talhões e o traçado dos carregadores e linhas de plantio, pode gerar um melhor aproveitamento da área. Contudo, deve levar em conta não apenas o planejamento da base física, mas também todas as operações e práticas de conservação, preparo do solo, plantio e colheita mecanizada.

Parte-se da hipótese que, através de um projeto com drenagem da área utilizando as linhas de tráfego, os custos com terraceamento serão reduzidos sem perder a eficiência no controle de erosão. Com o consequente aumento do comprimento médio das linhas de plantio de um bloco de colheita, o qual afeta diretamente o desempenho da colhedora, aumenta-se o rendimento, reduz-se o custo da operação, mantendo as condições adequadas para o desenvolvimento das plantas que deixam de sofrer pisoteio (melhorando as condições do seu sistema radicular), prolongando a vida útil do canavial.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 O processo de erosão hídrica

A erosão hídrica é causada principalmente pela ação direta das chuvas incidindo na superfície do solo; pelo movimento rápido das águas pelas encostas; e pela ação combinada de congelamento e descongelamento da superfície (RAMSER, 1924). Este processo é constituído de três fases distintas: desagregação, que ocorre pela ação da energia cinética (EC) resultante do impacto da gota de chuva e início do processo de selamento superficial, o qual reduz a capacidade de infiltração da água no solo; transporte, principalmente pela ação do escoamento superficial; e deposição do material erodido, terceira e última fase do processo, que ocorre somente quando a carga de sedimentos excede a sua capacidade de transporte (ELLISON, 1945; 1947a).

A erosão hídrica do solo tem sido avaliada considerando-se dois processos distintos: erosão em entressulcos e em sulcos (FOSTER, 1982; MARTINS FILHO, 1999). A erosão em entressulcos é um processo caracterizado pelo desalojamento das partículas de um solo, como consequência do impacto das gotas da chuva e o subsequente transporte das partículas por um fino fluxo superficial de enxurrada (FOSTER, 1982). Já a erosão em sulcos ocorre em locais onde um fluxo concentrado de água flui em canais efêmeros, os quais podem ter por origem processos erosivos anteriores, as feições da topografia, a rugosidade do solo e as marcas ou traços de equipamentos de cultivo (MARTINS FILHO, 1999). Assim, a erosão nas áreas entre os sulcos é designada entressulcos.

Segundo Paiva et al. (2001), o entendimento dos fatores que compõem o processo de erosão, bem como a quantificação das perdas do solo, serve como princípio para a elaboração de medidas cujo objetivo é a maximização do uso dos recursos hídricos disponíveis, além de prevenir os efeitos negativos da produção, transporte e deposição de sedimentos.

Na sequência, são apresentados os fatores que influenciam o processo de erosão hídrica.

4.1.1 Chuva

A energia cinética associada à gota de chuva é o ponto de início do processo erosivo. Muito mais danosa que a própria enxurrada, o impacto da gota tem capacidade de desagregar e impedir a infiltração de água (selamento) causando maiores perdas.

Na ocasião de uma chuva muito forte, milhões de gotas golpeiam o terreno, desprendendo as partículas do solo, muitas das quais, podem ser atiradas a mais de 60 cm de altura e mais de 1,5 m de distância (ELLISON, 1947b).

Segundo Bradford e Huang (1996), o entendimento do processo de erosão entressulcos começou com estudos empíricos e teóricos do comportamento de uma única gota. Foram analisadas a forma e a velocidade das gotas (LAWS, 1940; 1941; LAWS e PARSONS, 1943; MIHARA, 1952; HUDSON, 1971), a força do impacto e a reação do solo ao impacto da gota (AL-DURRAH e BRADFORD, 1981; 1982; HUANG et al., 1982; 1983).

Quando as gotas de chuva atingem a superfície do solo causam rompimento mecânico dos agregados próximos à superfície, dispersão, compactação pelo impacto, entupimento dos poros com partículas finas e selamento superficial (ROUSSEVA et al., 2002).

Em mecânica clássica, energia cinética pode ser definida como a energia que um corpo em movimento possui, devido à sua velocidade. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), considerando que uma gota de chuva se desprende de uma nuvem, esta estaria sujeita a aceleração da gravidade e sua energia cinética seria maior, tanto maior fosse a altura da nuvem. Contudo, a gota de chuva, como um corpo em queda livre na atmosfera, sofre influências do atrito do ar e da pressão atmosférica as quais diminuem sua velocidade durante o trajeto. Assim, as gotas de chuva podem alcançar uma velocidade máxima ou “velocidade terminal” atingida quando a resistência oposta à queda é igual ao peso do corpo menos o empuxo oposto, quando o movimento se torna uniforme.

Laws (1941) determinou a altura que as gotas de chuva de diferentes tamanhos necessitavam para atingir 95% de sua “velocidade terminal” (Tabela 4.1). O referido autor concluiu que a velocidade aumenta com o tamanho da gota e com a altura da queda, porém, a “velocidade terminal” atinge seu máximo quando cai de uma altura de, aproximadamente, oito metros e as gotas apresentam tamanho de cinco milímetros de diâmetro. Além disso, concluiu que gotas menores adquirem sua “velocidade terminal” mais rápido.

Tabela 4.1 – Velocidade terminal de gotas de chuva de vários diâmetros.

Diâmetro da gota de chuva (mm)	Velocidade terminal (m s⁻¹)	Altura de queda para adquirir 95% da velocidade terminal (m)
1	4,0	2,2
2	6,5	5,0
3	8,1	7,2
4	8,8	7,8
5	9,1	7,6
6	9,3	7,2

Fonte: Laws (1941), adaptado.

A Tabela 4.2, apresentada por Hudson (1973), compara a energia cinética (EC) disponível da chuva com a energia cinética da enxurrada. Nessa comparação a chuva tem 256 vezes mais energia cinética que a enxurrada, embora os números não sejam exatos, uma vez que foram baseados em porcentagem de enxurrada e velocidade admitida, reforçam claramente o predomínio da energia cinética da chuva.

Tabela 4.2 – Energia cinética da chuva e da enxurrada.

Chuva		Enxurrada
Massa	Supor a massa de queda da chuva = R	Supor 25% de enxurrada, massa da enxurrada = R/4
Velocidade	Supor uma velocidade terminal de 8 m s ⁻¹	Supor a velocidade de escoamento na superfície de 1 m s ⁻¹
Energia cinética*	$\frac{1}{2} R (8^2) = 32R$	$\frac{1}{2} \frac{R}{4} (1^2) = \frac{R}{8}$

*Energia cinética = [massa x (velocidade²)]/2

Fonte: Hudson (1973), adaptado.

A erosividade, uma propriedade da chuva, diz respeito à habilidade potencial desta em causar erosão (WISCHMEIER e SMITH, 1978) e tem sido usualmente expressa como uma função da intensidade de precipitação.

A EC associada à chuva que incide sobre uma área é expressa em MJ ha⁻¹ mm⁻¹ e pode ser obtida pela eq. (1) proposta por Wischmeier e Smith (1958), convertida para o Sistema Internacional de Unidades por Foster et al. (1981).

$$EC = 0,119 + 0,0873 \log j \quad (1)$$

onde:

EC = energia cinética das gotas, MJ ha⁻¹ mm⁻¹;

j = intensidade da chuva, em mm h^{-1} .

Wischmeier e Smith (1958) concluíram que, mantidos constantes os demais fatores condicionantes do processo de erosão, a perda de solo de uma área desprovida de vegetação é diretamente proporcional ao produto de duas características da chuva: energia cinética e sua intensidade máxima em 30 minutos. À associação da energia cinética total de uma chuva multiplicada pela intensidade máxima em 30 minutos denominaram índice de erosão (EI_{30}). Essa foi a melhor correlação encontrada para expressar o potencial erosivo das chuvas.

O índice de erosão (EI_{30}) pode ser obtido por meio da eq. (2):

$$EI_{30} = EC \times I_{30} \quad (2)$$

onde:

EI_{30} = índice de erosão em $\text{MJ ha}^{-1} \text{h}^{-1}$;

EC = energia cinética da chuva, em $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$;

I_{30} = intensidade máxima em 30 minutos, em mm h^{-1} .

A cobertura vegetal sobre a superfície do solo intercepta e dissipa a energia cinética da chuva e do escoamento superficial, diminuindo a desagregação e o transporte de partículas, prevenindo a formação do selamento superficial, reduzindo a velocidade de escoamento, aumentando o tempo de contato água-solo e permitindo maior infiltração (BENNETT, 1939; ALVES, 1986; CASSOL, 1986).

A Equação Universal de Perdas de Solo/*Universal Soil Loss Equation* – USLE (Wischmeier e Smith, 1978), tem o fator R (fator erosividade) como um de seus parâmetros. A determinação dos valores deste fator permite identificar os meses do ano nos quais o risco de erosão é mais elevado, o que é importante para o planejamento e uso da terra (WISCHMEIER e SMITH, 1978; HUDSON, 1995; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

4.1.2 Solo

A erodibilidade, propriedade do solo que expressa a susceptibilidade à erosão, varia de acordo com o tipo de solo, cujas características influenciam na capacidade de retenção e infiltração que determinam a quantidade e taxa de enxurrada. Essas características influenciam, também, a resistência do solo à desagregação de partículas e o seu transporte pelas forças

erosivas da chuva e da enxurrada, determinando as perdas de solo e água (WISCHMEIER e SMITH, 1965).

A perda de solo por erosão é mais afetada pela declividade local, características da chuva, cobertura e manejo do que pelas propriedades intrínsecas do solo. A erosão não é a mesma em todos os solos, pois as propriedades físicas: estrutura, textura, permeabilidade e densidade, assim como as características químicas e biológicas do solo exercem diferentes influências no processo (WISCHMEIER e SMITH, 1978; FOSTER et al., 1981).

Brandão et al. (2006) citam que a textura e estrutura, que são determinantes na quantidade, forma e continuidade dos macroporos do solo, são as características físicas que mais influenciam a condutividade hidráulica e a estabilidade de agregados. Quanto menor esta estabilidade e sua capacidade de infiltração, mais susceptível são à erosão.

Solos ricos em silte e areia e com pouco material cimentante (matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio) são muito propensos ao processo erosivo em razão da pequena resistência que oferecem ao desprendimento de partículas durante a precipitação (PRUSKI, 2009b). Bertoni e Lombardi Neto (2010) relatam que a matéria orgânica retém de duas a três vezes seu peso em água, aumentando a infiltração no solo.

Pesquisadores como Middleton (1930), Boyoucos (1935), Yoder (1936), Peele (1937), Adams et al. (1958), Bryan (1968), Wischmeier e Mannering (1969) e Wischmeier et al. (1971) procuraram relacionar a erosão medida no campo com as características físicas do solo que podem ser determinadas em laboratório. O advento da USLE (Equação Universal de Perdas de Solo) permitiu o desenvolvimento de estudos do fator erodibilidade do solo através da avaliação de chuva natural, uso de simuladores de chuva e de métodos indiretos para determinação desse fator. Desde então, diversas são as pesquisas nessa direção desenvolvidas por Lombardi Neto e Bertoni (1975), Silva et al. (1989), Denardin (1990), Anjos et al. (1994), Albuquerque et al. (2001) e Mannigel et al. (2002), Martins Filho, et al. (2004; 2009), Sousa et al. (2012), Dantas et al. (2014).

No Brasil, alguns solos já possuem o fator erodibilidade determinado e seus valores são apresentados por Lombardi Neto e Bertoni (1975), Freire e Pessotti (1976) e Denardin (1990).

4.1.3 Topografia do terreno

A topografia, caracterizada pelo comprimento, grau de declividade e pela forma da paisagem, pode alterar a erosão, pois a velocidade do escoamento superficial, resultante do comprimento e grau de declive, determina o tamanho e quantidade do material em suspensão (HUDSON, 1995).

Dependem diretamente do grau de declividade, o volume e a velocidade das enxurradas. Ayres (1936) apresenta alguns princípios de hidráulica que, teoricamente, podem explicar as relações entre a velocidade da água e o seu poder erosivo: (a) a velocidade da água varia com a raiz quadrada da distância vertical que ela percorre e sua energia cinética, definida como a capacidade erosiva, de acordo com o quadrado da velocidade. Assim, se o declive do terreno aumenta quatro vezes, a velocidade de escoamento da água aumenta duas vezes e a capacidade erosiva quadruplica; (b) a quantidade de material que pode ser arrastado varia com a quinta potência da velocidade de escoamento; (c) o tamanho das partículas arrastadas varia com a sexta potência da velocidade de escoamento. Deste modo, se duplicarmos a velocidade de escoamento, a quantidade de material que pode ser transportado aumenta 32 vezes e o tamanho das partículas que podem ser transportadas aumenta 64 vezes.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), o comprimento de rampa não é menos importante que o declive, pois à medida que o caminho percorrido vai aumentando, não somente as águas vão-se avolumando proporcionalmente, como também, a sua velocidade de escoamento vai aumentando progressivamente. Em princípio, quanto maior o comprimento de rampa, mais enxurrada se acumula e a maior energia resultante se traduz por uma erosão mais intensa.

O efeito da declividade nas perdas por erosão em alguns locais do Brasil foi descrito por Bertoni (1959), além disso, o referido autor apresenta o efeito simultâneo do grau de declive e do comprimento de rampa.

Um dos aspectos a mencionar na topografia é a forma do declive, podendo ser côncavo ou convexo, homogêneo ou deformado, sendo que os efeitos nos dois primeiros casos não estão ainda bem definidos (BERTONI et al., 1975).

4.1.4 Uso e manejo do solo

A manutenção da cobertura vegetal sobre o solo, isoladamente, é um importante fator no controle da erosão hídrica. A utilização de resíduos culturais como cobertura do solo é uma maneira simples, eficaz e econômica de se controlar a erosão, contudo, depende de fatores como o tipo, a quantidade e a porcentagem de cobertura vegetal, maneira de distribuição e estágio de decomposição desses resíduos no solo (LOPES et al., 1987).

Segundo Pruski (2009b) quanto mais protegida pela cobertura vegetal estiver a superfície do solo contra a ação da chuva, menor será a tendência de ocorrer erosão. Além de aumentar a quantidade de água interceptada, a vegetação amortece a energia do impacto das gotas de chuva reduzindo a destruição dos agregados, a obstrução dos poros e o selamento superficial do solo. A cobertura vegetal na superfície também reduz a velocidade do escoamento superficial pelo aumento da rugosidade hidráulica no seu percurso.

O efeito de diferentes culturas (diferentes densidades de vegetação) na perda de solo por erosão é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Efeito do tipo de cultura sobre as perdas por erosão.

Cultura	Perdas por ano	
	Solo	Água
	t ha ⁻¹	% de chuva
Mamona	41,5	12,0
Feijão	38,1	11,2
Mandioca	33,9	11,4
Amendoim	26,7	9,2
Arroz	25,1	11,2
Algodão	24,8	9,7
Soja	20,1	6,9
Batata	18,4	6,6
Cana-de-açúcar**	12,4	4,2
Milho	12,0	5,2
Milho + Feijão	10,1	4,6
Batata-doce	6,6	4,2

*Média de 1.300 mm de chuva e declividade entre 8,5 e 12,8%.

**Colheita manual, com queima da palhada e sem rotação de culturas.

Fonte: Bertoni et al (1972), adaptado.

A infiltração da água é influenciada pelo manejo da área, sendo que as práticas de preparo do solo, plantio e irrigação afetam as propriedades físicas do solo.

Um dos maiores avanços no processo produtivo da agricultura brasileira foi a introdução do Sistema Plantio Direto (SPD) no Sul do Brasil, a partir do início da década de 1970, tendo com objetivo básico inicial controlar a erosão hídrica. O desenvolvimento desse sistema só se tornou possível graças a um trabalho conjunto de agricultores, pesquisadores, fabricantes de semeadoras e técnicos interessados em reverter o processo acelerado de degradação do solo e da água verificado em nosso país (LOPES et al., 2004).

Segundo Shear (1968), o SPD consiste, basicamente, em eliminar a vegetação existente com um herbicida de ação pré-emergente, plantar a semente e colocar os fertilizantes para o desenvolvimento inicial, movimentando o solo o mínimo possível e efetuar a colheita deixando os restos de cultura na superfície do solo.

Em médio e longo prazo o SPD favorece o maior acúmulo de palha na superfície do solo, maiores taxas de infiltração (BARCELOS et al., 1999) e uma economia em torno de 14% (ANDRADE et al., 2002). Apresenta, ainda, uma menor desagregação das partículas e uma maior retenção de água (CARVALHO et al., 1999) com uma redução nas perdas de solo e água superior a 99% e 94%, respectivamente (SEGANFREDO et al., 1997) sendo que, em solos de igual declividade, Oliveira et al. (2002) encontraram valores de perdas iguais a 75% e 20% para solo e água, nesta ordem, quando comparados a áreas onde há revolvimento do solo.

No setor sucroenergético, as primeiras experiências publicadas com o SPD foram realizadas pela Cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Copersucar) baseado nos trabalhos de Peticarrari e Ide (1986). Apesar da cana ser uma cultura semiperene (ciclo de corte de quatro a seis anos, em média) é possível realizar a rotação de culturas. Neste caso, segundo Penariol e Segato (2007), a rotação pode ser feita com adubos verdes (crotalárias, lab-lab, mucunas, etc.) e principalmente espécies leguminosas, como amendoim e soja, nas áreas de reforma, durante a primavera/verão entre a colheita e o plantio da cana de ano e meio.

Em relação ao preparo convencional, ou seja, aração e gradagem, além do SPD da cana proporcionar redução no número de operações, tempo disponível de pessoal, equipamentos envolvidos e custos (47% em comparação com o convencional), ainda pode aumentar a produtividade (DALBEN et al., 1983; CRUZ, 2003).

A modificação do cenário no setor sucroenergético, com a implantação da colheita de cana crua e a adoção de sistemas de plantio conservacionistas (cultivo mínimo e plantio direto), acarreta significativas mudanças de paradigmas. Nesse contexto, a presente pesquisa se torna

viável no momento em que busca um enfoque nas relações entre conservação do solo, produção agrícola e rendimento operacional de máquinas, priorizando um processo baseado nessas recentes práticas de plantio e colheita.

4.2 Selamento superficial

O selamento superficial tem sido objeto de estudo desde o início dos trabalhos de Duley (1939) ao citar que o impacto das gotas sobre o solo reduz rapidamente a sua capacidade de infiltração, principalmente em superfícies descobertas, devido à formação de uma fina camada de solo, composta por partículas de pequeno diâmetro as quais reduzem a porosidade e o fluxo de água. Segundo Valentin e Bresson (1992), esse diâmetro pode variar de 0,1 mm até valores superiores a 50 mm.

A quebra de agregados e a coalescência do material sob impacto da gota de chuva, reduz a porosidade do solo na camada superior formando as crostas estruturais. Já as crostas sedimentares são formadas a partir da deposição de sedimentos e microagregados que dependem do fluxo e das condições que afetam a superfície de sedimentação, a taxa de escoamento, a velocidade de fluxo e a microtopografia. Geralmente, as crostas sedimentares são encontradas em depressões (áreas acumuladoras de água) e microdepressões, enquanto as crostas estruturais estão associadas com montes de solo (FOX et al., 1998).

Embora a espessura da camada selada geralmente seja pequena, seu efeito sobre as propriedades físicas do solo influenciam as condições de infiltração, uma vez que a condutividade hidráulica nessa camada pode ser de 200 a 2.000 vezes menor que a condutividade normal do solo (MCINTYRE, 1958). O rompimento dessa superfície encrostada tem efeito considerável, embora temporário, sobre o aumento da taxa de infiltração do solo (HARPER, 1937). Além disso, o selamento superficial limita, ainda, a emergência das plântulas, afetando sua sobrevivência (VALENTIN e BRESSON, 1992).

4.3 Infiltração da água no solo

O conceito de infiltração, ou movimento de água no solo, é datado do fim do século 19. De acordo com Brakensiek (1955) citado por Bertoni e Lombardi Neto (2010), Perrault e Mariotte foram, aparentemente, os primeiros a analisar a capacidade que o solo possui para infiltração. Entre 1817 e 1920, os órgãos governamentais americanos iniciaram consideráveis pesquisas hidrológicas culminando com a publicação dos trabalhos pioneiros de Meyer (1917) e Mead (1919).

Bennett (1939) descreve infiltração como o movimento da água superficial para dentro do perfil do solo através de aberturas podendo ser poros naturais, rachaduras, buracos feitos por raízes ou animais e cavidades introduzidas pelo cultivo. Sendo a água oriunda de chuva, irrigação ou derretimento de neve (HOUSER, 2003).

O movimento da água no solo não-saturado pode ser descrito pela equação de Darcy-Buckingham (BUCKINGHAM, 1907) que, na forma de diferenças finitas, é expressa pela eq. (3), sendo que o sinal negativo indica que o movimento se origina do maior para o menor potencial da água no solo.

$$q = - K(\theta) \frac{\Delta\Psi_t}{\Delta z} \quad (3)$$

onde:

q = fluxo, $L T^{-1}$;

$K(\theta)$ = função condutividade hidráulica para meio não-saturado, $L T^{-1}$;

Ψ_t = potencial total da água no solo, L ;

$\frac{\Delta\Psi_t}{\Delta z}$ = gradiente hidráulico, $L L^{-1}$.

O gradiente hidráulico é a variação do potencial total da água ao longo da profundidade percorrida pela infiltração, ou seja, é a força responsável pela infiltração.

De acordo com Reichardt (1996), o potencial total da água no solo é dado por:

$$\Psi_t = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_{os} + \Psi_m \quad (4)$$

onde:

Ψ_p = potencial de pressão, que surge quando a pressão que atua sobre a água no solo é maior que a atmosférica, L;

$\Psi_g = z$ = potencial gravitacional, que surge devido à presença do campo gravitacional terrestre, L;

Ψ_{os} = potencial osmótico, que surge quando a água no solo for uma solução de sais minerais e outros solutos, L;

Ψ_m = potencial matricial, que está associado à interação entre a matriz sólida do solo e a água, levando a pressões menores que a atmosférica, L.

A componente osmótica não é importante no estudo do movimento da água, salvo a existência de uma membrana semipermeável no sistema (REICHARDT, 1996).

Segundo Brandão et al. (2006), a equação de Darcy-Buckingham, eq. (3), é válida somente para condições em que há relação linear entre o fluxo e o gradiente hidráulico, fato este que só se verifica em regime de escoamento laminar. Quando o movimento da água através dos poros apresenta regime de escoamento turbulento, ou quando o fluxo é muito pequeno, esta relação deixa de ser linear.

A capacidade de infiltração de água representa a vazão máxima por unidade de área e por unidade de tempo capaz de atravessar a superfície do solo (VILLELA e MATTOS, 1975; HILLEL, 1980). Contudo, se a precipitação exceder essa capacidade, o excesso de água pode se acumular ou escoar na superfície (HOUSER, 2003). Com o aumento do tempo de aplicação de água (seja por irrigação ou precipitação) a capacidade de infiltração tende a diminuir, apresentando-se relativamente alta no início e reduzindo, gradativamente, até atingir um valor quase constante. Neste ponto, onde a variação é pequena, ela é denominada de Taxa de Infiltração Estável (Tie) (BERNARDO et al., 2006; BRANDÃO, 2006).

Segundo Paixão et al. (2009), o conhecimento da taxa de infiltração da água no solo auxilia na definição de técnicas de conservação do solo, planejamento e dimensionamento de sistemas de irrigação e drenagem, bem como na composição de uma imagem mais real da aeração e retenção de água no solo.

Segundo Bernardo et al. (2006), os valores de Tie em função da textura do solo são:

- Arenosa: 25 a 250 mm h⁻¹
- Franco-arenosa: 13 a 76 mm h⁻¹
- Franco-arenosa-argilosa: 5 a 20 mm h⁻¹
- Franco-argilosa: 2,5 a 15 mm h⁻¹

Para determinar a infiltração da água no solo e sua velocidade de infiltração podem ser empregados diversos métodos, como: o método da “entrada-saída” de água no sulco, o método do infiltrômetro de sulco, o método do infiltrômetro do anel e o método dos simuladores de chuva. Uma descrição detalhada desses métodos pode ser encontrada em Bernardo et al. (2006) e Brandão et al. (2006), sendo que uma análise comparativa entre eles é apresentada na segunda referência.

Bennett (1939) afirma que se houvesse a possibilidade do solo absorver toda a água precipitada, não existiria o escoamento superficial, portanto, não existiria o problema de erosão. Essa condição ideal só ocorreria em locais onde a geologia e os processos de formação do solo fossem constantes, além disso, todas as demais características do solo deveriam ser imutáveis. Certamente isso não ocorre em áreas naturais onde os processos de formação do solo são afetados devido ao manejo do local e também, em áreas declivosas e regiões tropicais com intensa precipitação, onde estes fatores restringem a total infiltração da água no solo.

4.3.1 Modelos de infiltração

Os modelos que descrevem a infiltração de água no solo utilizam bases empíricas ou teóricas. Os modelos empíricos têm a vantagem de permitir relacionar os parâmetros às características do solo sem que estes, obrigatoriamente, tenham significado físico, além de englobar na determinação de suas constantes alguns fatores que são difíceis de ser considerados nos modelos teóricos (por exemplo, a heterogeneidade do solo). A sua principal desvantagem é que os dados ajustados somente são válidos para as condições em que eles foram determinados, ou seja, não podem ser adotados em outros tipos de solos. Já os teóricos são baseados na teoria física do escoamento em meios porosos, que é descrita pela equação de Darcy-Buckingham ou mesmo pela equação de Richards, oriunda da primeira (BRANDÃO et al., 2006).

Modelos empíricos

Neste trabalho serão apresentados somente os modelos empíricos de Kostiaikov, Kostiaikov-Lewis, Horton e Holtan. As equações para estimar a taxa de infiltração em um determinado instante, conforme os modelos, são apresentadas através das eq. (5) (6) (7) e (8), respectivamente.

$$i = \kappa \alpha t^{\alpha-1} \quad (5)$$

$$i = \kappa \alpha t^{\alpha-1} + i_f \quad (6)$$

$$i = i_f + (i_i - i_f) e^{-\beta t} \quad (7)$$

$$i = i_f + (GI) P M^{1,4} \quad (8)$$

onde:

i = taxa de infiltração, $m s^{-1}$;

i_i = taxa de infiltração inicial, $m s^{-1}$;

i_f = taxa de infiltração final, $m s^{-1}$;

t = tempo, s;

α , β e κ = parâmetros determinados estatisticamente a partir de valores de infiltração acumulada (I) ou instantânea (i) e tempo (T), adimensional;

P = índice que representa a porosidade conectada à superfície e a densidade de raízes, que afetam a capacidade de infiltração, $m s^{-1} m^{-1,4}$. Valores desse índice podem ser encontrados em Rawls et al. (1996);

GI = índice de crescimento da cultura, varia de 0,1 a 1,0, adimensional; e

M = constantes de ajuste da equação, $L T^{-1}$.

Uma descrição mais elaborada desses modelos pode ser encontrada em Brandão et al. (2006).

Modelos teóricos

Serão aqui apresentados os modelos de Philip, Green-Ampt e Green-Ampt modificado por Mein e Larson nas equações (9) (10) (11), nesta ordem, destacando-se brevemente o último.

$$i = \frac{1}{2} f_1 t^{-1/2} + f_2 \quad (9)$$

$$i = K_s \left[1 + \Psi_f \frac{(\theta_s - \theta_i)}{F} \right] \quad (10)$$

$$i = K_s \left[1 + \frac{\Psi_f (\theta_s - \theta_i)}{F} \right] \quad (11)$$

onde:

i = taxa de infiltração, $m s^{-1}$;

f_1 = sortividade do fluxo, $m s^{-1/2}$. Indica a capacidade de um solo homogêneo absorver água considerando sua umidade inicial;

f_2 = parâmetro próximo da condutividade hidráulica do meio saturado (K_s) na superfície, $m\ s^{-1}$;

K_s = condutividade hidráulica do solo saturado, $m\ s^{-1}$;

Ψ_f = potencial matricial na frente de umedecimento, em módulo, m;

θ_s = umidade do solo saturado, $m^3\ m^{-3}$;

θ_i = umidade inicial do solo, $m^3\ m^{-3}$;

F = infiltração acumulada, m.

Dentre os modelos teóricos citados, o desenvolvido por Green-Ampt (1911), eq. (10), é o mais empregado. Este modelo é baseado na equação de Darcy e admite algumas premissas para seu desenvolvimento (PRUSKI et al., 1997). Contudo, segundo Brandão et al. (2006), o desenvolvimento desse modelo considera a existência de uma lâmina de água na superfície e a equação só é válida para condições após o empoçamento do solo.

Nesse contexto, Mein e Larson (1973) modificaram a equação de Green-Ampt para permitir sua aplicação em condições anteriores ao empoçamento da água na superfície do solo. Este novo modelo foi denominado modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson (GAML), eq. (11), e é uma das equações mais representativas da infiltração da água no solo (BRANDÃO et al., 2006).

Em suma, a equação de GAML é, na realidade, a equação de Green-Ampt com a escala de tempo transladada para considerar a infiltração de água no solo antes do empoçamento.

Uma descrição mais elaborada desses modelos pode ser encontrada em Brandão et al. (2006), incluindo os métodos desenvolvidos para determinar os parâmetros das equações de Green-Ampt e GAML.

4.3.2 Fatores que interferem e métodos para aumentar a infiltração

Rawls et al. (1996) dividem os parâmetros que interferem na infiltração da água no solo em fatores intrínsecos ao solo e os relacionados à superfície, manejo do solo e outros fatores, abordados nos tópicos subsequentes.

Fatores intrínsecos ao solo

Os fatores intrínsecos ao solo são aqueles relacionados às suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e biológicas.

Bennett (1939) cita que a variação na taxa de infiltração nos solos está relacionada com o volume total de poros e o tamanho médio das aberturas individuais.

Musgrave e Free (1937) encontraram taxas de infiltração variando entre $0,25 \text{ mm h}^{-1}$ e $20,82 \text{ mm h}^{-1}$, para diferentes tipos de solos nos EUA.

O aumento da proporção de silte no solo reduz a infiltração, uma vez que esta fração possui baixa potencialidade para formar agregados, além de pequeno diâmetro ($0,002$ a $0,05 \text{ mm}$), sendo facilmente deslocada para camadas inferiores do solo, onde acabam por entupir os poros. Solos de textura mais grossa (arenosos) possuem, em geral, maior quantidade de macroporos do que os de textura fina (argilosos), apresentando maiores condutividades hidráulicas e taxas de infiltração. Contudo, solos argilosos bem estruturados podem apresentar maior condutividade hidráulica em relação àqueles com estrutura instável exibindo maior taxa de infiltração (BRANDÃO et al., 2006), o que é confirmado por Ferreira (1988) ao demonstrar que a condutividade hidráulica nas condições de saturação para latossolos brasileiros aumenta com a elevação do teor de argila presente no solo. Conforme Cordeiro (1977) e Ferreira (1988), embora contrárias às generalizações, essas ocorrências são assíduas em latossolos e se devem à estrutura do solo, principalmente à sua macroporosidade e estabilidade dos agregados, estabelecidos pela presença de óxidos de ferro e alumínio (SHAINBERG e LEVY, 1995).

Segundo Brandão et al. (2006), para as condições brasileiras, a estrutura do solo pode exercer influência mais expressiva na taxa de infiltração de água do que a textura, sendo válida a generalização que solos com maior macroporosidade (arenosos e latossolos argilosos) apresentam maior infiltração que solos onde há predomínio de microporos (argilosos, excetuando-se os latossolos). Este fato é particularmente importante no setor sucroenergético, onde boa parte da produção encontra-se sobre latossolos. Desta forma, as práticas de conservação que vizam a redução do escoamento superficial são favorecidas, além da própria cultura que se beneficia com a maior taxa de água disponível para seu desenvolvimento.

Outros autores também avaliaram os efeitos dos fatores intrínsecos ao solo: textura (DAKER, 1970); estrutura (RESENDE et al., 1997); tamanho e disposição do espaço poroso (BAVER et al., 1972); mineralogia (FERREIRA, 1988); selamento superficial (PRUSKI et al., 1997); umidade inicial para solos com argilas expansivas (ARAÚJO FILHO e RIBEIRO, 1996; JABRO, 1996); além da metodologia utilizada para determinar a velocidade básica de infiltração (BRITO et al., 1996).

Fatores relacionados à superfície

A cobertura vegetal sobre a superfície protege o solo da ação direta da chuva e controla o fluxo de água acima do solo, provendo uma melhor oportunidade de absorção e prevenção da erosão (RAMSER, 1924; BENNETT, 1939). Essa cobertura, conforme Pavlychenco (1937), aumenta a matéria orgânica e o volume de poros do solo através do desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Assim, algumas áreas urbanizadas apresentam menores taxas de infiltração que áreas agrícolas por possuírem alta porcentagem de impermeabilização da superfície do solo (PRUSKI et al., 1997).

Segundo Barcelos et al. (1999), os restos culturais sobre a superfície do solo interceptam e dissipam a energia cinética da chuva e do escoamento superficial diminuindo a desagregação, o transporte de partículas e a velocidade de escoamento, prevenindo o selamento superficial e aumentando o tempo de contato da água com o solo, possibilitando, assim, maior infiltração de água.

Bezerra e Cantalice (2006) avaliaram a erosão em entressulcos para diferentes condições de cobertura do solo sob o cultivo de cana-de-açúcar. Concluíram que os resíduos da cana em contato direto com o solo destacaram-se no aumento da rugosidade hidráulica, enquanto o dossel, pela interceptação da chuva, retardou o início do escoamento superficial possibilitando maiores taxas de infiltração de água no solo e menores taxas de erosão em entressulcos.

Manejo do solo

O preparo do solo é uma prática que atua diretamente sobre sua estrutura que, por sua vez, interage ou afeta uma série de características do perfil modificando as variáveis a ela ligadas (VIEIRA, 1985).

De modo geral, quando são executadas as operações de preparo do solo, a capacidade de infiltração tende a aumentar devido à quebra da estrutura na camada superficial e ao movimento do solo nas camadas inferiores, gerando mais espaços porosos. Contudo, se esse preparo for realizado de forma inadequada através, por exemplo, da aração ou gradagem sempre na mesma profundidade (pé de arado) a capacidade de infiltração local poderá se tornar menor que a de um solo sem preparo, pois a compactação e a destruição da estrutura afetam essa infiltração, principalmente nos casos onde a cobertura vegetal foi removida.

Outras formas de se reduzir a capacidade de infiltração de um solo é com superpastoreio ou através do tráfego intenso de máquinas e veículos, principalmente em áreas com preparo convencional (PRUSKI et al., 1997).

Pesquisas têm evidenciado que, em plantio direto, o conteúdo de água do solo é maior que em áreas cultivadas com preparo convencional, vide trabalhos de Lal (1974), Vieira (1981), Sidiras et al. (1983), Salton e Mielniczuk (1995) e Barcelos et al. (1999).

Wu et al. (1992), comparando diferentes métodos de manejo de solo, relataram que no sistema plantio direto os poros conduzem a água mais eficientemente do que no preparo convencional. Desta forma, no sistema plantio direto, o solo, apesar de apresentar menor porosidade total, apresenta condutividade hidráulica igual ou superior à do preparo convencional.

Tomasini et al. (2010) avaliaram o efeito de diferentes sistemas de colheita (manual e mecanizada) de cana-de-açúcar (crua e queimada) sobre a infiltração de água no solo e verificaram a adequação dos modelos matemáticos para a estimativa da taxa de infiltração. Como resultados observaram que os maiores valores de taxa de infiltração foram obtidos na área onde se praticou a colheita manual de cana queimada, havendo redução de 72% na taxa de infiltração para colheita mecânica de cana crua e de 83% para colheita mecânica de cana queimada.

Braunack e Peatey (1999) e Luca et al. (2008) também verificaram o efeito do aumento da densidade do solo e de outras características físicas pelo uso de máquinas durante a colheita de cana-de-açúcar.

Outros fatores

A classe “Outros fatores” abrange os processos naturais, tais como a precipitação, congelamento do solo e as propriedades da água. Esses fatores interagem com os demais que também afetam a infiltração.

Lowdermilk (1929) avaliou o efeito do material em suspensão (para teores de silte variando de 1,7 a 1,9%) na taxa de infiltração e percolação de alguns solos dos Estados Unidos. Observou que a suspensão percolou nas colunas de solo com velocidade 10 vezes menor que a velocidade da água limpa. Concluiu ainda, que o solo em suspensão tinha se filtrado na superfície do solo, formando uma camada delgada de material de textura fina (silte e argila) que determinou a taxa de infiltração na coluna de solo. O mesmo autor confirma, em 1930, a susceptibilidade da taxa de infiltração à turbidez da própria água que atinge o solo, uma vez que a água limpa penetra no solo muito mais rápido que a turva.

As propriedades químicas da água (composição iônica e condutividade elétrica) interferem na infiltração na medida em que influenciam a dispersão das argilas. O aumento da condutividade elétrica da água, devido ao aumento da concentração de eletrólitos, atua

reduzindo a dispersão das argilas, o movimento de partículas e a formação do selamento superficial (SHAINBERG e LEVY, 1995).

4.4 Escoamento superficial

O empoçamento da água nas depressões da superfície do solo começa a ocorrer somente quando a intensidade de precipitação excede a velocidade de infiltração de água no solo ou quando sua capacidade de acumulação for excedida. Persistindo a chuva, a partir de um tempo $T = t_p$ (Figura 4.1) a taxa de infiltração (igualada-se à capacidade de infiltração) decresce com o tempo tendendo a um valor constante (condutividade hidráulica do solo saturado K_s). Esgotada essa capacidade, a água começa a escoar e, associado a esse escoamento, ocorre o transporte de partículas do solo, as quais podem sofrer deposição quando a velocidade do escoamento superficial for reduzida (PRUSKI et al., 1997, 2004; PRUSKI, 2009a).

Figura 4.1 – Variação da taxa de infiltração com o tempo sob condições de intensidade de precipitação constante (i_p).

Fonte: Pruski, (2009a), adaptado.

Nos condutos livres ou canais, a característica principal é a presença da pressão atmosférica atuando sobre a superfície do líquido. Em uma seção aberta, como nos canais de irrigação ou drenagem, ou fechada, como nos condutos de esgoto e galerias de águas pluviais, o escoamento se processa necessariamente por gravidade (PORTO, 2006).

No projeto de canais, diques ou outras obras no terreno, com intuito de controlar ou conduzir a água, é necessário ter informações dessa provável quantidade esperada. Quando o

objetivo é reter a água, conhecer o volume total esperado pode ser suficiente. Porém, o usual nos problemas conservacionistas é conduzir a água de um lugar para outro. Neste caso a intensidade da enxurrada é mais importante, particularmente, a enxurrada máxima que pode ocorrer (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

Em agricultura tem-se basicamente dois tipo de escoamento superficial: a) escoamento sobre uma grande superfície, o qual é retido em uma barreira física denominada terraço (infiltração, drenagem); b) escoamento dentro de um canal aberto (canal escoadouro, terraço de drenagem).

4.4.1 Representação matemática do escoamento sobre uma grande superfície

Dentre os métodos existentes para estimar a vazão máxima de escoamento superficial será apresentado o Método Racional proposto por Ramser (1927), através do qual o valor da vazão máxima de escoamento é determinado a partir de informações de chuvas para locais com área variando de 50 a 500 ha. O método está fundamentado nos seguintes princípios:

1. As precipitações deverão ter alta intensidade e curta duração, sendo a vazão máxima de escoamento superficial a que ocorrer quando a duração da chuva for igual ao tempo de concentração (t_c), situação na qual toda a área da bacia contribui com o escoamento na seção de desague;
2. A precipitação com duração igual à t_c ocorre, uniformemente, em toda a bacia;
3. Para um curto período de tempo, a variação da taxa de infiltração não deverá ser grande. Admite-se que durante o evento extremo o solo encontra-se saturado e, portanto, com taxa de infiltração estável, correspondendo à ocorrência de escoamento superficial;
4. Utilização de um único coeficiente de escoamento superficial, estimado com base nas características da bacia.

A vazão máxima (Q) é expressa pela eq. (12).

$$Q = \frac{C I A}{360} \quad (12)$$

onde:

Q = vazão máxima de escoamento superficial, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

I = intensidade máxima de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração da bacia, mm h^{-1} ;

A = área da bacia de drenagem, ha.

Segundo Smedema e Rycroft (1983), o Método Racional foi originalmente desenvolvido para estimar vazões máximas de escoamento em pequenas bacias. A ampliação do uso deste método para áreas agrícolas é apropriada para bacias que não excedam 200 ha, apesar disso, os autores afirmam que, devido à simplicidade de sua aplicação e a facilidade do conhecimento e controle dos seus parâmetros, seu uso se tornou bem difundido em estudos de pequenas bacias hidrográficas e áreas maiores que 500 ha. A forma de obtenção dos parâmetros da eq. (12) é apresentada na sequência.

Área da bacia de drenagem: determinada através do cálculo da área da bacia. Quando existir terraços, a área considerada é a seção entre os mesmos.

Coeficiente de escoamento superficial: o coeficiente C da equação de Ramser (1927) depende principalmente, da declividade do terreno e do tipo de cobertura do solo. Segundo Pruski (2009a), muitos são os procedimentos disponíveis para a sua obtenção, no entanto, o principal é a utilização de tabelas com valores pré-definidos pela literatura. Na Tabela 4.4 são apresentados os valores de C recomendados pelo *Soil Conservation Service (SCS) – United States Department of Agriculture (USDA)*.

Tabela 4.4 – Valores de C recomendados pelo *Soil Conservation Service* – USDA.

Cobertura do solo	Declividade (%)	Textura do solo		
		Arenosa	Franca	Argilosa
Florestas	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,25	0,35	0,50
	10 – 30	0,30	0,50	0,60
Pastagens	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,15	0,35	0,55
	10 – 30	0,20	0,40	0,60
Terras cultivadas	0 – 5	0,30	0,50	0,60
	5 – 10	0,40	0,60	0,70
	10 – 30	0,50	0,70	0,80

Fonte: *Soil Conservation Service* (SCS) citado por Pruski (2009a), adaptado.

Havendo variação do coeficiente de escoamento superficial ao longo da área analisada (pois esta pode estar sendo ocupada por mais de um tipo de cultura), o mesmo poderá ser determinado pela eq. (13):

$$C = \frac{\sum C_i S_i}{S_t} \quad (13)$$

onde:

C = coeficiente de escoamento superficial para a área de interesse, adimensional;

C_i = coeficiente de escoamento superficial para a subárea i, adimensional;

S_i = subárea considerada, m²;

S_t = área total considerada, m².

O coeficiente de escoamento superficial representa a relação entre o volume total precipitado e o volume de enxurrada. No Brasil, a literatura sobre conservação do solo recomenda valores de C baseada na indicação do *Soil Conservation Service* (Tabela 4.4) por seus valores serem consagrados pelo uso, entretanto, a aplicação indiscriminada de valores oriundos de um país de clima temperado e com solos diferentes dos brasileiros deveria ser evitada.

Outros métodos de cálculo de vazão desenvolvidos especificamente para as condições do nosso país possuem formulação complexa e são de difícil uso prático, o que tem justificado a adoção do Método Racional e a utilização do parâmetro C com base nos valores norte-americanos. Nesta pesquisa, porém, é importante fazer uma ressalva: o referido coeficiente é um fator multiplicativo e exerce influencia direta no resultado final da vazão máxima, podendo

levar a um dimensionamento equivocado das estruturas de conservação. Principalmente dos terraços, uma vez que a água infiltra em diferentes quantidades conforme as características intrínsecas do local e do nível de saturação do solo por ocasião de uma chuva intensa, condições estas muito distintas em uma região de solo e clima tropical.

Intensidade máxima de precipitação: é a intensidade média (i_m) observada para uma duração correspondente ao tempo de concentração (t_c) e para o período de retorno (T) estabelecido pelo projetista. Bertoni e Lombardi Neto (2010) definem tempo de concentração como o tempo que uma gota de água gasta para movimentar-se desde a parte mais longínqua da bacia até o ponto de desague. Schwab et al. (1966) recomendam um período de retorno de 10 anos para projetos de conservação do solo.

Porto (2000) afirma que a equação de Kirpich, utilizada para calcular o tempo de concentração foi desenvolvida a partir de informações de sete bacias agrícolas do Tennessee, EUA, com declividades variando entre três e 10 por cento (3-10%) e áreas de, no máximo, 0,5 km², empregados na eq. (14):

$$t_c = 57 \left(\frac{L_t^3}{H} \right)^{0,385} \quad (14)$$

onde:

t_c = tempo de concentração, min;

L_t = comprimento do talvegue, km;

H = diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue, m.

A relação entre intensidade de chuva e sua duração pode ser representada graficamente, colocando-se na ordenada os valores de intensidade, e, na abcissa, o tempo de duração. Para obter a curva, deve-se plotar grande número de pontos conseguidos com o registro de chuvas individuais; os valores numéricos de intensidades podem variar com as diferentes regiões climáticas de todos os países, porém a aparência da chuva é a mesma (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010). Essa relação entre intensidade de chuva e sua duração pode ser expressa matematicamente em várias formas (HUDSON, 1973), sendo a mais comum:

$$I = \frac{a}{t+b} \quad (15)$$

onde:

I = média de intensidade de chuva, mm h^{-1} ;

t = duração da chuva, min;

a e b = constantes ($a = 3.000$ e $b = 40$).

4.4.2 Representação matemática do escoamento em canais abertos

Neste item serão apresentados os modelos matemáticos para canais abertos, cujo escoamento seja permanente e uniforme. Porto (2006) afirma que este tipo de escoamento onde a velocidade média é constante só ocorre em condições de equilíbrio dinâmico, isto é, quando houver um balanceamento entre a força aceleradora e a força de resistência que tente sustar o movimento.

Os cálculos do escoamento em canais são baseados em equações de resistência, que são equações que ligam a perda de carga em um trecho à velocidade média ou vazão através de parâmetros geométricos e da rugosidade do perímetro molhado. A eq. (16) é conhecida como fórmula de Chézy, apresentada pelo engenheiro francês Antoine Chézy em 1769 e, é indicada para escoamentos turbulentos rugosos em canais.

$$V = C \sqrt{R_h D} \quad (16)$$

onde:

V = velocidade média do escoamento, m s^{-1} ;

C = coeficiente de resistência ou coeficiente de rugosidade, $\text{m}^{1/2} \text{s}^{-1}$;

R_h = raio hidráulico, m;

D = declividade do canal, m m^{-1} .

com

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad (17)$$

onde:

A_m = área molhada, m^2 ;

P_m = perímetro molhado, m.

Utilizando-se a equação da continuidade, a fórmula de Chézy torna-se a eq. (18), equação empregada para escoamento permanente uniforme em canais.

$$Q = C S \sqrt{R_h D} \quad (18)$$

onde:

Q = vazão do escoamento permanente uniforme, $m^3 s^{-1}$;

S = área molhada, m^2 .

C = coeficiente de resistência ou coeficiente de rugosidade, $s m^{-1/3}$;

R_h = raio hidráulico, m ;

D = declividade do canal, $m m^{-1}$.

A equação denominada fórmula de Manning, proposta pelo engenheiro irlandês Robert Manning em 1889, é válida para os escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos, com grande número de Reynolds, apresentada na eq. (19).

$$V = \frac{1}{n} (R_h^{2/3}) (D^{1/2}) \quad (19)$$

onde:

V = Velocidade média do escoamento, $m s^{-1}$;

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $s m^{-1/3}$, Tabela 4.5;

R_h = raio hidráulico, em m ;

D = declividade do canal, $m m^{-1}$.

Tabela 4.5 – Valores de coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning.

Material	n
Concreto	0,012
<i>Canais de terra</i>	
Fundo limpo e fluxo retilíneo	0,030
Fundo limpo e fluxo curvilíneo	0,040
Fluxo curvilíneo e vegetação baixa	0,050
Fundo e laterais com vegetação densa	0,100
Pastagem	0,035
Áreas agrícolas	0,040

Fonte: Chow (1959), adaptado.

Outros valores do coeficiente de rugosidade de Manning podem ser encontrados, também, em Chow (1959), Beasley (1972), Porto (2006) dentre outros.

Para o cálculo da vazão de escoamentos livres, Porto (2006) recomenda a eq. (20).

$$Q = \frac{S (R_h^{2/3}) (D^{1/2})}{n} \quad (20)$$

onde:

Q = vazão do escoamento permanente uniforme, $m^3 s^{-1}$;

S = área molhada, m^2 .

R_h = raio hidráulico, m ;

D = declividade do canal, $m m^{-1}$;

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $s m^{-1/3}$, Tabela 4.5.

Os escoamentos em canais podem ter como parâmetros de variabilidade o espaço e o tempo, isto é, características hidráulicas como altura d'água, área molhada e raio hidráulico podem variar no espaço (de seção para seção) e no tempo (PORTO, 2006).

Quando o critério comparativo é o tempo, os escoamentos podem ser permanentes ou não permanentes e, em relação ao espaço, uniformes ou não uniformes/variados. Porto (2006) descreve, com detalhes, os tipos de escoamentos superficiais.

O número de Reynolds (Rey) permite classificar os escoamentos livres em três tipos: laminar ($Rey < 500$), de transição ($Rey > 500$) e turbulento ($Rey > 2.000$). Este número expressa à relação entre as forças de inércia e viscosa e, para o estudo de canais, é calculado conforme a eq. (21).

$$Rey = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V R_h}{\nu} \quad (21)$$

onde:

ρ = massa específica do fluido, $g cm^{-3}$;

V = velocidade média do escoamento, $m s^{-1}$;

L = dimensão geométrica característica, m ;

μ = viscosidade dinâmica do fluido, $Pa s^{-1}$;

R_h = raio hidráulico da seção, m ;

ν = viscosidade cinemática do fluido, $m^2 s^{-1}$.

Porto (2006) afirma, também, que outro fator adimensional importante em estudos de canais é o número de Froude, definido como a raiz quadrada da relação entre a força de inércia e a força da gravidade, expresso na eq. (22).

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho V^2 L^3}{\rho L^3 g}} = \frac{V}{\sqrt{gL_c}} \quad (22)$$

onde:

ρ = massa específica do fluido, g cm^{-3} ;

V = velocidade média do escoamento, m s^{-1} ;

L = dimensão geométrica característica, m;

L_c = dimensão característica do escoamento, m;

g = aceleração da gravidade, m s^{-2} ;

Segundo o referido autor, é comum definir como dimensão característica a altura hidráulica da seção (H_m), de modo que o número de Froude é representado como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH_m}} \quad (23)$$

onde:

V = velocidade média do escoamento, m s^{-1} ;

H_m = altura hidráulica da seção, m;

g = aceleração da gravidade, m s^{-2} ;

com

$$H_m = \frac{A}{B} \quad (24)$$

onde:

A = área molhada, m^2 ;

B = largura da seção na superfície livre, m.

O número de Froude é usado para classificar os escoamentos livres em três grupos: escoamento subcrítico ou fluvial, $Fr < 1$; escoamento crítico, $Fr = 1$; e escoamento supercrítico ou torrencial, $Fr > 1$. Essa classificação permite, em princípio, uma avaliação do potencial de erosão nos canais abertos.

O escoamento em canais abertos pode ocorrer em dois tipos de problemas práticos, cuja representação matemática de dimensionamento é distinta. No primeiro caso, tem-se o escoamento em canais cuja a área da seção é conhecida a priori, ou seja, a forma geométrica e respectivas dimensões são conhecidas. No segundo caso, a área da seção é uma incógnita a ser dimensionada, como por exemplo nos canais escoadouros. Este conhecimento é importante para o dimensionamento das estruturas de conservação, terraços de infiltração ou drenagem, garantindo sua funcionalidade.

Canais abertos de seção desconhecida

Logo, na sequência, será apresentada a modelagem para canais de seção desconhecida.

A eq. (25) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{n Q}{\sqrt{D}} = S R_h^{2/3} \quad (25)$$

Nesta, os termos do lado esquerdo são os parâmetros necessários para o dimensionamento da seção, enquanto o lado direito é meramente geométrico. Evidentemente, escolhida uma determinada forma geométrica, existirá mais de uma combinação entre os elementos da seção (largura de fundo, altura d'água, dentre outros) que satisfaça a eq. (25). Sendo assim, o cálculo de canais em regime uniforme é predominantemente um problema geométrico (PORTO, 2006).

Dentre os elementos da seção, será apresentada a modelagem matemática para a determinação da altura d'água (y_0).

$$y_0 = \frac{M}{K} \quad (26)$$

onde

M = coeficiente dinâmico; e

K = coeficiente de forma.

Assim, temos:

$$M = \left(\frac{nQ}{\sqrt{D}} \right)^{3/8} \quad (27)$$

onde:

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $s \, m^{-1/3}$, Tabela 4.5, página 42;

Q = vazão de escoamento no canal, $m^3 s^{-1}$;

D = declividade do canal, $m m^{-1}$.

$$K = \left[\frac{(m+Z)^{5/3}}{\left(m+2\sqrt{1+Z^2} \right)^{2/3}} \right]^{3/8} \quad (28)$$

onde:

$$m = \frac{b}{y_0};$$

b = largura da seção, m; e

Z = inclinação do talude ou $\cotg \alpha$, adimensional..

O coeficiente de forma K é apresentado por Porto (2006) para diversos valores de m e de Z (Tabela 8.2, página 268 da referência citada). Nesta tabela, para $Z = 0$ e $m = 0$, têm-se respectivamente, os valores do coeficiente de forma para a seção retangular e triangular.

Canais abertos de seção conhecida

Para canais cuja seção é conhecida, Porto (2006) recomenda o dimensionamento da seção trapezoidal e retangular, pela eq. (29).

$$\frac{nQ}{b^{8/3}\sqrt{D}} = \left(\frac{y_0}{b} \right)^{5/3} * \frac{[1 + (\frac{y_0}{b})Z]^{5/3}}{(1 + 2(\frac{y_0}{b})\sqrt{1+Z^2})^{2/3}} \quad (29)$$

onde:

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $s m^{-1/3}$, Tabela 4.5, página 42;

Q = vazão de escoamento no canal, $m^3 s^{-1}$;

b = largura da seção menor do trapézio, m;

D = declividade do canal, $m m^{-1}$;

y_0 = altura da água, m;

Z = inclinação do talude, adimensional.

Admitindo-se:

$$K_2 = \frac{nQ}{b^{8/3}\sqrt{D}} \quad (30)$$

onde:

K_2 = coeficiente de forma;

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $s\ m^{-1/3}$, Tabela 4.5, página 40;

Q = vazão de escoamento no canal, $m^3\ s^{-1}$;

b = largura da seção menor do trapézio, m;

D = declividade do canal, $m\ m^{-1}$.

O coeficiente K_2 é apresentado por Porto (2006), para diversos valores de y_0/b e para cada inclinação de talude (Tabela 8.3, página 270 da referência citada).

Assim, surge um espaço para uma investigação científica no intuito de se aplicar os conceitos de canais abertos na drenagem do excesso da água, nas áreas de plantio no setor sucroenergético.

4.5 Modelos para estimar a erosão e o transporte de sedimentos

No início dos estudos sobre a erosão do solo, os trabalhos limitavam-se ao entendimento e descrição dos fatores que afetavam os processos erosivos.

Cook (1936) já havia reconhecido, naquela época, a complexidade do fenômeno erosivo, inclusive a independência de escala dos processos hidrológicos e sedimentológicos dentro de uma bacia. O autor foi também o pioneiro na definição dos principais fatores que atuam no processo de erosão, como a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo e a proteção da cobertura vegetal. Ellison e Ellison (1947) foram os primeiros a separar o termo erosividade quanto à capacidade de desprendimento e de transporte propondo, inclusive, funções para cada um deles.

Trabalhos experimentais desenvolvidos no Meio-Oeste dos Estados Unidos, entre 1940 e 1954, resultaram na obtenção de equações de perda de solo que incluíam os efeitos do comprimento e da declividade da encosta, das características do solo, das práticas conservacionistas e das condições de uso e manejo. Em 1946, um comitê reuniu-se nos EUA com a finalidade de revisar os fatores da última equação gerada e os dados existentes no país que, após incluir o fator chuva, deu origem a uma nova equação de perda de solo conhecida como equação de Musgrave (1947). Mais tarde (1954 - 1965), através do esforço de agências

de pesquisa e extensão norte-americanas para revisão dessas equações, foi proposto um novo modelo empírico denominado Equação Universal de Perdas de Solo/*Universal Soil Loss Equation* – USLE (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Na sequência à publicação do *Agriculture Handbook 537* (Wischmeier e Smith, 1978), pesquisas continuaram sendo realizadas objetivando melhorar os valores estimados de perda de solo pela USLE e, após uma revisão detalhada, foi desenvolvido um novo modelo de predição de erosão denominado Equação Universal de Perdas de Solo Revisada/*Revised Universal Soil Loss Equation* – RUSLE (RENARD et al., 1997).

Frente à limitação dos modelos de base empírica, as pesquisas avançaram na busca de uma alternativa para estimar as perdas de solo com base em processos erosivos e hidrológicos, os quais governam o desprendimento, arraste e deposição das partículas de solo. Essa modelagem foi iniciada na metade da década de 1980 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos/*United States Department of Agriculture* – USDA que iniciou o *Water Erosion Prediction Project* – WEPP (UNITED... USDA, 1995).

Atualmente, existe uma ampla gama de modelos usados na simulação do transporte de sedimentos e poluentes que se diferenciam em termos de complexidade, processo físico simulado e dos dados necessários à calibração para seu uso. De modo geral, não existe o “melhor” modelo para todas as aplicações sendo o mais apropriado dependente da finalidade de uso e das características do local (MERRITT et al., 2003).

Os autores supracitados afirmam que os modelos podem ser divididos em três categorias principais: empíricos ou estatísticos, conceituais e modelos de base física. A distinção entre eles não é rígida, podendo, às vezes, ser subjetiva. Um modelo pode possuir vários módulos, cada um deles pertencente a uma categoria específica podendo ser considerados híbridos. Por exemplo, o componente para determinação do escoamento superficial é de base física ou conceitual, enquanto uma relação empírica é usada para modelar a erosão (MERRITT et al., 2003; AKSOY e KAVVAS, 2005; AMORIN et al., 2009).

Os modelos empíricos podem ser considerados os mais simples das três categorias e, de acordo com Wheeler et al. (1993), são baseados na análise das observações procurando caracterizar respostas a partir desses dados. As ferramentas computacionais, bem como os parâmetros de entrada, são mais simples quando comparados aos demais. Jakeman et al. (1999) afirmam que a característica dessa classe de modelos é o seu elevado grau de agregação espacial e temporal e a incorporação de um pequeno número de variáveis causais.

Os modelos empíricos sofrem frequentes críticas por adotar suposições irreais sobre os processos físicos do sistema, os quais ignoram a heterogeneidade da captação, os dados de

entrada e características do ambiente, tais como tipo de solo e chuva e as não linearidades existentes na captação de água (WHEATER et al., 1993). Mesmo assim, são frequentemente utilizados em preferência a modelos mais complexos, visto que podem ser implementados para situações nas quais os parâmetros de entrada são limitados e, além disso, são particularmente úteis como uma primeira ferramenta para identificar a origem dos sedimentos (MERRITT et al., 2003).

Modelos conceituais são baseados na representação da captação de água como uma série de armazenamentos internos. Geralmente incorporam os mecanismos de transferência de sedimentos e de escoamento superficial em sua estrutura, representando desta forma o fluxo de água na área de captação como uma série de armazéns os quais requerem alguma caracterização do seu comportamento dinâmico. Esses modelos tendem a incluir uma descrição geral da captação sem incluir os detalhes específicos das interações dos processos que necessitam de informações detalhadas da bacia hidrográfica (SOROOSHIAN, 1991; MERRITT et al., 2003; AKSOY e KAVVAS, 2005). Dessa forma, permite que forneçam uma indicação dos efeitos quantitativos e qualitativos das mudanças no uso do solo, sem a necessidade de grandes quantidades de dados de entrada distribuídos temporalmente e espacialmente (MERRITT et al., 2003).

Devido ao fato de que os parâmetros são obtidos através da comparação dos dados calibrados com os dados observados, os modelos conceituais tendem a apresentar problemas na identificação de seus valores (JAKEMAN e HORNBERGER, 1993).

Torsen et al. (2001) afirmam que a capacidade de predição dos modelos empíricos e conceituais para avaliar os impactos das práticas agrícolas alternativas é questionável devido à natureza semiempírica da descrição do processo. Entretanto, outros autores argumentam que, quando utilizados para as condições nas quais foram desenvolvidos, podem ser mais precisos do que aqueles com maiores complexidades (FERRO e MINACAPILLI, 1995; LETCHER et al., 1999).

Os modelos de base física são fundamentados na solução de equações matemáticas que representam fenômenos físicos como o escoamento de água e a geração de sedimentos em uma bacia hidrográfica e, para isso, são utilizadas equações como a de conservação de massa e quantidade de movimento, para o escoamento superficial, e a de conservação de massa, para a geração de sedimento (BENNETT, 1974).

A derivação de expressões matemáticas que descrevem processos individuais nesses modelos está sujeita a várias hipóteses que podem não ser relevantes em muitas situações reais (DUNIN, 1975). Em geral, as equações que regem os modelos de base física são derivadas em

pequena escala e sobre condições físicas muito específicas (BEVEN, 1989). Seyfried e Wilcox (1995) afirmam que os parâmetros calibrados em modelos de pequena escala podem perder significado físico em escalas maiores.

Cada tipo de modelo serve a um propósito, portanto, não existe um que possa categoricamente ser indicado como mais apropriado para todos os casos. Ao escolher um que seja satisfatório para dada situação, as necessidades do modelo em termos de dados e sua disponibilidade no local onde se deseja utiliza-lo devem ser levadas em consideração (JAKEMAN e HORNBERGER, 1993; MERRITT et al., 2003; AKSOY e KAVVAS, 2005; AMORIN et al., 2009). Os autores afirmam, ainda, que a preferência dos pesquisadores por certo tipo de modelo baseia-se em dois pontos de vista: a ênfase no processo modelado ou nos resultados do modelo.

Existem poucos trabalhos publicados na literatura que revisam os modelos de erosão e transporte de sedimentos, como: Zhang et al. (1996), Bryan (2000), Singh e Woolhiser (2002), Merritt et al. (2003) e Aksoy e Kavvas (2005), que descrevem, exemplificam e comparam os principais métodos utilizados.

Como já mencionado previamente, os modelos de erosão vêm sendo estudados e aperfeiçoados durante muito tempo com o intuito de prever a perda de solo pela erosão, sendo comumente utilizados a Equação Universal de Perdas de Solo – USLE (empírico), a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – RUSLE (empírico/conceitual) e o *Water Erosion Prediction Project* – WEPP (base física) que serão abordados nas seções subsequentes.

4.5.1 Equação Universal de Perdas de Solo – USLE

A Equação Universal de Perda de Solo (USLE) é considerada como um dos progressos mais significativos na conservação do solo e da água no século 20. É uma técnica aplicada em todos os continentes da Terra, onde a erosão do solo causada pela água é um problema. É um modelo empírico que se desenvolveu numa forma evolutiva nos últimos 60 anos e ainda está passando por uma evolução através de revisões (LAFLEN e MOLDENHAUER, 2003).

Foi desenvolvida, a partir de 1950, por W. H. Wischmeier, D. D. Smith e outros pesquisadores do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos/*United States Department of Agriculture* – USDA, do Serviço de Pesquisa Agrícola/*Agriculture Research Service* – ARS, do Serviço de Conservação do Solo/*Soil Conservation Service* – SCS e da Universidade de

Purdue/*Purdue University*. Sua aplicação no campo iniciou-se por volta de 1960 e, após cinco anos, foi publicada pela primeira vez no *Agriculture Handbook 282*, que serviu como manual de referência da USLE até sua revisão, resultando na publicação do *Agriculture Handbook 537* organizado por Wischmeier e Smith em 1978 (ELLIOT et al., 1989; LAFLEN e MOLDENHAUER, 2003).

A USLE é utilizada para estimar a erosão entressulcos e no sulco pelo efeito de fatores que representam o solo, clima, topografia, uso e manejo do solo (NEARING et al., 1990; LANE et al., 1992). Wischmeier e Smith (1978) desenvolveram a USLE (eq. 31), para a estimativa da perda média anual de solo, obtida a partir de observações de perda de solo em mais de 10.000 parcelas-padrão de 0,008 ha (3,5 m de largura x 22,1 m de comprimento) e 9% de declividade.

No Brasil, os trabalhos iniciais sobre a equação de perdas de solo foram desenvolvidos por Bertoni et al. (1975), utilizando os dados existentes para as condições do Estado de São Paulo. A partir desta data, diversos autores vêm tentando avaliar os fatores da equação para outras regiões.

$$E = R K L S C P \quad (31)$$

onde:

E = perda de solo média anual, t ha⁻¹ ano⁻¹;

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

K = fator erodibilidade do solo, t ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ ha h;

L = fator comprimento do terreno, adimensional;

S = fator declividade do terreno, adimensional;

C = fator uso e manejo do solo, adimensional;

P = fator práticas conservacionistas, adimensional.

Na sequência, são apresentados os fatores que compõem a USLE.

Fator erosividade da chuva (R)

O fator erosividade (R) é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva, em dada localidade, de causar erosão em uma área sem proteção.

Wischmeier e Smith (1958) analisando a relação entre as diferentes características físicas da chuva e as perdas de solo nos Estados Unidos, com o objetivo de estabelecer um índice de erosividade que melhor estimasse a capacidade da chuva em provocar erosão, verificaram que a perda de solo provocada pelas chuvas em áreas cultivadas apresentou elevada

correlação com o produto de duas características intrínsecas à chuva: energia cinética total e intensidade máxima em 30 minutos. Esse produto foi denominado índice EI_{30} representando pela eq. (2), descrita no item 4.1.1 desta pesquisa, sendo este responsável por explicar 72% a 97% das perdas de solo causadas pela chuva.

Segundo Lal (1976), o EI_{30} subestima a erosividade das chuvas em regiões tropicais, o que tem contribuído para o desenvolvimento de outros índices de erosão.

No Brasil, Lombardi Neto e Moldenhauer (1980), utilizando 22 anos de registros de precipitação de Campinas-SP, encontraram alto coeficiente de correlação para a regressão linear entre o índice médio mensal de erosão e o coeficiente de chuva. A relação obtida é expressa na eq.(32).

$$EI = 67,355 (r^2/P)^{0,85} \quad (32)$$

onde:

EI = média mensal do índice de erosão, $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$;

r = precipitação média mensal, mm;

P = precipitação média anual, mm.

Lombardi Neto et al. (1980), utilizando a eq.(32), estabeleceram os valores de EI_{30} para 115 localidades previamente escolhidas no Estado de São Paulo.

Após uma atualização do modelo, Lombardi Neto et al. (2000) apresentam a eq. (33) para a determinação da erosividade da chuva.

$$EI = 89,823 (r^2/P)^{0,759} \quad (33)$$

onde:

EI = média mensal do índice de erosão, $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$;

r = precipitação média mensal, mm;

P = precipitação média anual, mm.

O modelo utiliza o conceito de precipitação média mensal e precipitação média anual, contudo sabe-se, da prática, que o maior fator de risco de erosão está associado a uma chuva intensa no período em que o solo está exposto, quando da adoção de técnicas de preparo convencional. Isso é particularmente verdadeiro na cultura da cana-de-açúcar onde a perda de solo durante a etapa de plantio (áreas novas ou reforma) é confirmada na estação chuvosa.

Fator erodibilidade do solo (K)

O significado de erodibilidade do solo é diferente de erosão do solo. A intensidade de erosão de uma área qualquer pode ser influenciada mais pelo declive, características da chuva, cobertura vegetal e manejo do solo, do que pelas propriedades do solo. Contudo, alguns solos são mais facilmente erodíveis do que outros, mesmo quando todas as características anteriores são mantidas. Essa diferença, devido às propriedades inerentes ao solo, é designada erodibilidade (FOSTER et al., 1981).

As propriedades do solo que influenciam a erodibilidade pela água são as que afetam a velocidade de infiltração, a permeabilidade, a capacidade total de armazenamento de água e resistência às forças de dispersão, o salpico, a abrasão, o transporte pela chuva e o escoamento (WISCHMEIER e SMITH, 1960).

De acordo com as normas estabelecidas durante o surgimento da USLE, o fator K é um valor quantitativo determinado em parcelas experimentais padronizadas (com comprimento de 22,1 m e declividade de 9%) de perda de solo, nas quais este é preparado de forma convencional (uma aração e duas gradagens).

Medidas experimentais dos valores de K, conforme essas normas são onerosas e requerem muitos anos de avaliação, além de ser difícil isolar os efeitos de outros fatores. Tais motivos tornaram necessária a estimativa da erodibilidade por outros meios (MIDDLETON, 1930; OLSON e WISCHMEIER, 1953; BARNETT e ROGERS, 1966; WISCHMEIER e MANNERING, 1969; WISCHMEIER et al., 1971).

Lombardi Neto e Bertoni (1975b) avaliaram 66 perfis de solo no Estado de São Paulo. Os autores consideraram os valores obtidos como uma estimativa do fator erodibilidade do solo, conforme a Tabela (4.6).

Tabela 4.6 – Relação de erosão dos horizontes superficiais e subsuperficiais para várias unidades de dois agrupamentos de solo do Estado de São Paulo.

Solo	Relação de erosão	
	Horizonte (Mg MJ ⁻¹ h mm ⁻¹)	
	Superfície	Subsuperfície
COM B TEXTURAL		
Podzolizados com cascalho	0,055	0,027
Podzolizados Lins e Marília, variação Marília	0,049	0,023
Podzólico vermelho-amarelo, variação Laras	0,043	0,046
Podzolizados Lins e Marília, variação Lins	0,035	0,023
Podzólico vermelho-amarelo, orto	0,034	0,018
Podzólico vermelho-amarelo, variação Piracicaba	0,028	0,019
Mediterrâneo vermelho-amarelo	0,023	0,021
Terra roxa estruturada	0,018	0,011
COM B LATOSSÓLICO		
Latossolo vermelho-amarelo, orto	0,022	0,009
Latossolo vermelho-escuro, fase arenosa	0,017	0,012
Latossolo vermelho-amarelo, fase rasa	0,017	0,022
Latossolo vermelho-escuro, orto	0,015	0,005
Solos de Campos do Jordão	0,015	0,013
Latossolo vermelho-amarelo, fase arenosa	0,013	0,007
Latossolo vermelho-amarelo, fase terraço	0,012	0,003
Latossolo Roxo	0,012	0,004
Latossolo vermelho-amarelo húmico	0,011	0,004

Fonte: Lombardi Neto e Bertoni (1975b), adaptado.

Denardin (1990) apresenta um método para determinação da erodibilidade do solo através de parâmetros físicos e químicos do solo, representado pela eq. (34).

$$K = 0,000000748 M + 0,004448059 p - 0,06631175 DMP + 0,01039567 X32 \quad (34)$$

onde:

M = novo silte (novo silte + nova areia);

p = permeabilidade codificada, segundo Wischmeier et al. (1971);

DMP = diâmetro médio ponderado das partículas do solo inferiores a 2,00 mm; e

X32 = nova areia (MO/100).

Fator comprimento e declividade do terreno (LS)

A intensidade da erosão hídrica é afetada tanto pela distância ao longo da qual se processa o escoamento, quanto pela declividade do local, representada pelos fatores L e S, respectivamente. Na prática, esses dois efeitos são considerados de maneira conjunta por meio de um termo designado fator topográfico LS, o qual representa a relação entre as perdas de solo em uma área com declividade e comprimento quaisquer e as perdas que ocorrem na parcela padrão (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Wischmeier e Smith (1978) recomendam o cálculo do fator LS pela eq. (35).

$$LS = \left(\frac{L}{22,13} \right)^m (65,41 \sin^2 \alpha + 4,56 \sin \alpha + 0,065) \quad (35)$$

onde:

L = comprimento da encosta, m;

α = ângulo de declive da encosta, graus;

m = parâmetro de ajuste que varia em razão da declividade da encosta, admitindo-se 0,5 para declividade maior ou igual a 5%, de 0,4 para declividade de 3,5 a 4,5%, de 0,3 para declividade de 1 a 3% e de 0,2 para declividade menor que 1%.

No Brasil, para o cálculo do LS, Bertoni (1959) ajustou uma equação, eq. (36), utilizando-se de dados de perdas de solo por erosão obtida nos principais tipos de solos do Estado de São Paulo com base em uma média de 10 anos de observações em talhões de diferentes comprimentos e declividades. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), para áreas terraceadas, o comprimento do declive a usar no valor LS nessa equação é o intervalo entre terraços.

$$LS = 0,00984 L^{0,63} G^{1,18} \quad (36)$$

onde:

L = comprimento da encosta, m;

G = grau de declividade, %.

O fator LS é considerado único na prática, contudo, o efeito do comprimento e da declividade do terreno tem importância distinta para o cálculo desse parâmetro. O valor de declividade é elevado a um expoente cujo índice é praticamente o dobro do índice ao qual o comprimento é submetido.

Nesse contexto, o fator LS do modelo USLE pode ser alterado com o sentido de sulcação da área. Adotando-se, por exemplo, uma área de plantio com 8% de declividade, 100 metros de comprimento de rampa e 1.000 metros de largura, como a apresentada esquematicamente na Figura 4.2, tem-se para a condição de sulcação em nível o valor do parâmetro LS de 2,08. Entretanto, modificando o projeto ao construir as linhas de plantio com uma declividade fixa de 2% e admitindo que o escoamento superficial flui dentro dos canais da área pisoteada pelas máquinas e equipamentos, o novo valor do parâmetro LS é 1,73, ou seja, 17% menor que na condição original. Sendo o LS um fator multiplicativo na USLE, haverá uma redução nas perdas totais de solo quando calculada por esse modelo empírico.

Figura 4.2 – Efeito da declividade do terreno no valor do LS, parâmetro do modelo USLE.

Fator uso e manejo do solo (C)

O fator C é a relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto e cultivado (WISCHMEIER e SMITH, 1965). Esse fator mede o efeito combinado de todas as relações das variáveis de cobertura e manejo do solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

Segundo Wischmeier (1960), a proteção oferecida pela cobertura vegetal durante o seu ciclo vegetativo é gradual. Para fins práticos, dividiu-se o ano agrícola em cinco períodos ou estádios da cultura, definidos de tal modo que os efeitos de cobertura e manejo possam ser considerados, aproximadamente, uniformes dentro de cada período:

Período D – preparo do solo: do preparo ao plantio;

Período 1 – plantio: do plantio a um mês após o plantio;

Período 2 – estabelecimento: do fim do período 1 até dois meses após o plantio;

Período 3 – crescimento e manutenção: de dois meses após o plantio até a colheita;

Período 4 – resíduo: da colheita até o preparo do solo.

Bertoni e Lombardi Neto (2010) apresentam os dados preliminares obtidos da análise de perdas de solo e enxurrada efetuados pela Seção de Conservação do Solo do Instituto Agrônomo de São Paulo, podendo ser visualizados na Tabela (4.7).

Tabela 4.7 – Razão de perdas de solo entre área cultivada e área continuamente descoberta.

Cobertura, sequência e manejo	Produtividade	Razão de perdas de solo por período de estágio de cultura*				
		%				
		D	1	2	3	4
Milho, contínuo, palha queimada	Média	37	30	21	6	1
Milho, contínuo, palha enterrada	Média	23	19	17	4	2
Milho, contínuo, palha superfície	Média	-	5	2	1	1
Algodão, contínuo, convencional	Média	40	60	40	50	20
Soja, contínuo, convencional	Média	35	30	20	20	5
Pasto (1º ano) rotação	-	-	-	40	-	-
Pasto (2º ano) rotação	-	-	-	0,4	-	-
Milho, rotação, após pasto	Média	10	11	8	4	1
Milho, rotação, plantio direto após pasto	Média	-	8	5	3	1
Soja, rotação após milho	Média	15	12	20	4	3
Soja, rotação plantio direto após milho	Média	-	8	10	4	3
Algodão, rotação após soja	Média	20	20	30	15	13
Cana-de-açúcar (1º ano) convencional	Média	-	-	15	-	-
Cana-de-açúcar (2º ano)	Média	-	-	0,15	-	-

*Dados preliminares da Seção de Conservação do solo do Instituto Agrônomo de Campinas.

Fonte: Bertoni e Lombardi Neto (2010), adaptado.

Segundo Foster (1982), o efeito da cobertura vegetal do solo sobre a erosão pode ser concebido como: Tipo I (C_{I1}), relativo à cobertura vegetal oferecida pelo dossel; tipo II (C_{I2}),

relativo à cobertura vegetal em contato direto com a superfície do solo, e tipo III (C_{iIII}), efeito da incorporação de resíduos vegetais ao solo em função do seu uso e manejo. Laflen et al. (1985) afirmam que o efeito tipo I é aquele devido à interceptação das gotas da água da chuva pelo dossel ou parte aérea das culturas, o qual é dependente da altura e da densidade do dossel. A cobertura em contato direto com a superfície do solo, efeito tipo II, permite que a energia cinética das gotas da chuva seja dissipada junto à superfície, além de ser obstáculo à ação cisalhante da enxurrada (FOSTER, 1982; BRAIDA & CASSOL, 1999). Segundo Wischmeier (1975), o efeito tipo III é aquele resultante dos resíduos incorporados e do efeito residual do uso e do manejo do solo na desagregação e no transporte de sedimentos erodidos. Braida e Cassol (1999) afirmaram que o efeito II possibilita maior controle do processo de erosão do que o efeito I.

Assim, o fator cobertura e manejo (C_i) pode ser estimado, segundo Foster (1982), pela eq. (37).

$$C_i = C_{iI} C_{iII} C_{iIII} \quad (37)$$

onde:

C_{iI} , C_{iII} e C_{iIII} = efeitos tipo I, II e III da cobertura do solo.

Martins Filho et al. (2004) afirmam que quando a cobertura do solo é constituída, exclusivamente, por resíduos em contato com a superfície, o fator cobertura e manejo (C_i) iguala-se ao subfator C_{iII} (efeito tipo II). Nessa condição, os subfator C_{iI} e C_{iIII} assumem valores unitários.

Desta forma, Foster (1982) propôs estimar o efeito tipo II pela eq. (38).

$$C_{iII} = E e^{\left\{0,21 \left[\left(\frac{Y_c}{Y_d} \right) - 1 \right] \right\} 1,18} \quad (38)$$

onde:

C_{iII} = subfator cobertura do solo para resíduos em contato com a superfície;

E = fração da superfície exposta ao impacto direto das gotas da chuva; e

Y_c/Y_d = razão da altura da lâmina da água na superfície com cobertura (Y_c) e sem cobertura (Y_d).

Já Laflen et al. (1985) representa o fenômeno pela eq. (39).

$$C_{iII} = e^{-2,5 CS/100} \quad (39)$$

onde:

C_{III} = subfator cobertura do solo para resíduos em contato com a superfície;

CS = porcentagem da superfície entressulcos coberta por resíduos.

No estado de São Paulo, o cultivo da cana-de-açúcar assume grande importância para a sua economia (IZIDORIO, 2004). Logo, a colheita da cana-de-açúcar sem a despalha, mantendo os resíduos vegetais sobre a superfície do solo, torna-se um sistema interessante sob o ponto de vista da conservação do solo e da água (MARTINS FILHO et al., 2009).

Com a manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo, esses poderão interceptar as gotas de chuva e dissipar a sua energia, evitando a desagregação das partículas e a formação do selamento superficial. Desse modo, a capacidade de infiltração e a estabilidade estrutural, características físicas mais expressivas e intimamente relacionadas com a erodibilidade (BRADY e WEIL, 2002), seriam pouco afetadas, contribuindo para a redução da velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, a redução na sua capacidade de desagregação e de transporte das partículas do solo (MARTINS FILHO et al., 2009).

Bezerra e Cantalice (2006) verificaram que a presença de resíduos na superfície diminui o impacto das gotas da chuva e o escoamento superficial, o que reduz a desagregação das partículas do solo e controla a erosão.

Atualmente, o processo de colheita da cana vem sofrendo, também, modificações em função da entrada em foco do aproveitamento do palhço para aplicações não consolidadas ainda comercialmente, tais como geração de energia e cobertura vegetal para agricultura convencional ou orgânica (BRAUNBECK e OLIVEIRA, 2006). No sistema de cana crua, a erosão do solo é reduzida porque há um decréscimo no número de operações de preparo e, também, pela presença de uma camada de resíduos que é deixada sobre a superfície após a colheita, como comprovaram trabalhos de Martins Filho (2007a e b).

A manutenção da palhada apresenta efeitos pronunciados no processo de erosão do solo e nas perdas de nutrientes associadas a este fenômeno, como apontam trabalhos de Souza et al. (2005), Izidorio et al. (2005) e Martins Filho et al. (2009).

Diversos são os trabalhos que estudam os efeitos da cobertura do solo na taxa média de infiltração de água, com resíduos de palha de cana-de-açúcar em contato direto com a superfície solo (BRAIDA e CASSOL, 1999; MARTINS FILHO et al., 2004; e BEZERRA e CANTALICE, 2006). Estes autores verificaram que o aumento na quantidade de palha sobre o solo resultou em maior proteção contra o impacto direto das gotas da chuva, tendo como consequência dessa proteção, um menor selamento superficial e maior infiltração da água no

solo. Além disso, os resíduos na superfície do solo reduzem a velocidade do escoamento superficial e aumentam a resistência e a altura mínima da lâmina para que ocorra escoamento (BRAIDA e CASSOL, 1999; CASSOL et al., 2004), o que favorece a infiltração de água.

Fator práticas conservacionistas (P)

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), o fator P da USLE é a relação entre a intensidade esperada de perdas de solo oriundas de determinada prática conservacionista e aquelas associadas ao plantio no sentido do declive (morro abaixo).

Marques e colaboradores já investigavam o efeito de práticas conservacionistas *versus* o plantio morro abaixo no início da década de 1960 (Tabela 4.8), paralelo as investigações iniciais do USDA, publicadas por Wischmeier (1960).

Tabela 4.8 – Valores de P da equação de perdas de solo para algumas práticas conservacionistas.

Práticas conservacionistas	Valor de P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de capinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanentes	0,2

Fonte: Marques et al. (1961), adaptado.

Um novo conceito que vem sendo incorporado ao setor sucroenergético na fase de preparo do solo é o preparo profundo. Este sistema constitui no uso de implementos de ação profunda, tráfego dirigido (YOUNG et al., 1993), cultivo preciso (BISHOP e GRIMES, 1978; SOJKA et al., 1993), correção física do solo a 80 cm de profundidade para alívio das camadas compactadas do solo, criada pelo longo período de uso do preparo convencional (LABUSCHAGNE e JOUBERT, 2006).

O conceito de “Cultivo preciso” surgiu na Califórnia – EUA e consiste em cultivo de 50 a 60 cm de profundidade abaixo da linha de plantio, conseguindo aumentos substanciais no rendimento da cultura do algodão, superiores aos obtidos com cultivo profundo realizado aleatoriamente no campo (BISHOP e GRIMES, 1978)

Os estudos sobre o preparo profundo na cultura canavieira estão em fase de avaliação, contudo, alguns resultados já podem ser encontrados no campo: o preparo profundo proporciona um maior volume de solo a ser explorado pelas plantas, conseqüentemente, um melhor desenvolvimento; a aplicação de corretivos/fertilizantes em profundidade favorece o

crescimento da planta, em virtude de uma maior concentração de nutrientes ao longo do tempo; permite um maior aporte de água, uma vez que as camadas compactadas em profundidade são rompidas; provê o plantio em espaçamentos diferenciados, sulcação alternada (1,5 x 0,9 m) ou outros adensamentos; mantendo o controle do tráfego, reduzindo a compactação e as perdas de solo.

Conde e Salata (1985) apresentam diferenças superiores a 40% na quantidade de raízes, quando o fundo do sulco foi escarificado, refletindo na produtividade agrícola.

Tomaz, utilizando o preparo profundo, apresenta Índice de Área Foliar (IAF), estimando em 7,1 para cana-de-açúcar, sendo superior aos demais tratamentos. Além disso, o referido autor ainda obteve maior índice de raízes, menor resistência mecânica a penetração, menor custo de operação, menor movimentação do solo (cerca de 80% quando comparado ao Convencional duplo) e menor tráfego de máquinas para o sistema de preparo profundo.

Desse modo, uma lacuna foi criada no âmbito acadêmico gerando novas oportunidades de pesquisa com o intuito de avaliar o efeito do preparo profundo do solo no parâmetro C empregado no modelo USLE.

O modelo estrutural que constitui a USLE é um escoamento superficial empírico, ou uma equação de regressão da erosão laminar, baseado primariamente em observações cujos arquivos de saída são temporalmente e espacialmente aglomerados. Assim como outros modelos empíricos, não é uma ferramenta sensível, fornecendo, por exemplo, apenas uma estimativa da perda de solo anual ignorando os processos de escoamento pela chuva e como esses afetam a erosão (MERRITT et al., 2003).

O modelo possui, ainda, outras limitações, como a não existência de dados válidos em diversos países, o que onera e aumenta o tempo necessário para as pesquisas (LOCH e ROSEWELL, 1992; NEARING et al., 1994); a desconsideração de voçorocas, movimento de massa e deposição de sedimentos na área local de estudo (ZHANG et al., 1995); e a impossibilidade de identificar eventos oriundos dos modelos em grande escala de erosão (MERRITT et al., 2003).

Embora a USLE e suas derivações tenham sido desenvolvidas como modelos de pequena escala, também foram incorporados em modelos de erosão e transporte de sedimentos em uma ampla gama de escalas (MERRITT et al., 2003). Para Loch e Rosewell (1992), a simplicidade da equação e a disponibilidade de parâmetros válidos, pelo menos nos Estados Unidos, tornaram-na relativamente fácil de usar.

4.5.2 Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – RUSLE

Renard e Ferreira (1993) afirmam que entre as modificações realizadas na USLE visando à melhoria nas estimativas de perdas de solo, destaca-se a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada, a qual também é um modelo empírico, originado da grande revisão do modelo USLE e de sua base de dados empregada para estimar a perda de solo média anual, causada pela precipitação e pelo escoamento.

Embora a estrutura da equação seja a mesma da USLE, conceitos de modelagem de erosão baseados na descrição do processo físico foram incorporados na RUSLE, com o objetivo de melhorar as previsões de erosão (RENARD et al., 1997).

Segundo Amorin et al. (2009), apesar dos esforços de melhorias no modelo RUSLE frente à USLE, este apresenta, ainda, grandes limitações, tais como a base empírica, a qual restringe sua aplicação em outras condições edafoclimáticas e a não consideração do processo deposicional, limitando sua aplicação em grandes áreas onde esse processo tem influência.

Uma descrição mais elaborada do modelo, dos fatores que o influenciam e uma discussão sobre suas aplicações e limitações podem ser encontradas em Renard e Ferreira (1993) e Renard et al. (1997).

4.5.3 Water Erosion Prediction Project – WEPP

Laflen et al. (1991) argumentam que a necessidade de se desenvolver uma nova tecnologia para estimar as perdas de solo pela erosão surgiu no sentido de superar as limitações dos modelos USLE e RUSLE, principalmente com referência à sua aplicação, de forma satisfatória, em situações para as quais não foram desenvolvidos.

Na metade da década de 1980, o USDA iniciou o *Water Erosion Prediction Project – WEPP* visando desenvolver uma nova geração de tecnologias para predição da erosão hídrica. O WEPP é um pacote tecnológico para estimativas das perdas de solo com base nos princípios físicos do processo de erosão, desenvolvido nos Estados Unidos em uma parceria envolvendo as seguintes instituições: *Agricultural Research Service*, *Soil Conservation Service*, *Forest Service* do *US Department of Agriculture* e *Bureau of Land Management* do *US Department of the Interior* (LAFLEN et al., 1991; USDA, 1995).

Os processos representados pelo modelo podem ser caracterizados como processos de erosão, hidrológicos, de crescimento de plantas e resíduos, de utilização de água, hidráulicos e do solo (LAFLEN et al., 1991). Segundo Lane et al. (1992), o WEPP consiste em um modelo dinâmico de simulação que incorpora conceitos de erosão em entressulcos e em sulcos. O WEPP permite a simulação dos processos que ocorrem em determinada área de acordo com características atualizadas diariamente do estado atual do solo, cobertura vegetal, restos culturais e umidade. Quando ocorre uma chuva, com base nas características atuais do terreno, determina-se se haverá produção de escoamento superficial. Se houver, o modelo estima o desprendimento, o transporte e a deposição das partículas ao longo da encosta, porém, não considera a erosão em voçorocas e curso d'água permanente.

Uma descrição dos componentes que constituem o modelo pode ser encontrada em Laflen et al. (1991), Lane et al. (1992), Flanagan et al. (1994), Flanagan e Livingston (1995), Flanagan e Nearing (1995), Flanagan et al. (1995), Flanagan et al. (1998), Flanagan e Nearing (2000), Flanagan et al. (2001), Flanagan et al. (2004), Flanagan et al. (2005) e Flanagan et al. (2007).

Porém, assim como outros modelos, o WEPP está sujeito a algumas limitações que podem inviabilizar seu uso em locais com poucas informações disponíveis para a sua calibração. Como os parâmetros utilizados devem ser calibrados em relação a dados observados para uma condição específica, a limitação de dados gera cenários com baixa confiança; o modelo não considera voçorocas; o conceito de sulco e entressulco utilizado não pode ser aplicado em locais que não tenham sido cultivados e não apresentem inicialmente formação dos sulcos. Apesar da natureza do processo-base do modelo, o WEPP ainda contém um grau elevado de empirismo e cuidados devem ser tomados quando aplicado em novos locais (MERRITT et al., 2003).

Em várias partes do mundo, diversas pesquisas têm sido conduzidas visando avaliar o desempenho dos modelos de predição de erosão, bem como sua validação para diferentes condições de uso e manejo do solo. Existem, além dos modelos aqui apresentados, um número expressivo de outros que foram avaliados por Merritt et al. (2003) e Aksoy e Kavvas (2005).

Assim, como a grande maioria dos modelos avaliados por Merritt et al. (2003) e Aksoy e Kavvas (2005), os modelos USLE, RUSLE e WEPP foram desenvolvidos e ajustados para condições de clima temperado, as quais são diferentes das encontradas no Brasil, um país de clima e solos tropicais. Desta forma, é importante avaliar as limitações da aplicabilidade destes modelos para nossas condições edafoclimáticas. Na literatura brasileira De Jong van Lier et al. (2005), Avanzi et al. (2008), Sergio et al. (2008), Silva et al. (2008), Cecílio et al. (2009) e

Amorim et al. (2010) são algumas das referências que avaliaram a aplicação dos modelos de predição de erosão hídrica.

Vale ressaltar que, apesar da bibliografia existente, na prática, os modelos de erosão e transporte de materiais ainda são pouco utilizados no nosso país, em princípio pela complexidade, necessidade de ferramentas computacionais, calibrações menos triviais e por fim, da própria validação dos modelos à nossa realidade.

De modo geral, dentre os modelos existentes ou aqueles empregados no Brasil, não existe um que seja considerado melhor para a predição de perdas de solo, mas sim um mais apropriado, conforme mencionado por Jakeman e Hornberger (1993), Merritt et al. (2003), Aksoy e Kavvas (2005) e Amorin et al. (2009). Os modelos empíricos (como a USLE) são mais simples e de fácil utilização e calibração quando comparados a outros mais complexos como, por exemplo, os de base física e, conforme indica a literatura, conduzem a uma estimativa inicial satisfatória da perda de solo de um local.

4.6 Práticas de controle da erosão

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), algumas das causas do esgotamento de nossos solos pela erosão podem ser controladas, sendo todas as técnicas utilizadas para aumentar a resistência do solo ou diminuir as forças do processo erosivo denominadas de práticas conservacionistas. Os mesmos autores dividem essas práticas em vegetativas, edáficas e mecânicas, quando se utilize a própria vegetação; se tratem de modificações nos sistemas de cultivo; ou se recorra a estruturas artificiais construídas mediante a remoção ou disposição adequada de porções de terra.

4.6.1 Práticas edáficas

São práticas conservacionistas que, através de modificações no sistema de cultivo, além de controlar a erosão mantêm ou melhoram a fertilidade do solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

As práticas de controle de erosão são importantes, contudo, são necessárias outras práticas que possam repor os elementos nutritivos para o crescimento e desenvolvimento das plantas, controlar as queimadas, as perdas de matéria orgânica e a lixiviação.

Dentre as práticas edáficas, as mais comuns são: controle de queimadas; adubação verde, química, orgânica; e calagem.

4.6.2 Práticas vegetativas

Bertoni e Lombardi Neto (2010) definem práticas de caráter vegetativo como aquelas em que se utiliza a vegetação para defender o solo contra a erosão.

A densidade da cobertura vegetal é importante na proteção do solo, uma vez que preserva as características do solo contra os efeitos da erosão. Entretanto, em áreas agrícolas, não é sempre possível manter o solo com vegetação protetora, o que também não impede a inclusão de sistemas de controle através da vegetação. Assim, são apresentadas algumas das práticas de caráter vegetativo: florestamento e reflorestamento, pastagens, plantas de cobertura, plantio em faixas, cordões permanentes de vegetação, cobertura morta, dentre outros.

Segundo Gonçalves (2006) os principais sistemas de cultivo adotados para a cana-de-açúcar no Brasil são: preparo convencional do solo, preparo reduzido (cultivo mínimo) e o sistema plantio direto, descritos de maneira resumida a seguir:

- **Preparo convencional:** consiste nas operações de sistematização, distribuição de corretivos, aração, gradagem pesada, subsolagem e gradagem niveladora. Este sistema é utilizado em larga escala pelo setor e tem o objetivo de deixar o solo preparado para receber a cultura.
- **Preparo reduzido (Cultivo Mínimo):** consiste na eliminação da soqueira com uso de herbicidas, distribuição dos corretivos em superfície, subsolagem (quando constatada a presença de uma camada de impedimento) e sulcação das entrelinhas para o novo plantio.
- **Sistema Plantio Direto (SPD):** compreende um conjunto de operações integradas que tem por objetivo, melhorar as condições ambientais de modo a explorar o

potencial produtivo das culturas, respeitando os requisitos: revolvimento do solo apenas na linha de plantio, rotação de culturas e manutenção de cobertura vegetal na superfície do solo, associada ao manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas.

Segundo a definição Brundtland de desenvolvimento sustentável – “aquela que satisfaz as necessidades do presente sem prejudicar a capacidade das gerações futuras virem a satisfazer suas necessidades” – o SPD tem como objetivo melhorar e conservar as características do solo de modo a possibilitar uma agricultura sustentável.

Atualmente são cultivados no Brasil cerca de 25,5 milhões de hectares sob SPD, em nível mundial, a área é de 116,9 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2012). O Brasil ocupa a terceira maior área, sendo os Estados Unidos o país que apresenta a maior área sob esse sistema. Segundo Lopes et al. (2004), esse fato representa uma grande conquista para a sociedade brasileira em termos de preservação do meio ambiente, uma vez que, em área sob SPD, a perda de solo por erosão é drasticamente reduzida e o estoque de matéria orgânica é aumentado.

Com o SPD, as características químicas e físicas do solo podem ser melhoradas através de um manejo mais adequado tanto do solo, quanto da cana-de-açúcar, envolvendo a utilização de sistemas conservacionistas (ANDRIOLI et al., 1997; BIANCHINI et al., 2001 apud DUARTE JÚNIOR e COELHO, 2008). O SPD, que proporciona melhorias comprovadas nas condições de fertilidade do solo, é eficiente alternativa em acumular matéria orgânica contribuindo para o sequestro do carbono (CO₂) atmosférico.

De médio, em longo prazo, o SPD favorece o maior acúmulo de palha na superfície do solo (BARCELOS et al., 1999), menor desagregação do solo, maior retenção de água (CARVALHO et al., 1999), maiores taxas de infiltração de água no solo (BARCELOS et al., 1999), redução superior a 99% nas perdas de solo e 94% nas perdas de água (SEGANFREDO et al., 1997) e maior economia de água de irrigação, em torno de 14% (ANDRADE et al., 2002). Segundo Oliveira et al. (2002), em solos de igual declividade, o SPD reduz em cerca de 75% as perdas de solo e em 20% as perdas de água, em relação às áreas onde há revolvimento do solo.

Apesar da cana-de-açúcar ser uma cultura semiperene (ciclo de corte de quatro a seis anos, em média) é possível realizar a rotação de culturas como forma a respeitar todos os requisitos do SPD. Neste caso, segundo Penariol e Segato (2007), a rotação pode ser feita com adubos verdes (crotalárias, lab-lab, mucunas, etc.) e principalmente espécies leguminosas

(amendoim e soja) nas áreas de reforma, durante a primavera/verão, entre a colheita e o plantio da cana de ano e meio.

No setor sucroenergético, as primeiras experiências com o SPD foram realizadas pela Cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Copersucar) baseado nos trabalhos de Peticarrari e Ide (1986).

Em relação ao preparo convencional com o solo descoberto ou sem palhada na superfície, além do SPD da cana-de-açúcar proporcionar redução no número de operações, tempo disponível de pessoal, equipamentos envolvidos e custos (47% em comparação com o convencional), ainda pode aumentar a produtividade (DALBEN et al., 1983; CRUZ, 2003).

4.6.3 Práticas mecânicas

O terraceamento é uma prática mecânica de controle de erosão quando as práticas vegetativas e edáficas não são suficientes para controlar o escoamento superficial no solo.

A Companhia de Desenvolvimento Agrícola de São Paulo – CODASP (1994) descreve esse sistema como um conjunto de terraços adequadamente espaçados, com o objetivo de reter e infiltrar, ou conduzir com velocidade controlada, o escoamento superficial para fora da área protegida, sendo a eficiência desse sistema dependente do correto dimensionamento do espaçamento entre terraços e de sua seção transversal.

É uma das práticas de controle de erosão hídrica mais difundida pelos agricultores e consiste na construção de terraços (estruturas compostas de um canal e um dique, ou camalhão) no sentido transversal à declividade do terreno, formando obstáculos físicos que parcelam o comprimento da rampa, capazes de reduzir a velocidade do escoamento, conseqüentemente o transporte de sedimentos e disciplinam o movimento da água sobre a superfície do terreno (LOMBARDI NETO et al., 1994; PRUSKI et al., 2009c BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

Nem todos os solos podem ser terraceados. Em solos pedregosos, muito rasos e que apresentam subsolo compactado, o terraceamento é muito oneroso e de difícil manutenção. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), a declividade do terreno é o fator que determina a praticabilidade do terraceamento, uma vez que a erosão tende a aumentar com o declive.

Apesar de ser uma prática de conservação do solo praticada há milênios, Margólis (1989) afirma que ainda existem dificuldades relativas ao seu planejamento, construção e

manutenção. Uma das principais causas dos problemas está associada à utilização de tabelas antigas para o cálculo do espaçamento entre terraços, as quais não levam em consideração o sistema de preparo do solo e o manejo dos restos culturais (CODASP, 1994).

Bertoni e Lombardi Neto (2010) afirmam que não existem dados experimentais que demonstrem o grau de eficiência dos terraços para solos brasileiros, sendo, todavia, considerado semelhante a dos terraços norte-americanos. Marques (1950) citado por Bertoni e Lombardi Neto (2010), após avaliar uma média dos dados de sete estações experimentais norte-americanas determinou que os terraços controlavam 87% das perdas de solo e 12% das perdas de água.

Principais tipos de classificação dos terraços

Diversas são as classificações dos terraços sendo as mais usuais descritas por Lombardi Neto et al. (1994) e, apresentadas na sequência:

Classificação segundo a função que desempenham

Nesta categoria são classificados: a) terraços de retenção, absorção, infiltração ou em nível: são aqueles construídos com o canal em nível e as extremidades bloqueadas, assim a água decorrente do escoamento, por hipótese é retida e infiltrada no canal; b) terraço de drenagem ou com gradiente: construído com o canal em declive, acumulando e conduzindo o excesso de água para fora da área protegida; c) terraço misto: construído em nível com capacidade de armazenamento e, após o preenchimento desse volume, funciona como um terraço de drenagem.

No entanto, a escolha do tipo de terraço, de infiltração ou de drenagem, de base estreita, média ou larga, frequentemente empregados, ocorre devido ao comportamento da infiltração de água da chuva (CANETTI, 1989). Os terraços em nível ou de infiltração poderão ser adotados sempre que sua capacidade de infiltração e retenção for maior que o volume máximo de água esperado. No caso do volume precipitado exceder a capacidade de infiltração e de retenção, recorre-se à construção de terraços em desnível ou de drenagem (BERTOLINI et al., 1989; LOMBARDI NETO et al., 1994).

De modo geral, o tipo adequado de terraço a ser implantado deve ser escolhido com base na análise das características da chuva e do solo. Os terraços de retenção são recomendados para solos com boa permeabilidade possibilitando rápida infiltração, já os terraços de drenagem são indicados para solos com permeabilidade moderada ou lenta.

Contudo, a prática consagrada no setor canavieiro é a construção de terraços em nível independente das características edafoclimáticas do local. Desta forma, o conceito de drenagem é pouco utilizado, o que reduz as alternativas de planejamento e projeto das áreas de plantio. Além disso, o terraço pode perder sua funcionalidade em solos onde a taxa de infiltração é menor que a taxa de precipitação, causando danos (erosão do solo, carreamento de nutrientes, arranquio de plantas, dentre outros).

Classificação segundo a forma construtiva

A forma construtiva pode ser do tipo Nichols ou Mangum.

O terraço tipo Nichols (Figura 4.3) é construído através do revolvimento do solo unicamente do lado de cima do terreno, formando um canal. Pode ser implantado em locais com declividade de até 18%, tendo como principal desvantagem o não aproveitamento da faixa construída para o plantio.

Figura 4.3 – Perfil esquemático de um terraço tipo Nichols.

Fonte: Lombardi Neto et al. (1994) e Bertoni e Lombardi Neto (2010), adaptado.

O terraço tipo Mangum (Figura 4.4) é construído pelos dois lados do terreno, apresenta canal mais largo e raso e maior capacidade de armazenamento de água quando comparado ao terraço anterior. É indicado para locais com declividades menores que 18% e pode ser construído com arados fixos ou reversíveis, sendo adaptado para conservação da água.

Figura 4.4 – Perfil esquemático de um terraço tipo Mangum.

Fonte: Lombardi Neto et al. (1994) e Bertoni e Lombardi Neto (2010), adaptado.

O terraço tipo Mangum apresenta algumas vantagens em relação ao tipo Nichols, como a possibilidade de construção tanto por arados fixos quanto por arados reversíveis e o fato de possuir um canal mais raso, que facilita o tráfego de máquinas e equipamentos no terreno. Contudo, apresenta um maior custo, uma vez que sua construção é realizada pelos dois lados do terreno exigindo um maior deslocamento da máquina durante sua construção.

Dimensão ou faixa de movimentação de terra

A largura da faixa de movimentação de terra (dimensão) é classificada em: base estreita, média e larga. Porém, independente do tipo, devem ser feitas manutenções durante toda a vida útil dos terraços, garantindo sua funcionalidade plena.

O terraço de base estreita é construído com uma faixa de movimentação de terra de até três metros de largura. É recomendado para áreas onde não é possível instalar o terraço de base média ou base larga e não recomendado para áreas extensas com declividades inferiores a 15-16%.

O terraço de base média é construído com uma faixa de movimentação de terra de três a seis metros de largura e pode ser cultivado em quase sua totalidade. É indicado para propriedades com disponibilidade de máquinas e implementos de pequeno/médio porte e locais com declividade máxima de 10-12%.

O terraço de base larga é construído com uma faixa de movimentação de terra de seis a 12 metros de largura e é recomendado para plantios extensos e terrenos com declividade de 6-

8%. É o mais oneroso, porém seu custo inicial elevado é compensado ao longo dos anos, uma vez que se pode cultivar em toda sua extensão e sua manutenção, pode ser realizada durante o preparo do solo.

Forma ou perfil

Outra maneira de classificação diz respeito a forma do seu perfil, podendo ser classificado em terraço comum ou terraço patamar.

O terraço comum é uma construção em nível ou desnível. Esse tipo é usado em condições agrícolas normais e declividade inferior a 18%. Dependendo da maneira como é construído, pode sofrer variações na forma, originando o terraço “embutido” e o “murundum”.

Terraço “embutido” (Figura 4.5) tem como característica o formato do canal triangular, ficando o talude que separa o canal do camalhão praticamente na vertical.

Figura 4.5 – Perfil esquemático de um terraço tipo “embutido”.

Fonte: Lombardi Neto et al. (1994) e Bertoni e Lombardi Neto (2010), adaptado.

O terraço “murundum” (Figura 4.6) caracteriza-se por ter um camalhão alto (mais de dois metros) e canal em forma triangular.

Figura 4.6 – Perfil esquemático de um terraço tipo “murundum”.

Fonte: Lombardi Neto et al. (1994) e Bertoni e Lombardi Neto (2010), adaptado.

O terraço patamar (Figura 4.7) é o verdadeiro terraço, sendo dele derivados os demais. É utilizado em terrenos com declive superior a 18% e construído transversalmente à linha de maior declive formando uma plataforma onde são cultivadas as espécies e um talude que deve ser estabilizado com revestimento de grama ou outro tipo de vegetação.

Figura 4.7 – Perfil esquemático de um terraço tipo patamar.

Fonte: Lombardi Neto et al. (1994) e Bertoni e Lombardi Neto (2010), adaptado.

4.6.4 Definição do tipo de terraço

A declividade do terreno é o fator determinante na largura da faixa de movimentação de terra (base larga, média ou estreita) e na definição do tipo de terraço a ser construído, se comum ou patamar (PRUSKI et al., 2009c; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

Segundo Paraná (1994), o terraceamento é uma prática recomendada para terrenos com declividade de 4% a 50%. Para declividades inferiores a 4%, quando o comprimento de rampa é curto, o terraceamento pode ser substituído por outras práticas conservacionistas (edáficas e/ou vegetativas). A Tabela 4.9 apresenta as recomendações de Paraná (1994) para a seleção do tipo de terraço a ser empregado de acordo com a declividade do local.

Tabela 4.9 – Tipos de terraços recomendados de acordo com a declividade local.

Declividade (%)	Tipo de terraço recomendado
2 – 8	Base larga
8 – 12	Base média
12 – 18	Base estreita
18 – 50	Terraço patamar

Fonte: Paraná (1994), adaptado.

4.6.5 Modelos de cálculo de distância entre terraços

O dimensionamento de terraços consiste na determinação do espaçamento entre terraços e seção transversal. A metodologia adotada para o cálculo do espaçamento de terraços de infiltração é a mesma para terraços de drenagem e mistos.

Os primeiros estudos sobre espaçamento foram conduzidos por Ramser (1917) e serviram de base para os trabalhos de Nichols (1937). Em levantamento de dados obtidos nas diversas estações experimentais dos Estados Unidos, Ramser (1945) estudou o desenvolvimento do espaçamento entre terraços. As fórmulas apresentadas por Hamilton (1938) foram usadas por muito tempo pelo serviço norte-americano de conservação do solo. Um estudo do efeito do grau de declividade e do comprimento de rampa nas perdas de solo por erosão, com sua aplicação no espaçamento de terraços, foi conduzido por Zingg (1940).

Aqui no Brasil, pesquisadores como Abramides Neto e Moura (1943), Bittencourt (1943) e Departamento... (1956) utilizaram as fórmulas e tabelas baseadas nas equações norte-americanas previamente mencionadas. Marques (1950) apresenta a primeira tabela brasileira de terraços baseada em dados de perdas de solo por erosão em diferentes tipos de solos. Bertoni (1959) determinou uma equação para calcular o espaçamento vertical entre terraços, eq. (40).

$$EV = 0,4518 K D_t^{0,58} \quad (40)$$

onde:

EV = espaçamento vertical entre terraços, m;

K = constante para cada tipo de solo, tabelado (Bertoni, 1959);

D_t = declividade do terreno, em %.

No método proposto por Paraná (1994), os espaçamentos vertical e horizontal entre terraços são obtidos com base nos valores da Tabela 4.10. Neste caso, devem ser conhecidos, também, o tipo de solo (arenoso, argiloso ou terra roxa) e a declividade do terreno, sendo 20% o máximo valor de declividade admitida.

Tabela 4.10 – Valores de espaçamento vertical (EV) e horizontal (EH) recomendados pelo método do Paraná.

Declive (%)	Terra arenosa		Terra argilosa		Terra roxa	
	EV (m)	EH (m)	EV (m)	EH (m)	EV (m)	EH (m)
1	0,38	37,75	0,75	54,75	0,43	43,10
2	0,56	28,20	0,82	40,95	0,64	32,20
3	0,71	23,20	1,04	34,55	0,82	27,20
4	0,84	21,10	1,22	30,60	0,96	24,10
5	0,96	19,20	1,39	27,85	1,10	21,95
6	1,07	17,80	1,55	25,80	1,22	20,30
7	1,17	16,75	1,69	24,20	1,33	19,05
8	1,26	15,75	1,83	22,85	1,44	18,00
9	1,35	15,00	1,96	21,75	1,54	17,75
10	1,43	14,35	2,08	20,80	1,64	16,40
11	1,52	13,80	2,20	20,00	1,73	15,70
12	1,60	13,30	2,32	19,30	1,82	15,20
13	1,69	13,00	2,42	18,60	1,90	14,60
14	1,71	12,45	2,53	18,05	1,99	14,20
15	1,83	12,20	2,63	17,50	2,07	13,80
16	1,89	11,80	2,74	17,10	2,15	13,45
17	1,98	11,65	2,83	16,65	2,23	13,10
18	2,02	11,20	2,92	16,25	2,30	12,80
19	2,11	11,10	3,01	15,85	2,37	12,50
20	2,14	10,70	3,11	15,55	2,45	12,25

Fonte: Paraná (1994).

Segundo Lombardi Neto et al. (1994), uma área com terraços mal dimensionados pode apresentar maiores problemas de erosão que outra não protegida. Isso pode ocorrer por diversas razões, como as relacionadas a seguir:

- O terraço é utilizado como prática conservacionista isolada;
- O espaçamento entre terraços é determinado a partir de tabelas empíricas adaptadas de outros países com um pequeno e insuficiente número de informações;
- Pela maior facilidade de locação e implantação, os terraços, em sua maioria, têm sido locados em nível, indiscriminadamente;

- Nos solos com horizonte B latossólico, o uso intensivo e inadequado de máquinas e implementos pesados tem ocasionado a formação de uma camada compactada e pouco permeável;
- As tabelas utilizadas não consideram o tipo de uso da terra, de cultura, de preparo do solo e de manejo dos restos culturais;
- O terraço frequentemente é construído com seção transversal menor que a necessidade, fazendo com que, em solos pouco permeáveis, esse não tenha capacidade suficiente para reter toda a água por ocasião das chuvas intensas.

Sendo assim, Lombardi Neto et al. (1994) propuseram um método para determinação do espaçamento entre terraços obtido a partir de pesquisas sobre perdas de solo e água por erosão considerando a cobertura vegetal, os sistemas de preparo do solo, o manejo dos restos culturais e a erodibilidade das classes de solos identificadas em levantamentos pedológicos. Embora a quantidade de dados necessários para o estabelecimento desse novo método ainda seja considerada insuficiente, apresenta maior suporte técnico que os antigos. O espaçamento vertical entre terraços é estimado pela eq. (41).

$$EV = \frac{0,4518 \, k \, D_t^{0,58} (\mu + m)}{2} \quad (41)$$

onde:

EV = espaçamento vertical, m;

k = parâmetro que depende do tipo de solo, Tabela 4.11;

D_t = declividade do terreno, em %;

μ = fator de uso do solo, Tabela 4.12;

m = fator de manejo do solo, Tabela 4.13.

Tabela 4.11 – Agrupamentos de solos segundo suas qualidades, características e resistências à erosão e os respectivos valores de k.

Grupo	Grupo de resistência à erosão	Principais características					k
		Profundidade	Permeabilidade (Horizonte A/Horizonte B)	Textura (Horizonte A/Horizonte B)	Razão Textural	Grandes Grupos de solos*	
A	Alta	Muito profundo (> 2,0 m) ou profundo (1,0 a 2,0 m)	Rápida/rápida Moderada/rápida	Média/média M.argilosa/m.argilosa Argilosa/argilosa	< 1,2	LR, LE, LV, LVr, LVt, LH, LEa e LVa Lj, LVP, PV, PVL,	1,25
				Arenosa/arenosa Arenosa/média Arenosa/argilosa Média/argilosa Argilosa/m.argilosa		Pln, TE, Pvls, R, RPV, RLV, Lea e Lva	
B	Moderada	Profundo (1,0 a 2,0 m)	Rápida/rápida Rápida/moderada		1,2 a 1,5		1,1
				Arenosa/média Média/argilosa Arenosa/argilosa Arenosa/m.argilosa		Pml, Pvp, Pvls, Pc e M	
C	Baixa	Profundo (1,0 a 2,0 m) ou moderadamente profundo (0,5 a 1,0 m)	Lenta/rápida Lenta/moderada Rápida/moderada		> 1,5		0,9
				Arenosa/média Média/argilosa Arenosa/argilosa Arenosa/m.argilosa			
D	Muito baixa	Moderadamente profundo (0,5 a 1,0 m) ou raso (0,25 a 0,5 m)	Rápida/moderada Lenta/lenta		Muito variável		0,75
				Muito variável		Li-b, Li-ag, gr, Li-fi, Li-ac e Pvp	

*Fazer a correspondência com as classificações atuais.

Fonte: Lombardi Neto et al. (1994), adaptado.

Tabela 4.12 – Grupos de culturas e respectivos fatores de uso do solo (μ).

Grupo	Culturas	μ
1	Feijão, mandioca e mamona	0,50
2	Amendoim, algodão, arroz, alho, cebola, girassol e fumo	0,75
3	Soja, batata, melancia, abóbora, melão e leguminosas para adubo verde	1,00
4	Milho, sorgo, cana-de-açúcar, trigo, aveia, centeio, cevada, outras culturas de inverno e frutíferas de ciclo curto como abacaxi	1,25
5	Banana, café, citros e frutíferas permanentes	1,50
6	Pastagens e/ou capineiras	1,75
7	Reflorestamento, cacau, seringueira	2,00

Fonte: Lombardi Neto et al. (1994), adaptado.

Tabela 4.13 – Grupos de solo e manejo de restos culturais com respectivos valores do fator m.

Grupo	Manejo de solo		Restos Culturais	m
	Preparo Primário	Preparo Secundário		
1	Grade aradora / pesada ou enxada rotativa	Grade niveladora	Incorporados ou queimados	0,50
2	Arado de disco ou aiveca	Grade niveladora	Incorporados ou queimados	0,75
3	Grade leve	Grade niveladora	Parcialmente incorporados com ou sem rotação de culturas	1,00
4	Arado escarificador	Grade niveladora	Parcialmente incorporados com ou sem rotação de culturas	1,50
5	Não tem	Plantio sem resolvimento do solo, roçadeira, rolo-faca, herbicidas (SPD)	Superfície do terreno	2,00

Fonte: Lombardi Neto et al. (1994), adaptado.

O espaçamento horizontal é estimado pela eq. (42).

$$EH = \frac{EV}{D_t} * 100 \quad (42)$$

onde:

EH = espaçamento horizontal, m;

EV = espaçamento vertical, m;

D_t = declividade do terreno, em %.

A título de exemplificação de resultados do EV para os métodos de Bertoni (1959), Lombardi Neto et al. (1994) e Paraná (1994) aplicou-se as equações (40), (41) e os valores da Tabela 4.10 de determinação do EV e EH em uma área hipotética com as seguintes características: Argissolo Vermelho, com declividade de 6%, cultura de cana-de-açúcar em plantio mecânico e preparo de solo mínimo (subsolagem e grade niveladora), obtendo-se os valores apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Valores de EV e EH para os diferentes métodos de cálculo.

Método	Ano de publicação	EV (m)	EH (m)
Bertoni	1959	1,22	20,33
Lombardi Neto et al.	1994	1,93	32,16
Paraná	1994	1,55	25,80

Quando se compara os valores extremos, ou seja, o método de Bertoni (1959) com o de Lombardi Neto et al. (1994), observa-se um aumento de 58% das distâncias vertical e horizontal calculadas. Nesse contexto, é possível notar que não existe consistência dos métodos empíricos utilizados para o cálculo do espaçamento, uma vez que os valores sofrem variações significativas, conforme o modelo utilizado.

A alocação errada do terraço, seja por problemas de cálculo, erros práticos de implantação, ou mesmo falta de planejamento, pode apresentar inúmeras desvantagens, particularmente importantes no setor canavieiro, no qual o terraceamento é a prática consagrada de conservação do solo, tais como: perda de área efetiva de plantio; aumento no número de manobras das máquinas e equipamentos; aumento dos custos com a construção e manutenção dos terraços, pois sua capacidade de retenção e infiltração diminui com o passar do tempo; acúmulo de água no canal, muitas vezes perdida, pois as plantas não conseguem aproveitá-la devido à baixa infiltração em condições de selamento superficial podendo, inclusive, ocasionar a morte das mesmas; evaporação da água retida no canal; e a distância real entre as raízes absorventes e a água disponível (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Efeitos do acúmulo de água no canal do terraço.

Apesar de todos os esforços da pesquisa na busca de um equacionamento que de suporte à decisão sobre o espaçamento entre terraços nas inúmeras condições possíveis de implantação de culturas agrícolas, o que se observa no mundo prático é a adoção de receitas “consagradas” pelo uso. Nesse sentido, Demattê (2004) afirma que a prática usual no setor canavieiro é a adoção de um valor fixo de espaçamento vertical (EV) de 5 m entre terraços, havendo casos de distâncias menores (2,5 m) para determinados solos podzolizados arenosos, o que resulta na maximização da área efetiva de plantio e consequente redução de custos de implantação e manutenção desses terraços. Contudo, o uso indiscriminado de valores fixos para o EV contraria a teoria das diversas pesquisas citadas anteriormente, e, ainda, desconsidera a existência de cobertura vegetal, uso e manejo do solo. Sabe-se entretanto, que esses fatores evoluíram ao longo do tempo com as práticas do Sistema Plantio Direto, colheita mecânica de cana crua e preparo profundo do solo que, quando empregados em conjunto, reduzem expressivamente as perdas de água e solo. Além disso, a construção de terraços baseada apenas na “cultura prática” pode levar a perda de nutrientes através do processo erosivo e ao rompimento dessas estruturas.

É nesse contexto de evolução da técnica de conservação do solo e avanços na área de agricultura de precisão que se insere a investigação das alternativas de planejamento e projeto do plantio de cana-de-açúcar. Sendo assim, um estudo aprofundado da planialtimetria, tipo de solo, cobertura vegetal e uso e manejo do solo, aliado às ferramentas computacionais que

simulam o escoamento superficial, parece constituir um tema de pesquisa que contribuirá para uma melhor fundamentação do processo de decisão associado ao planejamento e projeto de áreas de plantio de cana-de-açúcar.

4.6.6 Modelo de dimensionamento de terraços de infiltração

A CODASP (1994) apresenta diversas seções transversais típicas de terraços por ela construídos, conforme o tipo de equipamento utilizado na sua construção e a declividade do local.

Pruski et al. (2009c) afirmam que a seção transversal é geralmente estabelecida sem considerar suas condições de operação, resultando, na maioria dos casos, em erros grosseiros de seu valor. Esses mesmos autores reforçam que para uma determinação mais precisa da seção transversal adequada é necessário conhecer o volume máximo de escoamento superficial, para terraços de retenção, ou a vazão máxima de escoamento, no caso de terraços de drenagem. Tanto o volume máximo quanto a vazão máxima de escoamento superficial podem ser estimados pelos métodos descritos no item 4.4.1 desta pesquisa.

A altura da água acumulada no canal de um terraço em nível e com seção triangular, segundo Pruski et al. (2009c), é expressa na eq. (43).

$$H = \sqrt{\frac{ES}{500} \frac{EH S_t S_m}{(S_t + S_m)}} \quad (43)$$

onde:

H = altura da água no canal do terraço, m;

ES = lâmina de escoamento superficial, mm;

EH = espaçamento horizontal, m;

S_t = declividade do terreno, $m m^{-1}$;

S_m = declividade da parede de montante do terraço, $m m^{-1}$.

Figura 4.9 – Representação esquemática de um terraço de infiltração com seção triangular.

Fonte: Pruski et al. (2009c), adaptado.

Para canais em nível cuja seção se aproxime do formato trapezoidal, a altura da água é calculada pela eq. (44).

$$H = \frac{-b + \sqrt{b^2 + \frac{4 ES EH}{1000 S_d}}}{\frac{2}{S_d}} \quad (44)$$

onde:

H = altura da água no canal do terraço, m;

ES = lâmina de escoamento superficial, mm;

EH = espaçamento horizontal, m;

b = largura do fundo do canal, m;

S_d = declividade do talude do terraço, $m\ m^{-1}$.

Figura 4.10 – Representação esquemática de um terraço de retenção com seção trapezoidal.

Fonte: Pruski et al. (2009c), adaptado.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), pode-se calcular o canal do terraço de infiltração, utilizando um método prático: a) faz-se a estimativa do tempo de concentração e sua respectiva intensidade máxima de chuva, e, b) calcula-se o máximo de enxurrada usando o Método Racional (eq. 12).

Conhecendo-se a enxurrada máxima que deve receber cada terraço, seu canal pode ser dimensionado, supondo-se que a seção do canal seja parabolóide e que a velocidade permissível seja baixa. Hudson (1973) apresenta as diferentes dimensões dos canais de terraços para diferentes vazões, através da solução parcial da equação de Manning (Tabela 4.15).

Tabela 4.15 – Vazões dos canais dos terraços.

Profundidade do canal	Largura do canal (m)						Limite do gradiente (m/1.000)
	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	
cm	m ³ /s						
5	0,022	0,033	0,044	0,055	0,066	0,077	25
	0,022	0,037	0,052	0,067	0,081	0,096	50
10	0,041	0,061	0,082	0,103	0,123	0,143	10
	0,050	0,077	0,103	0,130	0,157	0,182	14
15	0,060	0,092	0,122	0,152	0,182	0,213	4,5
	0,076	0,105	0,153	0,190	0,230	0,270	7,7
20	0,080	0,120	0,162	0,202	0,243	0,283	2,7
	0,102	0,153	0,204	0,253	0,304	0,353	4,5
25	0,103	0,154	0,205	0,254	0,305	0,354	2,4
	0,129	0,191	0,256	0,318	0,382	0,445	3,3
30	0,125	0,185	0,246	0,306	0,367	0,427	1,4
	0,154	0,230	0,306	0,382	0,455	0,530	2,3

Fonte: Hudson (1973), adaptado.

A Tabela 4.15 apresenta a capacidade dos canais dos terraços em metros cúbicos por segundo, nos limites superiores e inferiores do gradiente do canal; nesses limites, o superior é para velocidade de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ e, o inferior, para velocidade de $0,75 \text{ m s}^{-1}$. A capacidade é baseada no coeficiente de rugosidade $n = 0,0225$, no raio hidráulico de $2/3$ da profundidade e na profundidade do fluxo de metade da altura do canal (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2010).

Ao analisarmos o modelo proposto por Pruski et al. (2009c), nos deparamos com algumas variáveis que dificultam o processo de dimensionamento dos terraços. Por exemplo, para o cálculo da altura da água no canal do terraço (H) é necessário o parâmetro lâmina de escoamento superficial (ES), o qual é definido na eq. (45).

$$ES = \frac{(PT - 0,2Ip)^2}{(PT + 0,8 Ip)} \quad (45)$$

onde

ES = escoamento superficial, mm;

PT = precipitação total, mm; e

Ip = infiltração potencial, mm.

$$Ip = \frac{25.400}{CN} - 254 \quad (46)$$

onde

CN = número da curva, cujo valor pode variar entre 1 e 100.

O valor de CN depende do uso e manejo do solo, grupo de solo, condição hidrológica e umidade antecedente do solo. O Método do Número da Curva foi desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* - USDA (SCS) e as condições de superfície e tipos de solo foram definidos pelo referido órgão. Os valores de CN podem ser encontrados em Pruski et al. (2009c). Os valores de CN podem, também, ser determinados por outros métodos, como o Método do Balanço da Água na superfície do solo, por exemplo.

Assim, mais uma vez, nos deparamos com o uso de parâmetros definidos em condições edafoclimáticas distintas das brasileiras e sua aplicação em larga escala.

Sobre o método apresentado por Pruski et al. (2009c) soma-se ainda, o fato de ter-se que admitir uma angulação, declividade da parede de montante do terraço (S_m), qualquer, sem indícios ao projetista, o que torna o dimensionamento dos terraços uma tarefa pouco lógica.

Ao analisarmos o método de dimensionamento apresentado por Bertoni e Lombardi Neto (2010) para terraços de infiltração, tanto de base larga quanto de base estreita, nos deparamos com outro questionamento.

A Tabela 4.15 apresenta valores de gradiente para a construção dos terraços, sugerindo que os mesmos podem drenar a área. Contudo, evidenciam que com o aumento da vazão de entrada, os gradientes diminuem, limitando a drenagem.

No setor sucroenergético a prática do terraceamento está calcada na construção das estruturas (terraços) com a base totalmente em nível, impedindo assim, que qualquer volume, por menor que se apresente, seja escoado. Este fato reforça o argumento de Sparovek e Maule (2015) de que a concepção original do terraceamento, no Brasil, sofreu importantes adaptações, principalmente com relação ao destino final do excesso de água que não infiltrou no solo.

4.6.7 Modelos de dimensionamento de terraços de drenagem

Para terraços de drenagem, com formato triangular a altura d'água para condução da vazão máxima escoada em sua extremidade pode ser obtida pela eq. (47) (PRUSKI et al., 2009c).

$$H_f = \left[\frac{Q n_c (2 S_m S_t)^{5/3} (\text{sen}(aa) + \text{sen}(bb))^{2/3}}{S_c^{1/2} (S_t + S_m)^{5/3} (\text{sen}(aa) + \text{sen}(bb))^{2/3}} \right]^{3/8} \quad (47)$$

onde:

H_f = altura de água na extremidade final do canal do terraço, m;

Q = vazão na extremidade final do canal do terraço, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

n_c = coeficiente de rugosidade das paredes do canal, $\text{s m}^{-1/3}$;

S_c = declividade do canal, m m^{-1} ;

bb = declividade do terreno, m m^{-1} ;

aa = declividade da parede de montante do terraço, m m^{-1} .

Figura 4.11 – Representação esquemática de um terraço de drenagem com seção triangular.

Fonte: Pruski et al. (2009c), adaptado.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), o terraço de drenagem deve ter capacidade para receber a enxurrada esperada no seu máximo de precipitação, da área que está protegendo, a qual deve ser calculada semelhante ao terraço de infiltração, pela eq. (12).

O gradiente desse terraço deve ser selecionado de acordo com o local onde é construído, da necessidade de sua capacidade e, com isso, a escolha da velocidade permissível; gradientes variáveis podem ser requeridos para obter uma seção do terraço mais uniforme e melhor alinhamento (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010). A Tabela 4.16 apresenta as velocidades permissíveis da enxurrada no canal do terraço de drenagem.

Tabela 4.16 – Velocidade permissível da enxurrada no canal do terraço de drenagem.

Textura do solo	Velocidade permissível (m s ⁻¹)			
	Vegetação do canal			
	Sem vegetação	Pobre	Regular	Boa
Areno-limoso				
Areno-barrento	0,45	0,45	0,75	1,05
Limo-barrento				
Limo-argiloso-barrento	0,60	0,75	1,05	1,35
Areno-argiloso-barrento				
Argiloso	0,75	0,90	1,35	1,65

Fonte: Estados Unidos - SCS (1969), adaptado.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010) a seção do terraço de drenagem pode ser construída em formato triangular ou trapezoidal, com inclinação de talude variável. Contudo, os autores não apresentam formulações que possibilitem o dimensionamento dos terraços.

Através da modelagem apresentada pela bibliografia de conservação do solo nacional, fica claro que a pesquisa e a prática, não evoluíram no sentido de se esocar o excesso de água no sistema de cultivo. No dias de hoje, ainda são utilizados parâmetros de escoamento e velocidade determinados em outros países, com condições edafoclimáticas distintas do Brasil. Esses valores da literatura internacional podem não ser os mesmos, aqui. Desta forma, a utilização indiscriminada de coeficientes importantes deve ser reavaliada.

Nesta pesquisa, o enfoque será a drenagem do excesso de água. Esta drenagem será realizada pelo método proposto do Microterraço de Drenagem (item 5.2.4) dimensionado através da modelagem matemática para escoamento em canais abertos, apresentada no item 4.4.2, a qual possui uma modelagem bem definida e possibilita o dimensionamento exato das estruturas de conservação e seus respectivos parâmetros hidráulicos.

4.6.8 Modelo de dimensionamento dos canais escoadouros

Quando se utiliza terraceamento de drenagem é necessário o estabelecimento de canais escoadouros, que são canais de dimensão apropriada, com cobertura específica e capazes de transportar com segurança a enxurrada do local. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2010), o canal escoadouro vegetado é uma prática importante no planejamento conservacionista de uma área agrícola, uma vez que o sucesso da conservação do solo depende da remoção do excesso de água deste local.

Os canais escoadouros podem ser construídos com seções triangulares, parabólicas e trapezoidais. Em locais com declividades acentuadas a forma trapezoidal é indicada, por apresentar fundo achatado que reduz a velocidade de escoamento, o triangular é utilizado em casos de declividades menores onde seu fundo em “V” concentra as águas impedindo a deposição de sedimentos, já o parabólico é proposto para situações intermediárias. A Figura 4.12 ilustra as seções típicas.

A vazão máxima da enxurrada é o fator principal na determinação das dimensões do canal escoadouro. Bertoni e Lombardi Neto (2010) recomendam o uso do Método Racional (eq. 12) para determinação da vazão. Os canais abertos (canais escoadouros) devem ser projetados para conduzir a água a uma velocidade conveniente. A capacidade do canal pode ser determinada pela eq. (48).

$$Q = A V \quad (48)$$

onde

Q = vazão do escoamento permanente uniforme, $m^3 s^{-1}$;

A = seção do canal, m^2 ; e

V = velocidade do escoamento, $m s^{-1}$.

A velocidade deve ser mantida a níveis que não causem degradação da parte interna do canal escoadouro, determinada pela equação de Manning (eq. 19).

Os valores do coeficiente de rugosidade, foram apresentados na Tabela 4.5. Para canais escoadouros vegetados, recomendam-se, em geral, coeficientes de rugosidade variando entre 0,04 e 0,06 (HAMILTON e JEPSON, 1939), podendo para uniformização, ser adotado o valor 0,045 (LOMBARDI NETO, et. al., 1980).

Os valores das velocidades máximas permitidas para canais abertos podem ser visualizados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Velocidade máxima permitida em canais abertos (m s^{-1}).

		Solos mais erodíveis										
Cobertura do canal	Declividade (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nenhuma - Solo cultivado		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0	0	0	0	0	0
Nenhuma - Não cultivado		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0
Gramínea anual - regular		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0	0	0	0	0
Gramínea anual - bom		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0	0	0	0	0	0
Gramínea dens. média – regular		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0
Gramínea dens. média – bom		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0,9
Gramínea dens. média – ótimo		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,2
Gramínea densa – Stand ótimo		1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,2
		Solos menos erodíveis										
Cobertura do canal	Declividade (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nenhuma - Solo cultivado		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0
Nenhuma - Não cultivado		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0	0	0	0	0
Gramínea anual - regular		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0	0	0	0	0	0
Gramínea anual - bom		1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0	0	0	0	0	0
Gramínea dens. média – regular		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,75
Gramínea dens. média – bom		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,05
Gramínea dens. média – ótimo		1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,35
Gramínea densa – Stand ótimo		2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5

Fonte: Beasley (1972), adaptado.

Assim, para determinar as dimensões do canal escoadouro para conduzir o excesso de enxurrada, Bertoni e Lombardi Neto (2010) recomendam os seguintes passos:

- Calcular a vazão Q que será conduzida pelo canal (eq. 12);
- Determinar a declividade (D) do canal a ser construído (eq. 19);
- Determinar o tipo de vegetação e, com auxílio da Tabela 4.17, escolher a velocidade máxima permitida que não provocará erosão no canal escoadouro; e
- Calcular a área da seção pela eq. (43).

Embora este seja o método de dimensionamento mais utilizado, nesta pesquisa, tanto os terraços de drenagem, quanto os canais escoadouros serão tratados como canais abertos, no Método do Microterraço de Drenagem (item 5.2.4). Logo, seu dimensionamento será realizada pela modelagem matemática apresentada no item 4.4.2.

Para seu dimensionamento são aplicadas as seguintes equações:

A – Seção parabolóide:

$$\text{Área da seção: } A = \frac{2}{3} Bp \quad (49)$$

$$\text{Perímetro molhado: } PM = B + \frac{8p^2}{3B} \quad (50)$$

$$\text{Raio hidráulico: } R = \frac{B^2 p}{1,5 B^2 + 4p^2} \quad (51)$$

$$\text{Largura: } B = \frac{A}{0,67p} \quad (52)$$

B – Seção trapezoidal:

$$\text{Talude: } Z = \frac{e}{p} \quad (53)$$

$$\text{Área da seção: } A = bp + Zp^2 \quad (54)$$

$$\text{Perímetro molhado: } PM = b + 2p \sqrt{Z^2 + 1} \quad (55)$$

$$\text{Raio hidráulico: } R = \frac{bp + Zp^2}{b + 2p \sqrt{Z^2 + 1}} \quad (56)$$

$$\text{Largura: } B = b + 2pZ \quad (57)$$

C – Seção triangular

$$\text{Talude: } Z = \frac{e}{p} \quad (58)$$

$$\text{Área da seção: } A = \frac{B \cdot P}{2} \quad (59)$$

$$\text{Perímetro molhado: } PM = 2p \sqrt{Z^2 + 1} \quad (60)$$

$$\text{Raio hidráulico: } R = \frac{Zp}{2 \sqrt{Z^2 + 1}} \quad (61)$$

Figura 4.12 – Seções dos canais escoadouros: A – Parabolóide, B – Trapezoidal e C – Triangular.

Fonte: Bertoni e Lombardi Neto (2010), adaptado.

Os modelos encontrados na literatura nacional sobre conservação do solo expressam o movimento da água em grandes superfícies e, como já mencionado, não representam o fenômeno em sua realidade total. Além disso, os métodos de conservação do solo tradicionais (terraços de infiltração e drenagem) não dispõem de ferramentas matemáticas que representem os danos físicos causados pelo processo erosivo.

Desta forma, uma investigação sobre alternativas de dimensionamento e modelagem hidráulica é interessante tanto do ponto de vista acadêmico, quanto prático.

4.7 Planejamento e projeto no setor sucroenergético

O planejamento na agricultura é baseado na identificação e eliminação das possíveis causas da redução de produtividade e tem por finalidade maximizar o rendimento das culturas e minimizar os custos de produção o que, conseqüentemente, aumenta os lucros (LIU et al., 2006).

No cultivo da cana-de-açúcar, Benedini e Conde (2008) ressaltam que, para um melhor aproveitamento da área de plantio, um planejamento mais elaborado considerando o formato dos talhões e o traçado dos carregadores, de acordo com o relevo e o solo da área, deve ser realizado.

Trabalhos realizados por Gandini et al. (1996) demonstram que após a sistematização da área de uma fazenda houve uma diminuição de, aproximadamente, 13% nas horas efetivas de colheita devido a uma redução de 41% no número total de carregadores, otimizando o rendimento operacional das colhedoras e transbordos. De acordo com Penatti (2006), a racionalização do sistema de terraceamento pode auxiliar no planejamento do plantio com a possibilidade de se obter aumentos nos rendimentos operacionais nos tratos culturais e colheita mecânica de até 50%, dependendo das condições do projeto original.

Sendo assim, a sequência lógica das etapas de decisão do planejamento e do projeto de plantio de cana-de-açúcar pode ser estruturada na forma de uma árvore de decisão que, segundo Raiffa (1970), é uma ferramenta que visa auxiliar as tomadas de decisão com a compreensão facilitada dos processos através de uma representação gráfica simples. Pamplona e Montevechi (2005) afirmam que a árvore é uma maneira de visualizar as possibilidades relacionadas a cada opção, no curto e longo prazos, permitindo a organização e o controle de situações sujeitas a riscos.

A Figura 4.13 ilustra um exemplo de estrutura de árvore de decisão na qual os nós retangulares representam decisões e os losangulares a incerteza associada a caminhos alternativos.

Figura 4.13 – Exemplo de estrutura de uma árvore de decisão.

Desta forma, o tomador de decisão percorre as opções possíveis para as etapas de planejamento e projeto do plantio, de modo a buscar a melhor solução para aquela situação, o que pode determinar o sucesso do empreendimento sucroenergético.

Nas investigações abordadas no referencial teórico desta pesquisa e estudos adicionais realizados pelo próprio autor, até o momento foram encontrados fluxogramas somente das etapas industriais dos processos de produção de açúcar e etanol, não havendo referências sobre a árvore de decisão para etapas anteriores. Porém, o planejamento e o projeto da área para o plantio mecânico de cana-de-açúcar apresentam diferentes possibilidades que necessitam ser administradas e, portanto, são essenciais na composição dessa árvore. Uma organização mais detalhada, abordando essas fases do ciclo produtivo, permite investigar um conjunto de caminhos alternativos de forma ordenada, na busca da redução de custos através do aumento do rendimento operacional de máquinas e equipamentos. Nesse contexto, o desenvolvimento de uma árvore de decisão que contemple as possibilidades de planejamento e projeto do plantio envolvidas no processo de produção de cana-de-açúcar, além de ser importante para a gestão financeira do negócio, é viável no âmbito acadêmico.

Outras etapas importantes para a execução do planejamento e projeto das áreas de expansão e/ou reforma de cana-de-açúcar são apresentadas a seguir:

Levantamento topográfico

Na implantação de um canal, inicialmente é necessário realizar um levantamento topográfico. Esta etapa consiste da obtenção das informações planialtimétricas do local (tamanho da área e declividade, principalmente) bem como outras informações adicionais, tais como a localização das divisas e eventuais vizinhos; localização das estradas, carreadores e canais de vinhaça; localização de APPs (Áreas de Preservação Permanente) e demais pontos da propriedade como represas, linhas de energia, dentre outros. Além disso, atualmente o georreferenciamento da propriedade agrícola é exigido por lei (LEI 10.217, de 2001).

À semelhança de um projeto industrial ou residencial, a correta implantação da área de plantio de cana-de-açúcar exige um desenho detalhado do terreno, o qual deve incluir os terraços, carreadores e vias de acesso de modo a permitir um bom planejamento das operações de plantio e colheita mecanizada.

Classificação do solo

Resende et al. (2007) citam que de modo geral, a representação mais eficiente e simples da distribuição geográfica de um local é feita através de um mapa. Além disso, segundo os mesmos autores, em países como o Brasil, onde os fatores climáticos possuem grandes variações (mesmo em curtas distâncias), o uso de mapas, em especial o de solos, permite que conclusões experimentais possam ser aplicadas de forma mais efetiva em áreas gerais.

No levantamento, os solos são identificados e sua ocorrência na paisagem é representada em um mapa procedendo-se posteriormente à interpretação para o uso agrícola ou não. Além desse levantamento, um memorial explicativo, que define, descreve e interpreta as classes de solos do local é parte integrante do projeto.

O conhecimento da capacidade produtiva do solo e de algumas de suas particularidades são fatores que condicionam o sucesso dos empreendimentos agrícolas (KOFFLER e DONZELI, 1987), deste modo, aliado à classificação dos solos em suas unidades taxonômicas correspondentes, é fundamental realizar a amostragem do solo para fins de fertilidade. Esta etapa suporta toda a construção dos programas de fertilidade (sejam as práticas corretivas ou de adubações). Além disso, é uma fase crítica, onde os erros amostrais não podem ser corrigidos, o que pode levar a recomendações excessivas ou insuficientes de insumos (RIPOLI et al., 2006). Segundo Furtini Neto et al. (2001), a prática da amostragem de solos é indispensável para aumentar a produtividade das culturas.

Ambientes de produção

Ambiente de produção é definido como o somatório das interações das características de superfície e subsuperfície dos solos (físicas, químicas, mineralógicas, grau de declividade, dentre outras), associada às condições climatológicas locais (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, evaporação, ventos, dentre outras) e um manejo adequado com relação às correções e adubações, tratos culturais, plantio e colheita (PRADO, 2005).

Segundo Prado (2008), os componentes do ambiente de produção são representados pela profundidade, que tem relação direta com a disponibilidade de água e o volume de solo explorado pelas raízes; fertilidade como fonte de nutrientes para as plantas; temperatura que está relacionada com os níveis de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions e disponibilidade hídrica; e pela água como parte da solução do solo, vital para a sobrevivência das plantas.

Setorizar a área de projeto segundo seus ambientes de produção permite uma melhor estimativa das produtividades potenciais, das limitações em relação à disponibilidade de nutrientes e dos locais com maior probabilidade de risco de dano em função do processo erosivo. De acordo com Prado (2008), os custos operacionais são reduzidos e aumenta-se a longevidade do canavial, a partir do manejo de solos mais favoráveis a cultura.

Prado (2005) descreve com detalhes os ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar, na região Centro-Sul do Brasil.

4.7.1 Planejamento da conservação do solo e água no setor sucroenergético

O novo cenário de intensa mecanização exige uma reengenharia, uma revisão e interpretação dos conceitos, especialmente os que se referem ao preparo do solo e conservação do solo e água (MAZZA, 2015).

Benedini e Conde (2008) sugerem o aumento da distância horizontal entre terraços ou mesmo sua eliminação. Contudo, nestas situações não existem garantias de que apenas as práticas edáficas e vegetativas possam controlar o escoamento superficial, podendo, assim, ocorrer um dano conservacionista.

Neste novo cenário de intensa mecanização, para a obtenção da sustentabilidade no setor canavieiro torna-se relevante, em complementação às práticas mecânicas de conservação do solo, o planejamento das épocas e tipos de preparo do solo e épocas de plantio e colheita,

considerando-se as características dos solos e da topografia, aliadas a técnicas conservacionistas como a cobertura vegetal, o posicionamento e forma de sistema viário e cuidados com a entrada de água externa (MAZZA, 2015).

Segundo Sparovek e Maule (2015), a concepção original do terraceamento está relacionada ao excesso de água que não infiltrou no solo num evento de precipitação extremo, partindo do pressuposto de que este excesso de água deve ser conduzido ou interceptado da forma mais segura até o seu destino final, a rede de drenagem. A interceptação da enxurrada e sua condução são a essência do conceito original, havendo diversas formas de atingir esse objetivo.

Segundo Branquinho (2015), o terraceamento é uma prática extremamente difundida na cultura canavieira, sendo geralmente executado em nível, adotando-se distâncias verticais específicas (DV's). São comumente do tipo embutidos ou de base larga. O referido autor salienta a existência de outros métodos eficientes, porém pouco adotados, utilizando terraços em desnível que conduzam a água para canais escoadouros, os quais devem ser dimensionados de maneira correta.

Os terraços devem ser associados ao aumento da cobertura vegetal e à melhoria da infiltração de água no solo para ter a eficiência desejada. Quando utilizados isoladamente, são frequentemente ineficientes no controle da erosão, causando seu rompimento sérios problemas às áreas terraceadas, tendo em vista a concentração do escoamento superficial (DE MARIA e MARTINS, 2015).

O avanço do conhecimento em erosão do solo e desenvolvimento tecnológico para o controle da erosão foram importantes componentes da sustentabilidade agrícola e continuam fundamentais para a agricultura e o meio ambiente diante das exigências sociais e econômicas atuais. A evolução da ciência da erosão e da conservação do solo, neste momento, dá-se com auxílio da engenharia, das geotecnologias e da modelagem matemática, tanto na pesquisa como na tecnologia de controle de erosão (DE MARIA e MARTINS, 2015).

Sparovek e Maule (2015) afirmam que, por muito tempo, a cultura canavieira foi considerada protetora em relação à conservação do solo. As práticas de plantio e colheita eram realizadas antes do período chuvoso, o número de equipamentos e conseqüentemente, seu peso eram diferentes dos atuais, proporcionando menores danos ao solo. Entretanto, segundo os referidos autores, nos dias atuais, o cenário modificou-se.

As máquinas e equipamentos utilizados nas operações de preparo do solo, plantio e colheita evoluíram e assim, os métodos de realização destas etapas. Esta mudança de cenário,

por um lado positiva, gera uma nova realidade em termos de infiltração e escoamento superficial.

O aumento do escoamento superficial afeta diretamente duas práticas de conservação de solo que são: a sistematização e o terraceamento. Não é possível manter a mesma abordagem com escoamentos superficiais de maior volume, sendo preciso rever os conceitos que são utilizados para definir a sistematização e o terraceamento (SPAROVEK e MAULE, 2015).

O terraceamento sofreu importantes adaptações quando foi trazido para o Brasil, sendo que a principal é o destino do excesso da água final, onde agora, não existe sua condução, mas sim sua infiltração no canal do terraço. Esta mudança é peculiar ao Brasil e não existem registros de sua utilização fora deste contexto na agricultura (SPAROVEK e MAULE, 2015).

Além da mudança conceitual, outros parâmetros já discutidos em tópicos anteriores, como os coeficientes de perda de solo, o clima, a inexistência de projetos, o dimensionamento efetivo e a falta de pesquisas na área, são causas de degradação do solo e do baixo rendimento operacional e econômico das máquinas e equipamentos.

Uma alternativa para controlar o excesso de água que não infiltrou no solo e limitar seu poder destrutivo é o Método do Microterraceamento de Drenagem. Esta técnica de conservação alternativa integra conhecimentos das áreas de Hidráulica, Conservação dos Solos, Geomática, Tratos Culturais e Operações Mecanizadas, apresentando-se como uma possibilidade para aumentar o rendimento operacional das máquinas, com um sólido embasamento teórico da condução da água e da conservação do solo.

Nesta opção de conservação, utilizam-se os conceitos de planejamento e projeto individualizados para cada local, bem como a condução do excesso de água, com velocidade e demais fatores técnicos dimensionados de forma adequada, na busca de minimizar os danos da erosão.

4.8 Agricultura de Precisão

Agricultura de Precisão (AP) é uma nova tecnologia com uma longa história (COELHO, 2005). É uma forma inovadora de produção agrícola que representa a combinação única de velhos conceitos e novos instrumentos (NIELSEN et al. 1996; LUCHIARI et al., 2000).

Linsley e Bauer citados por Goering (1993) apresentaram em 1929, a Circular nº 346 da Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois (USA) na qual concluíram que os

requisitos de aplicação para calagem variavam bastante no mesmo talhão; sugeriram, também, que fossem feitos testes sistemáticos e detalhados no campo para que o volume de calcário pudesse ser aplicado de acordo com sua necessidade; ainda, expressaram a necessidade de se realizar a amostragem de solo como um processo sistematizado, em malhas de 100 m x 100 m.

Agricultura de Precisão é um método de administração cuidadosa e detalhada do solo e da cultura para adequá-las às diferentes condições encontradas em cada ponto da lavoura, tendo em vista a desuniformidade intrínseca dos solos (SCHUELLER, 1992).

De acordo com Blackmore e Larscheid (1997), os conceitos de AP estão relacionados à variabilidade da produtividade e dos atributos do solo e das plantas. Segundo esses autores, existem três tipos de variabilidade: espacial, temporal e preditiva. A variabilidade espacial pode ser observada ao longo do campo e constatada em qualquer mapa de fertilidade ou de produtividade; a variabilidade temporal é observada quando se comparam mapas de produtividade de vários anos e a variabilidade preditiva é a diferença entre a previsão de algum fator e o que realmente aconteceu.

Entretanto, é importante mencionar que em tempos passados quando predominava uma agricultura familiar explorada em pequenas áreas, era possível aos agricultores observar a variabilidade espacial das propriedades dos solos, bem como seus efeitos no desenvolvimento e na produção das culturas e, desta forma, era viável seu manejo com base nessas diferenças (COELHO, 2005).

Para Molin (2004), AP é um conjunto de tecnologias e procedimentos utilizados para otimizar sistemas de produção agrícolas. É embasada principalmente no gerenciamento da variabilidade espacial da produção e de seus fatores. O princípio básico, segundo Coelho (2005), é o manejo da variabilidade dos solos e das culturas no tempo e no espaço. Mulla e Schepers (1997) afirmam que sem variabilidade, o conceito de AP tem pouco significado.

Um trabalho pioneiro sobre variabilidade espacial da produção das culturas foi apresentado por Smith (1938), representado por um mapa de colheita de trigo. Contudo, segundo Cerri (2005), a aplicação de insumos em taxas variáveis permaneceu no esquecimento por muitos anos, até o momento em que a disponibilidade de microcomputadores, sensores e sistemas de posicionamento via satélite se tornaram disponíveis a custos acessíveis. A utilização integrada desses equipamentos permite um manejo mais específico das atividades agrícolas, bem como do gerenciamento da propriedade.

No Brasil, Balastreire (1997) iniciou os trabalhos em AP; a pesquisa resultou no primeiro mapa de produtividade para a cultura do milho (BALASTREIRE et al., 1997). Desde

então, diversos pesquisadores têm explorado essa temática, como Souza et al. (1999), Molin (2002), Molin e Silva Júnior (2003), Mondo et al. (2012), dentre outros.

Com um enfoque mais direcionado às máquinas e equipamentos, Clark e McGuckin (1996) e Strauss et al. (1998) afirmam que AP envolve sistemas automáticos, basicamente compostos por microcontroladores, sensores e atuadores acoplados ao implemento agrícola pré-existente e interligado ao Sistema de Navegação Global por Satélite – *Global Navigation Satellite System* (GNSS).

Com relação aos sistemas de localização, atualmente estão disponíveis o *Global Positioning System* (GPS), que é de propriedade do governo norte-americano, o *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* – GLONASS da Rússia e o GALILEO da União Europeia. No entanto, outros sistemas estão sendo implantados, como o COMPASS da China. O uso do GPS foi liberado pelo exército americano após a guerra do Golfo, no início dos anos 1990, quando era utilizado para espionagem permitindo a localização precisa, pelo cruzamento de dados de quatro satélites, com as coordenadas de altitude e longitude (PIRES et al., 2004).

Inúmeras são as tecnologias que impulsionaram e continuam promovendo o desenvolvimento da AP. Coelho (2005) agrupa essas tecnologias em seis principais categorias: (i) Computadores e programas; (ii) GNSS – Sistema de Navegação Global por Satélite; (iii) SIG's – Sistemas de Informação Geográfica; (iv) Sensoriamento Remoto; (v) Sensores e (vi) Controladores Eletrônicos de Aplicação.

Sparovek e Schnug (2001) afirmam que os conceitos básicos de AP também podem ser aplicados aos fatores de produção agrícolas, como matéria-prima, trabalho e tempo, os quais influenciam a eficiência das operações. Segundo os autores, se alguma etapa da produção pode ser feita com menos trabalho ou em menos tempo, como resultado de uma adaptação a condições específicas, isto pode representar um ganho de eficiência para o agricultor ou redução de um efeito indesejado. Aliado aos incrementos agrícolas, outro importante fator que contribuiu para o desenvolvimento e aplicação da AP foi a maior conscientização ecológica relativa aos processos de degradação ambiental. Neste caso, as aplicações de insumos são específicas para cada ponto da área, reduzindo-se, desta forma a probabilidade de lixiviação e contaminação do ambiente (BLACKMER e SCHEPERS, 1996; OSTERGAARD, 1997; COELHO, 2005).

No setor sucroenergético também são aplicados os conceitos de AP e segundo Balastreire (1998), estes são divididos em quatro frentes:

1. Mapeamento de solo – indicando o potencial de fertilidade do solo, permitindo o estabelecimento de estratégias para aplicação de fertilizantes;

2. Mapeamento da cultura – permitindo a construção de mapas georreferenciados dos talhões e da cultura em seus diversos estágios;

3. Mapeamento da colheita – com utilização de sensor de fluxo de massa pode-se obter um mapa de produtividade para cada célula do talhão e aliado ao georreferenciamento, define-se a localização exata de cada célula permitindo a verificação *in loco* do motivo da baixa produtividade;

4. Aplicação localizada de insumos – a decisão do melhor método de gerenciamento da área pode ser feito com auxílio de programas computacionais específicos, os quais fornecem mapas de aplicação localizada de insumos. Com auxílio de equipamentos especialmente instrumentados para o controle de doses, pode-se aplicar a quantidade requerida em cada célula utilizando o seu potencial máximo produtivo.

Na safra 2010/2011, a participação de AP nas lavouras canavieiras foi de 30% na região produtora Centro-Sul Tradicional (SP, RJ e PR), 33% na Centro-Sul Expansão (MG, MT e MS) e 0% na região Nordeste (PE, AL e PB) para os canaviais amostrados de acordo com o método de PECEGE (2011). Segundo estes autores, as técnicas de AP utilizadas nessas áreas foram o uso de imagens de satélite, piloto automático, fotografias aéreas, amostragem de solo georreferenciada, tecnologia de aplicação em taxa variável e sistema de direcionamento via satélite. Entretanto, na região Centro-Sul Tradicional foram constatadas as mesmas tecnologias citadas, à exceção da fotografia aérea e da aplicação de fósforo em taxa variável.

Desta forma, o uso de AP no setor sucroenergético está relacionado com o direcionamento de tráfego via satélite (barra de luz para correção da direção e piloto automático), aplicação de taxa variável de insumos baseada em amostragem de solo mais detalhada (amostras em grades georreferenciadas) e mapas de produtividade de colheita, através de sensores acoplados nas colhedoras.

Na literatura explorada, contudo, não foram encontradas referências sobre mapeamento planialtimétrico detalhado com o objetivo de aprimorar o projeto de blocos de colheita de cana-de-açúcar, no sentido de conciliar as técnicas de conservação do solo com a otimização do processo de colheita mecanizada.

4.9 Ferramentas computacionais

A evolução dos sistemas computacionais possibilitou a utilização de novas ferramentas de planejamento para o setor agropecuário, como por exemplo, o uso do modelo digital do terreno (MDT) associado a ferramentas de desenho assistidas por computador (DAC ou CAD – *Computer Aided Design*).

Seeruttun e Crossley (1997) apresentam a aplicação dessas tecnologias para o planejamento da colheita mecanizada de cana-de-açúcar na República da Maurícia. Concluíram, que o uso de MDT e CAD permite categorizar declividades, identificar linhas de escoamento superficial, fornecer subsídios para os cálculos de terraplenagem e desenhar novos projetos para a mesma área.

Entretanto, as ferramentas de CAD isoladas não realizam simulações dinâmicas de chuva e não ilustram pontos de alagamento. Além de não fornecerem os subsídios para aos cálculos de terraplenagem, ou seja, não possuem algoritmos de cálculo dos valores relativos à construção dos traçados.

Na revisão de literatura, também foram encontrados trabalhos nos quais o uso das ferramentas computacionais é aplicado no roteamento de máquinas em áreas de colheita, descritos por Oksanen (2007), Jin e Tang (2010ab), Driscoll (2011) e Zandonadi (2012). Entretanto, esses trabalhos apenas otimizam o percurso das máquinas e equipamentos para uma função objetivo de custos variáveis.

Assim, esta tese se diferencia das referências encontradas na literatura sobre aplicação de ferramentas computacionais, ao utilizar ferramentas de CAD, SIG, e simuladores dinâmicos de chuva com o objetivo de otimizar o projeto das áreas para colheita mecânica de cana-de-açúcar em função de uma melhor geometria das linhas de plantio, em associação a uma modelagem matemática do problema do escoamento superficial.

Outra ferramenta que se tornou acessível foi o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Uma visão histórica da evolução desta ferrameta e sua aplicação na agricultura foi descrita por Miranda (2010).

No setor sucroenergético brasileiro, pesquisadores vêm utilizando as ferramentas de SIG nas etapas do ciclo produtivo, como no planejamento da base física (CONDE e JOAQUIM, 1995; SPAROVEK, 1997; GUIMARÃES e RAFFO, 2005), no uso do solo para cultivo de cana e manejo das áreas de preservação (OLIVEIRA e SERAPHIM, 2011), na elaboração de mapas

de produtividade (MOLIN, 2002; MOLIN et al., 2004), na avaliação do desempenho de máquinas na colheita (MOLIN et al., 2006), dentre outros.

Contudo, não foram encontradas referências que abordem de maneira simultânea o planejamento da base física atrelado ao aumento do rendimento operacional das máquinas nas etapas de plantio e colheita e os custos envolvidos nestas operações.

Vários são os programas, tanto comerciais quanto livres, que contém ferramentas de MDT, CAD e SIG como por exemplo, o AutoCAD® (Autodesk, Inc.); o TNTmips® (MicroImages, Inc.); o ArcGIS® (Esri, Inc.); o Quantun GIS (OSGeo), etc.

Durante a revisão de literatura sobre ferramentas computacionais aplicáveis ao problema de planejamento e projeto de áreas de colheita, foi encontrado o trabalho de Wilensky (1999). O autor desenvolveu um *software* denominado NetLogo®, constituído de um ambiente de modelagem programável multi-agente desenvolvida para a modelagem e simulação de diversos fenômenos naturais e sociais, o qual também é considerado um *software* livre ou *freeware*.

Uma aplicação deste é a modelagem do escoamento de água em um terreno através do modelo *Grand Canyon* desenvolvido por Wilensky (2006). Este, simula uma precipitação aleatória (com intensidades médias variáveis) em um modelo digital de terreno, sendo possível a visualização do escoamento superficial e dos pontos de acúmulo de água.

4.10 Desempenho operacional e econômico de colhedoras de cana-de-açúcar

Ripoli (1996) descreve o desempenho operacional de colhedoras de cana-de-açúcar como sendo o conjunto de atributos que caracterizam o grau de habilitação da máquina para execução da operação de colheita, sob determinadas condições operacionais. Além de avaliar a capacidade efetiva (kg ha^{-1} ou t dia^{-1}), o desempenho operacional deve levar em conta a qualidade da matéria-prima, bem como suas perdas.

As perdas podem ser divididas em visíveis e invisíveis. As visíveis são aquelas de fácil observação no campo após a colheita, como: cana inteira, rebolos, pedaços de cana, ponteiros, tocos, dentre outros, todas mensuráveis por amostragem. Já as perdas invisíveis estão relacionadas a perdas na forma de caldo, serragem e estilhaços que ocorrem devido aos movimentos rotativos nos processos internos da colhedora (NEVES, 2003), estas perdas são de difícil mensuração.

Segundo Ripoli e Ripoli (2009), a velocidade de deslocamento das colhedoras de cana é influenciada diretamente pelas condições da cultura e do terreno. Geralmente, as colhedoras podem trabalhar com velocidades de até 9 km h^{-1} , mas atualmente, não tem ultrapassado 4 a 6 km h^{-1} , possivelmente devido à falta de planejamento dos talhões, voltados à colheita mecanizada. A velocidade deve ser ajustada em função das características do talhão no que diz respeito à sistematização, porte do canavial e produtividade agrícola estimada. Diversas são as pesquisas que comprovam o aumento da capacidade operacional das colhedoras de cana com o aumento da velocidade de avanço (ROZEF, 1989; RIPOLI et al., 1999; CARVALHO FILHO, 2000; NERY, 2000; RIPOLI et al., 2001; BELARDO, 2010).

Outro fator que afeta o rendimento operacional das máquinas é o comprimento da linha de colheita. De modo a ilustrar esta afirmação, apresenta-se um exemplo hipotético, com as seguintes características:

Velocidade média de trabalho = 5 km h^{-1} ;

Produtividade da área = 80 t ha^{-1} ;

Espaçamento entre linhas = 1,5 m;

Horas de colheita efetiva = 15 h;

Tempo de espera de transbordo = 0 h;

Tempo de manobra = 1,5 min; e

Comprimento médio da linha de plantio = variando entre 100 e 1.000 m.

Para o cálculo do desempenho operacional da colhedora em função do comprimento da linha foi utilizada uma planilha eletrônica, representando um Simulador de Colheita (Figura 4.14).

Fonte: JUNQUEIRA, R.deA.R. 2014. Planilha desenvolvida como parte da Tese no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR).

A Figura 4.15 representa a capacidade efetiva da colhedora de cana, esta foi obtida através do Simulador de Colheita com variação dos dados previamente enunciados (comprimento médio da linha de colheita de 100 a 1.000 m), mantendo-se todos os demais parâmetros (Velocidade média de trabalho, Produtividade da área, Espaçamento entre linhas, Horas de colheita efetiva, Tempo de espera de transbordo e Tempo de manobra) constantes. Assim, essa figura ilustra o aumento da capacidade efetiva em função do comprimento médio da linha de colheita.

Observa-se que o aumento não é linear, ou seja, o rendimento operacional da máquina é marginalmente decrescente com o aumento do comprimento da linha de colheita. O ajuste de uma função logarítmica mostra que para um aumento de 100 para 200 metros, ocorre um incremento de 24% no potencial produtivo, enquanto que num aumento de 800 para 900 metros o incremento é de 0,8% e, que níveis da ordem de 800 t dia⁻¹ (capacidade efetiva da máquina) só serão atingidos com comprimentos iguais ou superiores a 500 metros.

Figura 4.15 – Capacidade efetiva da colhedora de cana-de-açúcar em função do comprimento da linha de colheita.

Além do comprimento efetivo da linha de colheita, outro fator que influencia diretamente na capacidade efetiva da colhedora é o tempo de manobra. A Figura 4.16, também obtida através do Simulador de Colheita, ilustra a influência do tempo de manobra somado ao comprimento da linha de colheita no rendimento operacional da máquina.

O terraceamento em nível convencional implica em convergência das linhas (matação), o que além de diminuir o comprimento médio da linha de colheita, aumenta os tempos de manobras das máquinas e equipamentos. Por exemplo, para um comprimento médio da linha de colheita de 400 m, para o tempo de manobra de 1 minuto, a capacidade efetiva da máquina é de 793 t dia⁻¹, enquanto que para um tempo de manobra de 2 minutos, a capacidade é de 670 t dia⁻¹. Ou seja, para um menor tempo de manobra, nesta situação, há um incremento da ordem de 20%, confirmando, assim, a influência positiva para tempos de manobras menores.

Figura 4.16 – Capacidade efetiva da colhedora de cana-de-açúcar em função do tempo de manobra e do comprimento da linha de colheita.

5 MÉTODO

O método busca a minimização de uma função de custos total do processo de produção de cana-de-açúcar. A proposta investiga as alternativas de construção dos blocos de colheita da forma tradicional (terraços de infiltração) e com linhas de plantio paralelas e em desnível, com drenagem superficial do terreno através de canais escoadouros (microterraços de drenagem).

O objetivo principal é a redução do custo total de produção na cultura canavieira, cuja função é apresentada na eq. (62).

$$\text{MinCT} = \sum \text{CP} + \sum \text{CC} \quad (62)$$

onde:

MinCT = Minimização dos custos totais;

$\sum \text{CP}$ = Somatório dos custos de plantio; e

$\sum \text{CC}$ = Somatório dos custos de colheita.

Sendo que a função MinCT está sujeita a:

1. Conservação do solo;
2. Infraestrutura existente;
3. Áreas limitantes; e
4. Condições edafoclimáticas.

O custo do solo perdido pelo processo erosivo não será considerado neste modelo, uma vez que sua determinação é complexa e ainda não há um consenso em relação ao método. Os detalhes e uma discussão mais aprofundada sobre essa temática são descritos por CROSSON (1995); DOUGLAS (1999); PIMENTEL e SKIDMORE (1999); PIMENTEL et al. (1995); TRIMBLE (1999); e TRIMBLE e CROSSON (2000).

Qualquer que seja a alternativa conservacionista a sua modelagem requer:

1. O levantamento de dados e a avaliação da área;
2. A geração de alternativas de projeto da área para a colheita mecanizada; e
3. A avaliação dos custos de cada alternativa.

Descrevem-se a seguir, as decisões que precisam ser tomadas pelo(s) analista(s) em uma sequência lógica que é seguida intuitivamente pela maioria dos gestores do processo de

produção de cana-de-açúcar. Brugnaro e Sbragia (1986) apresentam diversos fluxogramas para a gestão do processo de produção de cana-de-açúcar, contudo, cabe ressaltar que não se encontrou na revisão de literatura ferramentas que explicitassem os detalhes das etapas de geração dos traçados e análise do escoamento superficial.

5.1 Primeira etapa – Levantamento de dados e avaliação

O projeto do plantio tem início com o levantamento de dados e avaliação da área para a colheita mecanizada. O tomador de decisão terá que decidir em função dessas alternativas e das boas práticas agronômicas, o caminho a ser percorrido.

A Figura 5.1 apresenta o Fluxograma da etapa de Levantamento de dados e avaliação da área para a colheita mecanizada.

Figura 5.1 – Fluxograma da etapa de Levantamento de dados e avaliação da área para a colheita mecanizada.

Figura 5.1 – Continuação...

O conteúdo do fluxograma da etapa de levantamento de dados e avaliação da área é apresentado na sequência.

O primeiro nó da árvore está associado à situação atual da área, com relação à cultura existente no local.

- Área de expansão ou de reforma do canavial?

Vamos admitir, inicialmente, que seja uma área de reforma. Na cultura canavieira pode-se proceder à reforma imediatamente após o último corte, ou realizar a rotação de culturas antes do novo plantio.

Ao optar pela rotação, todas as operações de correção, preparo do solo, adubação (se houver, pois em caso de adubos verdes esses são geralmente incorporados ao solo), plantio e colheita devem ser realizadas a fim de maximizar a produção da cultura da rotação. Informações detalhadas sobre rotação de culturas em cana-de-açúcar podem ser obtidas em Penariol e Segato (2007). No caso de reforma imediata do canavial, o tomador de decisão segue para o próximo nó de decisão, o qual é dedicado à análise das áreas adjacentes:

- As áreas vizinhas são favoráveis ao plantio de cana-de-açúcar?

Esse questionamento não faz menção aos interesses pessoais nem ideológicos das pessoas do entorno, mas sim aos limites geográficos, podendo ser favoráveis ou não ao cultivo de cana-de-açúcar.

Por exemplo, se o proprietário vizinho decidir investir em produção orgânica de hortaliças, a aplicação de defensivos na lavoura de cana pode incidir sobre a lavoura vizinha (através da deriva, por exemplo) afetando ou não a lavoura. O vizinho, nessa situação, poderia sentir-se prejudicado e iniciar uma ação judicial contra o produtor de cana requerendo indenizações. Sendo assim, pode-se optar por considerar o plantio de cana não favorável nessa época do ano, postergando a decisão.

Caso a área vizinha não apresente nenhum impedimento à reforma do canavial, o tomador de decisão segue para a próxima etapa que é a limpeza da área para plantio.

A limpeza da área se constitui na erradicação (química ou mecânica) da soca antiga e de eventuais plantas daninhas. Durante essa operação é possível através de dispositivos de agricultura de precisão, acoplados aos implementos agrícolas, realizar um levantamento planialtimétrico detalhado da área em questão. Essas informações planialtimétricas detalhadas constituirão a base dos modelos digitais do terreno, essenciais para a etapa de projeto de plantio.

As etapas seguintes são de correção e preparo do solo para o plantio de cana-de-açúcar. Constituem-se novas oportunidades para a execução do levantamento planialtimétrico detalhado (admitindo que essas máquinas e implementos possuam os equipamentos de AP para essa função), caso o mesmo não tenha sido realizado durante a limpeza da área.

Na sequência, o fator topográfico é analisado.

- A topografia é favorável à colheita mecanizada?

Se a resposta for negativa, procura-se uma cultura alternativa.

- Existe outra cultura que pode ser plantada no local?

Caso exista, o tomador pode optar por plantar esta espécie. Caso não exista, o tomador é direcionado a descartar a opção da área em questão.

Realizadas as operações de correção e preparo, o tomador de decisão se defronta com mais um nó:

- O levantamento planialtimétrico detalhado foi realizado?

Se a resposta for positiva, nos encontramos na etapa de projeto da área a qual será abordada posteriormente.

Porém, se o levantamento planialtimétrico detalhado ainda não tiver sido realizado não há como prosseguir para a etapa de projeto. Os dados obtidos por esse levantamento, principalmente as informações altimétricas locais, são a base para a construção do modelo digital do terreno (MDT) e planejamento da áreas de plantio, possibilitando o aumento de rendimento das máquinas e equipamentos.

Neste caso, o próprio tomador de decisão deve acionar sua equipe para efetuar o levantamento planialtimétrico detalhado ou contratar um serviço especializado que realize essa tarefa, dentro de critérios tecnicamente apropriados.

Vale ressaltar que o levantamento planialtimétrico detalhado, além de fornecer dados da área de plantio, fornece os dados das áreas das estradas, carreadores e dos canais de vinhaça.

Em outro cenário, caso o tomador de decisão tivesse respondido expansão no segundo nó de decisão, as análises seriam diferentes.

Seguindo o fluxograma neste sentido, o próximo nó a ser avaliado aborda os atributos pedológicos do local:

- Classe de solo local apta ou inapta ao cultivo de cana-de-açúcar?

Esta etapa consiste em enquadrar o solo local nas classes mais aptas para o plantio de cana, desencadeando a sequência do planejamento ou restringindo seu uso. Confirmada a inadequação do solo ao plantio de cana, o usuário retorna à alternativa de cultivo, pois seu solo não se enquadra nas classes preferenciais de plantio de cana-de-açúcar.

O potencial pedológico do local pode ser classificado de acordo com Prado (2005) e Manzatto et al. (2009). Esta pesquisa fundamenta-se nestas classificações como base para a análise de decisão deste nó, na sequência:

1. Deficiência de fertilidade;
2. Deficiência de água;
3. Excesso de água ou deficiência de oxigênio;
4. Suscetibilidade à erosão;
5. Impedimentos à mecanização e
6. Impedimento ao sistema radicular.

Para Manzatto et al. (2009), em particular, as características de relevo das unidades não foram consideradas.

A etapa seguinte é a classificação climática do local. Os critérios para a classificação da aptidão climática para cana-de-açúcar também foram definidos por Manzatto et al. (2009) e são utilizados neste trabalho. A Tabela 5.1 apresenta esses critérios.

Tabela 5.1 – Legenda e critérios para a classificação da aptidão climática.

CLIMA	DESCRIÇÃO
A	Baixo Risco – Sem limitação ao cultivo – Área indicada • Temperatura média anual > 19° C • ISNA > 0,6 • Geada < 20% • Deficiência Hídrica < 200 mm
B	Baixo Risco – Irrigação de salvamento indicada – Área indicada • Temperatura média anual > 19° C • ISNA > 0,6 • Geada < 20% Deficiência Hídrica > 200 e < 400 mm
C	Carência térmica ou alto risco de geada – Área não indicada • Temperatura média anual < 19° C ou geada > 20% • ISNA > 0,6 • Geada > 20% Deficiência Hídrica < 200 e 400 mm
D	Irrigação intensiva imprescindível – Área não indicada • ISNA < 0,6 e Deficiência Hídrica > 400 mm
E	Excesso de água com prejuízo para maturação e colheita – Área não indicada • Período seco < 3 meses

*ISNA – Índice de Satisfação das Necessidades de Água

Fonte: Manzatto et al. (2009), adaptado.

Para facilitar as análises de decisão desta etapa, os parâmetros temperatura e deficiência hídrica serão separados. Logo a primeira análise climática é:

- A temperatura local é apta ou inapta ao cultivo de cana?

Consideram-se neste fluxograma, temperaturas aptas, as temperaturas médias maiores que 19°C. Quando a temperatura ultrapassar 20°C há um aumento na taxa de crescimento da planta, sendo que a faixa entre 25°C e 33°C é a mais favorável ao desenvolvimento vegetativo da cultura (KEATING et al., 1999; LIU et al., 1999).

Caso a temperatura média do local seja considerada inapta (menor que 19°C), deve-se buscar alternativas de plantio.

Dando sequência à classificação da aptidão climática, o próximo nó aborda a deficiência hídrica:

- O déficit hídrico anual é menor que 200 mm?

Em caso de resposta positiva, esta caracteriza o plantio de sequeiro e o próximo nó decisório relaciona-se ao uso de vinhaça na fertirrigação, visto que esta operação pode ou não limitar o desenvolvimento da cultura. Assim:

- Uso da vinhaça em fertirrigação?

Definida a utilização, realizam-se todas as operações necessárias à aplicação do insumo (informações sobre irrigação e fertirrigação em cana-de-açúcar podem ser encontradas *on line* em www.canapedeagua.com.br).

Existe também, a possibilidade do déficit hídrico anual do local de plantio ser maior que 200 mm e não haver condições técnicas ou econômicas para realizar a fertirrigação com vinhaça, caracterizando o plantio irrigado. Neste caso, uma avaliação mais detalhada do déficit hídrico é necessária para dar prosseguimento ao fluxograma.

- Qual a faixa de deficiência hídrica do local?

A resposta deste nó está dividida em três faixas de deficiência hídrica (DH), as quais caracterizam três sistemas de irrigação:

200 mm < DH < 400 mm = irrigação complementar

400 mm < DH < 600 mm = irrigação de salvamento

DH > 600 mm = irrigação plena

Cabe agora a seguinte decisão:

- Irrigar ou não irrigar a área de plantio?

Se o tomador de decisão optar por não irrigar a área, automaticamente ele deve buscar uma cultura alternativa visto que a cana-de-açúcar não se desenvolveria de maneira adequada sob tais déficits (MANZATTO et al., 2009).

A opção por irrigar implica em assumir todos os custos e riscos da operação, o que conduz a um novo nó decisório:

- Qual a origem da fonte de água?

Neste trabalho foram admitidas duas possíveis fontes de água: a água oriunda de outorga (água superficial ou subterrânea) ou originária de águas residuárias (efluentes domésticos).

Decidindo pela outorga, segue-se no fluxograma até encontrar novo nó decisório.

- A outorga de água foi autorizada?

Não conseguindo autorização para a outorga, o tomador de decisão deve buscar uma cultura alternativa, uma vez que a cana-de-açúcar não se desenvolveria de maneira adequada sem a irrigação necessária. Do contrário, de posse da outorga, caminha-se no fluxograma até o nó decisório sobre avaliação das áreas vizinhas.

O tomador de decisão pode também, ter a sua disposição águas residuárias originando novo nó decisório.

- As águas residuárias são aptas para a utilização em cana-de-açúcar?

A irrigação com águas residuárias pode beneficiar as culturas agrícolas com água e nutrientes essenciais (especialmente o nitrogênio), beneficiando também a química do solo (LEAL et al., 2009).

Os cultivos agrícolas têm sido considerados uma alternativa interessante para a aplicação de águas residuárias tratadas, evitando a descarga em cursos d'água naturais e minimizando os riscos associados à eutrofização (FEIGIN et al., 1991). A agricultura pode facilmente usar a água e os nutrientes presentes nas águas residuárias. Contudo, isto pode causar alguns problemas principalmente com nitratos e outros sais que podem ser depositados nas águas subterrâneas por lixiviação ou acúmulo de sódio e agentes patogênicos no solo (BOND, 1998). Na maioria dos casos, a irrigação de culturas com águas residuárias altera a química do solo causando ligeira diminuição na acidez, aumento significativo nas concentrações de sódio (Na^+) e porcentagem de Na^+ trocável, efeitos mistos no potássio (K^+) e magnésio (Mg^{2+}) do solo e aumento de cálcio (Ca^{2+}) trocável (FONSECA et al, 2007).

Leal et al. (2009) afirmam que a irrigação deve assumir grande importância futura para a produção de cana-de-açúcar de modo que a utilização de águas residuárias exigirá uma gestão cuidadosa, bem com orientações técnicas adequadas. Uma vez que as restrições agronômicas relativas às exigências de produção sejam observadas, as alterações previstas pela irrigação com águas residuais podem ser administradas.

Caso a fonte de água residuária seja classificada como inapta para uso, deve-se procurar outra cultura ou retornar ao nó decisório da origem da fonte de água e optar pela outorga; do contrário, prejuízos poderão ocorrer durante o desenvolvimento da planta pela falta de água ou ao próprio produtor pelo uso inadequado das águas residuárias.

Classificada como apta, o tomador de decisão assume todos os custos e riscos da operação de irrigação e se responsabiliza pelo dimensionamento e manutenção do sistema.

A partir deste ponto, o tomador de decisão se depara com o nó dedicado à análise das áreas adjacentes ao plantio, já descrito previamente, e desta forma, caminha até a última etapa do fluxograma de planejamento que é o projeto.

5.2 Segunda etapa – Projeto da área de plantio

A segunda etapa constitui-se da elaboração de um projeto digital de plantio com o objetivo de maximizar os rendimento das máquinas e equipamentos envolvidos, respeitando os limites técnicos de velocidades de escoamento superficial.

Na sequência serão apresentadas as fases que compõem a etapa de projeto. Esta foi dividida em quatro fases descritas abaixo.

A Fase 1 é crítica, caso o projetista opte por avaliar o projeto de plantio com as opções de conservação do solo pelo Microterraço de Drenagem ou pelo Escoamento Superficial Difuso. Embora a planialtimetria detalhada também seja recomendada para os outros métodos de conservação.

5.2.1 Fase 1: Validação do levantamento planialtimétrico e geração do modelo digital do terreno (MDT) no Sistema de Informações Geográficas (SIG).

A Figura 5.2 ilustra o fluxograma desta fase.

Figura 5.2 – Validação do levantamento planialtimétrico e geração do modelo digital do terreno no Sistema de Informações Geográficas.

Neste ponto, o tomador de decisão se depara com um questionamento fundamental para prosseguir na etapa de projeto:

- Os arquivos georreferenciados coletados são utilizáveis?

Uma vez que o levantamento das áreas foi realizado, os arquivos devem ser conferidos no programa de SIG. Esta aferição é de caráter qualitativo, uma vez que será feita visualmente. Constatado algum defeito (dados corrompidos ou falta de dados), um novo levantamento deverá ser realizado, complementando o arquivo. Não existindo defeitos, os arquivos são considerados utilizáveis.

No passo seguinte, executa-se a limpeza dos dados, ou seja, são feitas as eliminações de pontos problema. Considera-se, aqui, ponto problema aquela coordenada georreferenciada que: a) não apresenta coordenada; b) localiza-se fora da região do projeto; c) é coletada repetidamente, criando um acúmulo do mesmo ponto.

Esses erros podem ocorrer devido a alguns fatores: a) erro do operador da máquina/implemento; b) erros ocasionados pelo GNSS; c) manobras e reabastecimento da máquina/implemento; dentre outros.

Realizada a limpeza dos dados, questiona-se:

- Após a limpeza, os dados são utilizáveis?

Esta pergunta se faz necessária uma vez que após a limpeza dos dados, o arquivo final pode não conter todas as informações necessárias para as próximas etapas. Assim, caso este fato seja constatado, o tomador de decisão vê-se obrigado a realizar um levantamento planialtimétrico detalhado complementar. Sendo constatada a presença de elementos suficientes e com qualidade comprovada, avança-se para o próximo passo.

O levantamento planialtimétrico detalhado geralmente não é realizado em uma única operação, depende do tamanho da área de projeto, da quantidade de estruturas (estradas, carregadores, etc.), das máquinas/implementos disponíveis e dos operadores. Isto faz com que um arquivo único não seja gerado imediatamente, logo, a próxima tarefa é a união de todos os arquivos, já limpos, construindo assim, um único arquivo vetorial da área de projeto.

Na sequência, faz-se necessário a conversão de formato do arquivo vetorial para arquivo matricial. Essa operação é realizada diretamente nos programas de SIG.

Ao final desta fase, criam-se os modelos digitais do terreno (MDT's) da área de projeto (vetorial e matricial). Esses arquivos devem ser salvos para continuidade das etapas.

5.2.2 Fase 2: Visualização do escoamento superficial no MDT.

Recomenda-se que a visualização do escoamento superficial seja realizada tanto pelo método estático, quanto pelo método dinâmico, uma vez que são métodos complementares. A aplicação dos dois métodos favorece a identificação dos pontos de acúmulo de água na área de projeto, auxiliando na correção das imperfeições do terreno (nivelamento), reduzindo os riscos de dano pelo processo erosivo. Soma-se a isso, o fato de se conhecer exatamente os locais mais susceptíveis a acúmulos e escoamentos, consequentemente, os locais de maiores riscos.

A análise estática é realizada via *software* AutoCAD Civil 3D® e a análise dinâmica via *software* NetLogo®. As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram os métodos.

Figura 5.3 – Visualização do escoamento estático no *software* AutoCAD Civil 3D®.

Figura 5.4 – Visualização do escoamento dinâmico no *software* NetLogo®.

Análise estática

São listados, na sequência, os passos que possibilitam a visualização estática do escoamento da água na área de projeto via *software* AutoCAD Civil 3D® (Figura 5.3).

Passo 1

De posse do arquivo vetorial completo da área de projeto, extrair os dados de latitude, longitude e altitude dos pontos através da tabela de atributos no programa de SIG. Salvar o novo arquivo no formato texto em diretório específico, de modo a facilitar sua localização.

Passo 2

No *software* AutoCAD Civil 3D® configurar unidades, escala e sistema de referência de coordenadas.

O referencial do sistema de coordenadas (*Datum*) do AutoCAD Civil 3D® deve ser o mesmo sistema de coordenadas do arquivo vetorial (sistema de coordenadas dos pontos coletados pelo GNSS no campo), por exemplo o SAD 69, SIRGAS 2.000 e o WGS 84.

Passo 3

Inserir o arquivo texto obtido no Passo 1 (coordenadas geográficas e altitude) no *software* AutoCAD Civil 3D®.

Passo 4

Gerar um MDT no AutoCAD Civil 3D®. O programa gera automaticamente uma triangulação entre os pontos georreferenciados criando uma superfície digital, com relação ao Datum especificado. Na sequência, relaciona-se a essa superfície, o arquivo texto que contém os pontos e respectivas coordenadas geográficas (Passo 1) gerando o MDT da área de projeto.

De modo a facilitar a visualização dos detalhes da topografia do terreno e possibilitar a um melhor desenho, geram-se as curvas de nível e alocam-se os tavegues nos MDT's (esta operação pode ser realizada tanto no Quantum GIS®, quanto no AutoCAD Civil 3D®).

- Geração de curvas de nível no MDT

Estas operações são realizadas automaticamente em ambos os programas através da interpolação dos dados altimétricos, já inseridos nos sistemas.

- Alocação das cristas e talvegues no MDT

As cristas e talwegues são alocadas manualmente, pelo projetista, através de sua visualização dos pontos da planialtimetria detalhada e das ferramentas do SIG, que permitem uma observação detalhada da área.

Neste passo, já será possível visualizar o formato do terreno em 3D ilustrando a topografia do terreno, bem com as curvas de nível indicando as variações de declividade da superfície.

Passo 5

De posse do MDT, ativar ferramenta de recurso gráfico que apresenta setas indicativas do sentido de escoamento superficial, em função da topografia do terreno.

Passo 6

Por último, salvar o MDT (.dwg) que contém o sentido de escoamento.

O resultado esperado é semelhante a Figura 5.5, apresentada na sequência.

Figura 5.5 – Visualização do escoamento estático no *software* AutoCAD Civil 3D®.

Análise dinâmica

Serão listados, aqui, os passos que possibilitam a visualização dinâmica do escoamento da água pelo *software* NetLogo® (Figura 5.4).

Passo 1

O arquivo de entrada no NetLogo® deve ser em formato texto, uma vez que o *software* faz a interpretação dos valores de altitude dispostos em formato matricial. Assim, o arquivo do terreno em formato *raster* (obtido na Fase 1) deve ser convertido em arquivo texto (esta operação é realizada diretamente no programa de SIG).

Passo 2

Alimentar o modelo de simulação *Grand Canyon* (Wilensky, 2006) com o arquivo texto.

Passo 3

Simular a dinâmica do fluxo de água superficial. Cabe observar que o modelo *Grand Canyon* é um modelo de eventos distretos que não contém algoritmos de cálculo dos parâmetros hidráulicos do escoamento. Ele apenas ilustra, graficamente, a dinâmica de acúmulo e escoamento superficial da água para cada método de conservação, em condição de solo saturado.

Os cálculos hidráulicos do escoamento precisam ser realizados através dos modelos hidráulicos descritos no item 4.4.

Passo 4

Salvar o arquivo. Como já previamente mencionado, as análises são complementares e não substitutas. Logo, o tomador de decisão não deveria se restringir a apenas um tipo de visualização devido a falta de familiaridade com os programas. Ele deve sim, ter em mente que o maior número de informações favorece um melhor planejamento.

O resultado é uma figura do tipo da Figura 5.6, onde é possível observar: a) as áreas de acúmulo de água; b) o sentido do escoamento superficial; c) a intensidade do escoamento.

Figura 5.6 – Visualização do escoamento dinâmico no *software* NetLogo®.

5.2.3 Fase 3: Geração das alternativas de conservação do solo e dimensionamento hidráulico correspondente

O fluxograma de decisão encontra-se agora na fase da escolha da prática de conservação do solo a ser aplicada na área de plantio, bem como do dimensionamento hidráulico correspondente.

Passo 1 – Método de conservação do solo

Na prática existem alguns métodos de conservação do solo e água, já descritos em capítulos anteriores, que são reapresentados na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Métodos de conservação do solo.

Os tipos de escoamentos possíveis podem ser agrupados em dois casos e suas modelagens matemática foram apresentadas nos itens 4.4.1 e 4.4.2.

No primeiro caso, parte-se do princípio que a água esco transversalmente ao terreno até encontrar uma barreira física de contenção, constituída pelo terraço de infiltração, onde a água permanece represada até ocorrer a infiltração ou a evaporação do volume acumulado.

O segundo caso apresenta três possibilidades: a) a água esco transversalmente ao terreno até encontrar uma barreira física de contenção, constituída por um terraço de drenagem ao longo do qual é conduzida para canais escoadouros (naturais ou artificiais); b) a água é conduzida através de microterraços de drenagem que resultam do terraceamento das linhas de plantio e compactação dos sulcos nas entrelinhas, método que constitui a proposta central desta pesquisa; c) a água segue ao longo de sulcos da linha de plantio e/ou sulcos gerados nas entrelinhas de uma forma difusa (não há uma definição precisa de canais de escoamento alinhados com as linhas de plantio) até encontrar um canal escoadouro (natural ou artificial) (Escoamento Superficial Difuso – ESD).

No método do microterraço de drenagem, o cálculo da vazão e velocidade de escoamento da água em canais é baseado na equação de Manning (eq. 19), pois são considerados escoamentos superficiais em canais abertos.

No enfoque deste projeto de pesquisa, a questão inicial com a qual se confronta o projetista é se ele irá, ou não investigar a alternativa do Microterraceamento de Drenagem.

- A conservação do solo será realizada via Microterraços de Drenagem?

Caso o tomador de decisão opte por não utilizar a técnica do microterraceamento, ele segue na árvore por duas alternativas: a) Terraceamento Convencional; b) Escoamento Superficial Difuso.

A técnica conservacionista denominada Escoamento Superficial Difuso foi apresentada por Sparovek e Maule (2015) e constitui uma ferramenta alternativa atraente para o processo de conservação do solo. Apesar de muitos experimentos práticos nesta direção, a teoria encontra-se em fase de desenvolvimento e não foram encontrados na literatura modelos matemáticos que representem este fenômeno quantitativamente. Assim, não foram apresentados até o momento métodos para quantificar ou prevenir os possíveis danos do processo erosivo.

Para o terraceamento tradicional, o tomador de decisão decidirá entre três alternativas: a) a primeira alternativa, a mais utilizada, é o projeto de terraços de infiltração, que são terraços construídos ao longo de uma curva de nível, com altura constante, de forma que o acúmulo de água se distribui uniformemente ao longo da base do terraço; b) a segunda alternativa é o projeto de terraços de drenagem, a qual não é utilizada na prática pelo setor sucroenergético; c) a terceira, denominada “terraceamento paralelo” constitui-se do projeto de um terraço com crista em nível, como um terraço de infiltração convencional, mas com sua base em desnível, concentrando-se o acúmulo da água no entorno do talvegue da área entre dois terraços sucessivos.

No caso do tomador de decisão escolher o Microterraceamento de Drenagem como prática mecânica conservacionista, tem-se uma opção onde é possível elaborar um modelo matemático baseado em teoria hidráulica de canal aberto conhecida e amplamente divulgada na literatura, onde o excesso de água não infiltrado será conduzido dentro das entrelinhas de plantio até um canal escoadouro.

Passo 2 – Dimensionamento das estruturas mecânicas de conservação do solo

Neste passo, o tomador de decisão deverá realizar os dimensionamentos hidráulicos pertinentes ao método conservacionista escolhido.

Desta forma, na sequência, são apresentados os métodos de dimensionamento hidráulico para cada alternativa de conservação do solo e da água.

Método do terraço de infiltração tradicional (base em nível)

A Figura 5.8 ilustra o fluxograma desta etapa.

A alocação das estruturas mecânicas de conservação do solo (terraços) será efetuada no *software* AutoCAD Civil 3D®.

Figura 5.8 – Método do terraço de infiltração tradicional (base em nível).

Figura 5.8 – Continuação...

Figura 5.8 – Continuação...

Sendo assim, inicialmente, o primeiro passo é inserir o MDT da área de projeto no programa, bem como seu respectivo arquivo vetorial das curvas de nível.

Na sequência, inserir o(s) arquivo(s) vetorial(is) com as estruturas permanentes. Aqui, estruturas permanentes são consideradas as estradas, os carregadores e os canais de vinhaça.

Neste ponto, cabe uma ressalva. Os arquivos das estruturas permanentes poderiam ser inseridos no MDT da área de projeto, originando um único arquivo.

O primeiro nó decisório questiona a localização e a interferência que as estruturas permanentes exercem sobre o projeto.

- As estruturas permanentes são limitantes ao projeto?

Em caso de resposta negativa, o passo seguinte é determinar a distância e o número de terraços da área.

Se for constatado que as estruturas permanentes causam interferências, a pergunta que segue é:

- Existe a possibilidade de realocar as estruturas permanentes?

Se existir, as mesmas serão realocadas no MDT e posteriormente, realocadas no campo. Esta operação possibilita a sequência do projeto, com a determinação da distância e o número de terraços da área.

A determinação da distância entre terraços pode ser obtida pela equação (36) desenvolvida por Lombardi Neto et al. (1994), já apresentada no item 4.6.5. O espaçamento horizontal pode ser determinado através da equação (37).

O número de terraços é determinado dividindo-se o comprimento total da área de projeto, no sentido de maior declividade média, pelo espaçamento entre os terraços.

A próxima etapa consiste na setorização da área de projeto. Uma vez que as distâncias entre terraços foram determinadas, bem como o respectivo número e localização dos terraços, as áreas entre-terraços são definidas como setores de plantio. Os setores de plantio têm como objetivo facilitar o planejamento e maximizar as operações mecanizadas de plantio.

O fluxograma agora, exige o cálculo dos parâmetros hidráulicos para posterior determinação da seção do terraço.

O primeiro parâmetro a ser calculado é a vazão máxima de escoamento para cada setor de plantio. Este, pode ser obtido segundo o Método Racional (RAMSER, 1927) apresentado no item 4.4.1 e representado pela equação (12).

O cálculo da intensidade de precipitação é realizado segundo Hudson (1973), eq. (15).

O próximo parâmetro é a velocidade média do escoamento no setor de plantio. A velocidade média para solos semidescobertos, pode ser determinada a partir de Smedema e Rycroft (1983) (eq. 63).

$$V = 0,3073 * (D_t^{0,4985}) \quad (63)$$

onde

V = velocidade média do escoamento, $m\ s^{-1}$;

D_t = declividade do terreno, %.

Os adimensionais necessários são o número de Reynolds e o número de Froude, ambos já discutidos neste trabalho em seções anteriores, equações (21) e (23), respectivamente, porém estes adimensionais não são utilizados na prática do dimensionamento de terraços de infiltração, como já previamente discutido.

Neste ponto, determina-se o formato e a seção do terraço de infiltração. Estes temas já foram apresentados e discutidos no capítulo 4.6.6.

Para o cálculo do acúmulo de água para uma determinada condição hidrológica, bem como o espaçamento entre terraços, tecnicamente recomendado segundo a teoria apresentada para este método de conservação, sugere-se a utilização do programa Terraço for Windows 1.0, um programa de livre acesso desenvolvido por Pruski et al. (1996), disponível em (www.ufv.br/ctq/terraço/Menu2.html).

A partir deste ponto, retorna-se ao *software* AutoCAD Civil 3D® para a alocação dos terraços no MDT da área de projeto. As linhas de plantio, neste método de conservação, são paralelas aos terraços (com distância entre si igual ao espaçamento de plantio). Entretanto, deve-se atentar para as possíveis convergências das linhas (matação), as quais reduzem os desempenhos operacional e econômico das máquinas.

Realizadas estas operações, o arquivo de projeto de plantio deve ser salvo.

O último nó decisório deste método de conservação aborda os setores de colheita.

- Há a possibilidade de se construírem setores de colheita compostos por mais de um setor de plantio?

Se a resposta for negativa, os cálculos dos desempenhos operacional e econômico das máquinas serão realizados com a mesma geometria da área de projeto de plantio. Do contrário, novos setores de colheita são criados (intuitivamente), com objetivo de maximizar os comprimentos das linhas de colheita.

Realizada esta operação, o arquivo de projeto de colheita deve ser salvo.

Método do terraço de infiltração paralelo (base em desnível).

A Figura 5.9 ilustra o fluxograma desta etapa.

O método do terraço paralelo de infiltração é um método de conservação híbrido entre o método de terraceamento de infiltração e o de drenagem, tendo como objetivo o aumento da

área efetiva de plantio com linhas paralelas entre os terraços. O terraço apresenta altura variável, sendo a sua crista em nível e a base em desnível. Seu dimensionamento e alocação são feitos por métodos intuitivos com base na teoria do terraço de infiltração tradicional e na experiência prática do projetista. Em decorrência do método, a água se acumula a partir dos pontos mais baixos na base do terraço.

Este método tem como objetivo maximizar os rendimentos operacional e econômico das máquinas nas etapas de plantio e colheita através do aumento do comprimento das linhas de plantio e da redução do número de linhas que convergem para um mesmo ponto (matação).

Contudo, por ser um método experimental intuitivo aplicado na prática pela empresa, não existem garantias da conservação do solo, quando estes estiverem sujeitos ao processo erosivo.

As primeiras ideias sobre terraços paralelos podem ser encontradas na afirmação de Buie (1941), a qual diz que quando a topografia é uniforme, é possível construir os terraços paralelos, eliminando ou reduzindo as ruas mortas.

Beasley e Meyer, já apresentavam um método de terraceamento buscando a redução da matação em 1955. Segundo os autores, a declividade de cada terraço pode ser variada para melhorar o espaçamento entre os mesmos. Além disso, durante sua construção, faz-se, também a variação da profundidade do corte do canal do terraço.

Na locação, um sistema de terraços paralelos requer maior planejamento que o convencional e o custo de implantação é maior porque necessita de nivelamento do terreno. Entretanto, facilita os trabalhos e reduz cerca de 70% das áreas mortas e 28% do tempo gasto em cultivo (BEASLEY e MEYER, 1955).

Figura 5.9 – Método do terraços de infiltração paralelo (base em desnível).

Figura 5.9 – Continuação...

Figura 5.9 – Continuação...

Método do terraço de drenagem convencional.

A Figura 5.10 ilustra o fluxograma desta etapa.

O método do terraço de drenagem é semelhante ao método do terraço de infiltração no sentido de se construir estruturas físicas no terreno.

Contudo, os terraços de drenagem (como o próprio nome sugere) drenam o excesso da água da área de projeto. Seu fluxograma é idêntico ao do terraço de infiltração até o ponto de cálculo da velocidade de escoamento ao longo dos terraços.

Conforme já discutido no item 4.4, cabe salientar que na literatura brasileira sobre conservação dos solos não foram encontradas referências de formulações de modelos matemáticos que quantifiquem o escoamento da água ao longo de um terraço de drenagem, ou de um canal escoadouro, no sentido de avaliar o risco de dano por carreamento de material sólido.

Nesse sentido, propõe-se o cálculo da velocidade da água nos terraços de drenagem e nos canais escoadouros, conforme formulação de escoamento em canais abertos, proposta nesta pesquisa a partir da teoria descrita em Porto (2006) no item 4.4.2.

O volume de água a ser processado na seção crítica de um terraço de drenagem pode ser calculado pelo mesmo método apresentado para o terraço de infiltração.

Caso os índices não sejam favoráveis, o tomador de decisão é conduzido ao redimensionamento do número de terraços a fim de evitar danos oriundos do processo erosivo.

Avançando na árvore de decisão, calculam-se os índices de velocidade e vazão além dos adimensionais para os canais escoadouros previamente alocados nos talvegues do terreno.

A definição do local exato destes canais escoadouros será em função do cálculo do desempenho operacional e econômico das máquinas. Esses cálculos são realizados pelo simulador de colheita, previamente apresentado (item 4.10).

Neste ponto, também, sendo os índices não favoráveis, o tomador de decisão é conduzido ao redimensionamento do número de terraços afim de evitar danos decorrentes da erosão.

Figura 5.10 – Método do terraço de drenagem convencional.

Figura 5.10 – Continuação...

Figura 5.10 – Continuação...

Método do Escoamento Superficial Difuso (ESD)

O Escoamento Superficial Difuso (Sparovek e Maule, 2015) tem como fundamento uma abordagem distinta na forma de considerar o escoamento do excesso de água. Neste, a enxurrada é escoada pela rugosidade decorrente das operações de cultivo (preparo do solo, plantio e tratos culturais).

Os referidos autores afirmam que o princípio da técnica está no desenho da linha de plantio, a qual converge no sentido de um canal de drenagem ao longo da vertente. Ou seja, o plantio é em desnível e a água acompanhará estas linhas por sua rugosidade, não da forma transversal morro abaixo. O declive das linhas de plantio deve ser pequeno, suficiente para movimentar a água, até atingir uma via de escoamento, podendo ser natural ou artificial (canal escoadouro).

Embora Sparovek e Maule (2015) apresentem o conceito, definam sua execução e dimensionem os canais escoadouros, os autores não representam matematicamente o escoamento superficial, tando difuso (área total), quanto na linha de plantio, nem dimensionam quaisquer índices relativos ao processo erosivo.

Entretanto, o ESD também se apresenta como uma alternativa de controle mecânico do processo erosivo, importante no desenvolvimento das pesquisas em conservação do solo e água.

5.2.4 Método do Microterraço de Drenagem

O método do microterraço de drenagem é a proposta central desta pesquisa, onde se busca o controle da erosão através de um processo de drenagem superficial da área como um todo, utilizando como canais de drenagem os sulcos formados entre os canteiros das linhas de plantio e as linhas de tráfego das máquinas e equipamentos (microterraços).

Desta forma, a água irá escoar dentro das linhas de tráfego (microterraços), as quais são consideradas, nesta pesquisa, canais abertos compactados (impermeáveis), com formato trapezoidal (Figuras 5.11; 5.12; e 5.13). As linhas de plantio (canteiros) são construídas em declive, de modo a garantir que a água de cada microterraço de drenagem desague em um canal escoadouro vegetado (Figura 5.14), dimensionado, com capacidade de absorver parte da água de todos os microterraços em sua bacia de captação e conduzir o excesso até um desaguadouro natural.

A Figura 5.15 ilustra o fluxograma desta etapa.

Figura 5.11 – Modelo esquemático em 3D do Método do Microterraço de Drenagem em plantio de cana-de-açúcar em espaçamento combinado (0,9 x 1,5 m).

Figura 5.12 – Modelo esquemático em perfil do Microterraço de Drenagem em plantio de cana-de-açúcar em espaçamento combinado.

Figura 5.13 – Vista do Microterraço de Drenagem (entrelinha de plantio ou linha de tráfego) em plantio de cana-de-açúcar.

Figura 5.14 – Vista dos canais escoadouros vegetados no Método do Microterraço de Drenagem em plantio de cana-de-açúcar.

Figura 5.15 – Método do microterraço de drenagem.

Figura 5.15 – Continuação...

Figura 5.15 – Continuação...

Figura 5.15 – Continuação...

Através da visualização do escoamento (Fase 2: Visualização do escoamento superficial no MDT) foram identificados os pontos de acúmulo de água na área de projeto, logo, o primeiro nó decisório, na sequência, diz respeito à primeira operação mecanizada a ser realizada no campo.

Inicialmente, inserir o(s) arquivo(s) vetorial(is) com as curvas de nível, estruturas permanentes e cristas e talwegues.

- Há necessidade de nivelamento do terreno?

Se sim, o tomador de decisão deverá realizar como primeira atividade, o nivelamento nos pontos críticos passíveis de alagamento, consequentemente, pontos que apresentam maior risco de dano.

A operação de nivelamento do terreno é fundamental no método do microterraço de drenagem, uma vez que o excesso de água que não infiltrou no terreno deve ser escoado dentro dos mesmos, com velocidade controlada, a partir de uma declividade média das linhas de plantio.

Caso não seja constatada a necessidade de se realizar a operação de nivelamento no campo, prossegue-se no fluxograma.

Na sequência, analisar o(s) arquivo(s) vetorial(is) com as estruturas permanentes.

O próximo nó decisório questiona a localização e a interferência que as estruturas físicas (canais de vinhaça, estradas, carregadores, etc.) exercem sobre o projeto.

- As estruturas permanentes são limitantes ao projeto?

Em caso de resposta negativa, alocar os canais escoadouros nos talwegues do terreno.

Em caso de resposta positiva, segue novo questionamento.

- Existe a possibilidade de realocar as estruturas permanentes?

Se existir, as mesmas serão realocadas no MDT e posteriormente, realocadas no campo. Em seguida, o tomador de decisão deve alocar os canais escoadouros nos talwegues do terreno.

Se não existir a possibilidade de realocar as estruturas permanentes, o tomador de decisão deve projetar a área tomando os cuidados necessários com os parâmetros conservacionistas e, se possível, maximizando o rendimento das operações mecanizadas.

Em seguida, aloca-se os canais escoadouros nos talwegues do terreno.

- A distância entre os canais escoadouros ultrapassa 600 metros?

Esta informação é relevante, uma vez que algumas plantadoras (em função do seu reservatório de mudas, adubos e defensivos) não conseguem plantar comprimentos lineares maiores que 600 metros sem reabastecimento.

Para distâncias menores que 600 metros, alocam-se diretamente os carregadores transversais e longitudinais.

Para distâncias maiores que 600 metros, temos outro nó de decisão.

- Reprojetar a área devido às limitações operacionais das máquinas de plantio?

Se o tomador de decisão opta por reprojetar a área, ele admite que suas máquinas de plantio não executarão a operação completa, sendo direcionado novamente a etapa de alocação dos canais escoadouros nos talwegues.

Caso ele disponha de equipamentos aptos ou aceite o risco de uma operação com um comprimento de linhas de plantio maior que 600 metros, aloca-se os carregadores transversais e longitudinais.

Uma vez que os canais escoadouros delimitam a área de plantio, eles constituem os limites transversais dos setores de plantio.

A partir da definição básica dos limites transversais e longitudinais dos setores de plantio, se estabelece(m) a(s) forma(s) geométrica(s) da(s) linha(s) base de sulcação, à(s) qual(is) corresponde(m) declividade(s) média(s) das linhas de plantio de um conjunto de setores adjacentes.

Para determinar a geometria da linha de base de sulcação nesta pesquisa será utilizado um método intuitivo, onde as linhas serão geradas no *software* AutoCAD Civil 3D® manualmente, visando o maior comprimento linear, atrelado a uma inclinação mínima que favoreça o escoamento da água dentro das entrelinhas de plantio. Definidas as linhas base dos setores, alocam-se as demais linhas de plantio na área de projeto e assume-se, implicitamente que a declividade da linha base é representativa da declividade média de todos os canais de um setor.

Dimensionamento dos Microterraços de um Setor de Plantio

A próxima etapa consiste em dimensionar os parâmetros hidráulicos para os microterraços de drenagem na condição de chuva máxima esperada para o local de plantio.

No caso dos microterraços, adota-se uma seção trapezoidal para os canais, pois é esta, por hipótese, a geometria dos microterraços (Figuras 5.11, 5.12 e 5.13).

Inicialmente são calculados os parâmetros hidráulicos para uma situação de canal cheio. O modelo matemático utilizado é a equação de Manning (eq. 64).

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} D^{1/2} \quad (64)$$

onde:

V = Velocidade média do escoamento, m s^{-1} ;

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $\text{s m}^{-1/3}$, Tabela 4.5, página 42;

R_h = raio hidráulico, em m;

D = declividade do canal, m m^{-1} .

com

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad (65)$$

onde:

A_m = área molhada, m^2 ;

P_m = perímetro molhado, m.

Cálculo da capacidade máxima de escoamento do canal.

$$Q = \frac{S (R_h^{2/3}) (D^{1/2})}{n} \quad (66)$$

onde:

Q = vazão do escoamento permanente uniforme, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

S = área molhada, m^2 .

R_h = raio hidráulico, m;

D = declividade do canal, m m^{-1} ;

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $\text{s m}^{-1/3}$, Tabela 4.5, página 42.

Cálculo do número de Reynolds.

$$Rey = \frac{VR_h}{\nu} \quad (67)$$

onde:

V = velocidade média do escoamento, m s^{-1} ;

R_h = raio hidráulico da seção, m;

ν = viscosidade cinemática da água, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Cálculo do número de Froude.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot H_m}} \quad (68)$$

onde:

V = velocidade média do escoamento, $m \cdot s^{-1}$;

H_m = altura hidráulica da seção, m;

g = aceleração da gravidade, $m \cdot s^{-2}$;

Sendo:

$$H_m = \frac{A}{B} \quad (69)$$

onde:

A = área molhada, m^2 ;

B = largura da seção na superfície livre, m.

Após o cálculo do número de Froude, segue um nó decisório relativo ao valor encontrado:

- O número de Froude calculado é maior que um?

Este adimensional, embora já tenha sido apresentado no item 4.4, é definido como a raiz quadrada da relação entre a força de inércia e a força da gravidade. É importante para a classificação dos escoamentos, sendo os mesmos divididos em três grupos: escoamento subcrítico ou fluvial, $Fr < 1$; escoamento crítico, $Fr = 1$; e escoamento supercrítico ou torrencial, $Fr > 1$.

Para situações onde $Fr > 1$, ocorre risco de erosão em função da elevada turbulência existente no escoamento. Assim, temos duas situações procedentes do cálculo do número de Froude:

O número de Froude calculado é maior que um. Nesta situação, o tomador de decisão deve diminuir a declividade da linha base, ou seja, reprojeter a área de plantio, percorrendo novamente os passos já apresentados.

Caso o número de Froude calculado seja menor que um, segue-se no fluxograma.

No passo seguinte são calculados os parâmetros hidráulicos reais do canal, em função das condições de chuva máxima do local.

O nó decisório, na sequência, diz respeito a origem da fonte dos dados de precipitação, dados esses essenciais para a representação realista do fenômeno que acontecerá no campo. Desta forma, temos:

- Os dados de precipitação são oriundo do histograma do local?

Se a resposta for positiva, utilizar os dados reais do local.

Se a resposta for negativa, o cálculo da intensidade de precipitação pode ser realizado segundo Hudson (1973):

$$I = \frac{a}{t+b} \quad (70)$$

onde:

I = média de intensidade de chuva, mm h^{-1} ;

t = duração da chuva, min;

a e b = constantes ($a = 3.000$ e $b = 40$).

O tomador de decisão avança no fluxograma com o cálculo da vazão real estimada dentro do microterreiro de drenagem.

Dando continuidade ao fluxograma, procede-se ao cálculo da vazão do canteiro de plantio. Este cálculo requer a estimativa do coeficiente de escoamento superficial da água sobre o canteiro, o qual, embora seja tabelado, exige informações prévias do local de plantio, como a declividade e a textura do solo local (Método Racional, eq. 59).

Em seguida calcula-se a vazão real dentro do canal, oriunda da vazão do microterreiro somada à vazão do canteiro de plantio localizado a montante do mesmo. De modo a garantir que não haverá infiltração no canal do microterreiro de drenagem, o coeficiente de escoamento superficial admitido será igual a um (1), conforme a Tabela 5.2.

Vazão do microterreiro:

$$Q = \frac{C I A}{360} \quad (71)$$

onde:

Q = vazão máxima de escoamento superficial, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional, Tabela 5.2;

I = intensidade máxima de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração da bacia, mm h^{-1} ;

A = área da bacia de drenagem, ha.

Tabela 5.2 – Valores de C recomendados pelo *Soil Conservation Service* – USDA.

Cobertura do solo	Declividade (%)	Textura do solo		
		Arenosa	Franca	Argilosa
Florestas	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,25	0,35	0,50
	10 – 30	0,30	0,50	0,60
Pastagens	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,15	0,35	0,55
	10 – 30	0,20	0,40	0,60
Terras cultivadas	0 – 5	0,30	0,50	0,60
	5 – 10	0,40	0,60	0,70
	10 – 30	0,50	0,70	0,80

Fonte: *Soil Conservation Service* (SCS) (reapresentação).

A próxima etapa refere-se ao cálculo da velocidade real dentro do canal.

Tem-se:

$$Q = A V \quad (72)$$

onde:

Q = vazão do escoamento, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

A = área molhada, m^2 ;

V = velocidade média do escoamento, m s^{-1} .

O primeiro passo é determinar a altura da água (y_0) dentro do microterraço para a vazão real. Independente da forma geométrica adotada para o canal, o dimensionamento da área exige o conhecimento deste elemento.

A Figura 5.16 ilustra os elementos geométricos da seção trapezoidal.

Figura 5.16 – Elementos geométricos da seção trapezoidal.

Segundo Porto (2006), a altura d'água para canais trapezoidais pode ser calculada usando a eq. (73).

$$\frac{nQ}{b^{8/3}\sqrt{D}} = \left(\frac{y_0}{b}\right)^{5/3} * \frac{[1 + \left(\frac{y_0}{b}\right)Z]^{5/3}}{(1 + 2\left(\frac{y_0}{b}\right)\sqrt{1+Z^2})^{2/3}} \quad (73)$$

onde:

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $s \, m^{-1/3}$, Tabela 4.5, página 40;

Q = vazão de escoamento no canal, $m^3 \, s^{-1}$;

b = largura da seção menor do trapézio, m;

B = largura da seção maior do trapézio (superfície livre), m;

D = declividade do canal, $m \, m^{-1}$;

y_0 = altura da água, m;

Z = inclinação do talude;

Admitindo-se:

$$K_2 = \frac{nQ}{b^{8/3}\sqrt{D}} \quad (74)$$

onde:

K_2 = coeficiente de forma;

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $s \, m^{-1/3}$, Tabela 4.5, página 42;

Q = vazão de escoamento no canal, $m^3 \, s^{-1}$;

b = largura da seção menor do trapézio, m;

D = declividade do canal, m m^{-1} .

O coeficiente K_2 é apresentado por Porto (2006), para diversos valores de y_0/b e para cada inclinação de talude (Tabela 8.3, página 270 da referência citada).

Uma vez determinada a altura da água (y_0), determina-se o comprimento da seção livre real e, na sequência a área molhada real estimada.

Uma vez estimada a área molhada real determina-se a velocidade real dentro do microterraço de drenagem.

O próximo passo é calcular o Número de Froude real. Este cálculo é realizado através da eq. 63.

O tomador de decisão depara-se com outro nó recursivo.

- O número de Froude real é maior que um?

Se a resposta for positiva, o tomador de decisão deve reprojetar a área.

Se a resposta for negativa, o tomador prossegue no fluxograma tendo como próximo passo a etapa de salvar o arquivo, o qual apresenta índices hidráulicos satisfatórios em termos de risco dos efeitos negativos do processo erosivo.

O tomador de decisão deve percorrer essas etapas de cálculo dos parâmetros hidráulicos representativos da condição de intensidade máxima de chuva esperada para todos setores da área de plantio.

Dimensionamento dos Canais Escoadouros

Uma vez calculado o escoamento para uma condição média representativa dos canais dos microterraços de um setor de plantio, é necessário dimensionar a seção crítica do(s) canal(is) escoadouro(s) associados ao escoamento superficial do setor. Ou seja, um canal escoadouro terá que ser dimensionado para processar o somatório do escoamento dos canais dos microterraços que nele desagüam.

Para dimensionar o canal escoadouro, o tomador de decisão deve percorrer o fluxograma relativo a este procedimento ilustrado na Figura 5.17.

Figura 5.17 – Método do microterraço de drenagem: dimensionamento dos canais escoadouros.

Figura 5.17 – Continuação...

O dimensionamento do canal escoadouro é mais trabalhoso porque, ao contrário do caso dos canais dos microterrapços, que têm uma estimativa da área da seção trapezoidal bem definida em função da geometria dos canteiros, a forma geométrica e as dimensões da seção são variáveis do problema de dimensionamento.

O método adotado é o de calcular uma dimensão inicial a partir de uma velocidade máxima do escoamento, determinada em função do tipo de cobertura e declividade do canal, a partir de modelos empíricos considerados representativos do fenômeno pela comunidade técnica (BEASLEY, 1972), apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Velocidade máxima permitida em canais abertos (m s⁻¹).

		Solos mais erodíveis										
Cobertura do canal	Declividade (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nenhuma - Solo cultivado		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0	0	0	0	0	0
Nenhuma - Não cultivado		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0
Gramínea anual - regular		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0	0	0	0	0
Gramínea anual - bom		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0	0	0	0	0	0
Gramínea dens. média – regular		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0
Gramínea dens. média – bom		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0,9
Gramínea dens. média – ótimo		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,2
Gramínea densa – Stand ótimo		1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,2

		Solos menos erodíveis										
Cobertura do canal	Declividade (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nenhuma - Solo cultivado		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0
Nenhuma - Não cultivado		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0	0	0	0	0
Gramínea anual - regular		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0	0	0	0	0	0
Gramínea anual - bom		1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0	0	0	0	0	0
Gramínea dens. média – regular		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,75
Gramínea dens. média – bom		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,05
Gramínea dens. média – ótimo		1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,35
Gramínea densa – Stand ótimo		2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5

Fonte: Beasley (1972), adaptado.

De posse do valor dessa velocidade máxima e do valor de vazão máxima esperada no canal, determina-se um primeiro valor para a área do canal escoadouro pela eq. (75).

$$A = \frac{Q}{V} \quad (75)$$

onde:

Q = vazão resultante do somatório de todos os microterraços do setor mais contribuição de áreas externas ao setor que desagüam em determinado canal escoadouro, m³ s⁻¹;

V = valor máximo da velocidade do escoamento, m s⁻¹;

A = área do canal cheio d'água, m².

No caso desta pesquisa, parte-se da hipótese de que o canal a ser construído deve apresentar uma seção transversal próxima da triangular (triângulo isóceles) com rampa máxima de 15% dos catetos (Figura 5.18), pois essa inclinação permite que as máquinas e equipamentos cruzem os canais, viabilizando o tráfego na área.

Figura 5.18 – Elementos geométricos da seção triangular.

Também neste caso a velocidade real dentro do canal escoadouro está relacionada com a altura real da água, que não corresponde, via de regra, à condição de canal cheio.

O passo seguinte é a estimativa da altura real da água.

Para a seção triangular apresentada na Figura 5.18, a altura real da água pode ser estimada segundo a formulação apresentada em Porto (2006), eq. (76).

$$y_0 = \frac{M}{K} \quad (76)$$

onde:

$$M = \left(\frac{nQ}{\sqrt{D}} \right)^{3/8} \quad (77)$$

onde:

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $s \, m^{-1/3}$, Tabela 4.5, página 42;

Q = vazão de escoamento no canal, $m^3 \, s^{-1}$;

D = declividade do canal, $m \, m^{-1}$.

$$K = \left[\frac{(m+Z)^{5/3}}{\left((m+2\sqrt{1+Z^2})^{2/3} \right)} \right]^{3/8} \quad (78)$$

onde:

$$m = \frac{b}{y_0};$$

Z = inclinação do talude ou $\cotg \alpha$.

O coeficiente de forma K é apresentado por Porto (2006) para diversos valores de m e de Z (Tabela 8.2, página 268 da referência citada).

Uma vez determinada a altura d'água, determina-se a área real da seção do escoamento na seção crítica do canal através da eq. (79).

$$A_T = \frac{B y_0}{2} \quad (79)$$

onde:

A_T = área do canal escoadouro no formato de triângulo isósceles, m^2 ;

B = base do canal escoadouro no formato de triângulo isósceles, m;

y_0 = altura real da água no canal escoadouro no formato de triângulo isósceles, m.

Contudo, a determinação de B (base do canal escoadouro no formato de triângulo isósceles) é realizada pela relação trigonométrica apresentada na eq. (80).

$$\tan \alpha = \frac{Co}{Ca} \quad (80)$$

onde:

$\tan \alpha$ = tangente do ângulo α , que neste caso é igual a 9° (15% de declividade);

Co = cateto oposto, que neste caso representa y_0 , m;

Ca = cateto adjacente, que neste caso representa $\frac{B}{2}$, m.

Com os valores da vazão real e da área real, calcula-se agora a velocidade real dentro do canal escoadouro através da eq. (81).

$$V = \frac{Q}{A} \quad (81)$$

onde:

Q = vazão real resultante do somatório de todos os microterraços do setor mais contribuição de áreas externas que desaguam em determinado canal escoadouro, $m^3 s^{-1}$;

V = valor real da velocidade do escoamento no canal escoadouro, $m s^{-1}$;

A = área real do canal escoadouro, m^2 .

Uma vez calculada a velocidade real do escoamento, determinam-se os adimensionais (Reynolds e Froude). Os modelos matemáticos para determinação destes parâmetros já foram previamente apresentados nas equações 67 e 68.

Neste ponto, o tomador de decisão se depara com outro nó decisório:

- Os parâmetros calculados estão dentro dos limites permitidos?

Estes parâmetros são, principalmente, a velocidade da água no canal escoadouro ($V \leq V_{\text{máx}}$ permitida) e o número de Froude ($F < 1$).

Em caso de resposta positiva para ambos os parâmetros, o tomador de decisão deve salvar a solução encontrada para o canal escoadouro.

Em caso de resposta negativa, para um ou os dois parâmetros, o tomador de decisão se depara com outro nó decisório:

- Existe a possibilidade de alterar os parâmetros iniciais do canal escoadouro?

Se existir esta possibilidade, o tomador de decisão deve alterar alguns parâmetros, como a declividade e o tipo de cobertura vegetal. Alterados estes dados, o tomador deve refazer os cálculos.

Se não existir a possibilidade da mudança dos parâmetros, uma alternativa é o uso de dissipadores de energia. Além dos dissipadores comuns, como pedra e madeira, outro material que pode ser utilizado para a redução da velocidade e conseqüentemente, da erosão são os geotextêis. Estes tem a função de drenar, filtrar, proteger e reforçar o solo local.

Desta forma, o tomador de decisão calcula a velocidade final no canal escoadouro e os adimensionais, após utilizar os dissipadores. Assim, um novo nó decisório surge.

- Os dissipadores de energia reduziram a velocidade e o Froude?

Uma vez resolvido, o tomador de decisão deve salvar a solução de dimensionamento do canal escoadouro. Deve-se repetir estes passos para todos os canais escoadouros distribuídos no setores de plantio.

Caso os resultados ainda superarem os limites hidráulicos para carreamento de materiais (mesmo depois das alterações nos parâmetros iniciais e da inclusão dos dissipadores), o tomador de decisão é conduzido a reprojeter a área utilizando outro método de conservação do solo.

Através modelagem apresentada, além de ser possível calcular as dimensões geométricas e a velocidade de escoamento, existe a possibilidade de calcular os parâmetros indicativos do processo erosivo (Reynolds e Froude).

Particularmente no dimensionamento de canais escoadouros, estes são considerados a priori canais abertos de seção desconhecida e, os valores de velocidade utilizados são os referentes a tabela americana (Tabela 5.3), que podem não representar a realidade para nossa

situação de solos e clima tropical. Entretanto, na sequência do método proposto, são calculados os valores da velocidade de escoamento real, operação esta que não é realizada nos modelos de dimensionamento de canais escoadouros analisados na literatura nacional, até o momento.

Assim, esta pesquisa apresenta um caráter inovador ao aplicar a modelagem de canais abertos de seções conhecidas e desconhecidas, juntamente com o cálculo dos adimensionais (Reynolds e Froude) que possibilitam, previamente, a quantificação dos riscos de danos do processo erosivo.

O método dos Microterraços de Drenagem, proposto nesta tese, utiliza a modelagem matemática do escoamento da água em canais abertos, conforme exposto, quantifica volumes, vazões, velocidades e parâmetros que representam o movimento de partículas (números de Reynolds e Froude) fornecendo assim, um referencial que permite avaliar o grau de degradação do solo pela erosão.

5.2.5 Fase 4: Implantação do projeto no campo

Nesta fase o tomador de decisão implantará e verificará a operação de plantio. Para isso, terá auxílio, também, de uma árvore de decisão. A Figura 5.19, representa o fluxograma da implantação do projeto no campo, descrito na sequência.

Inicialmente deve-se executar o projeto teórico de sulcação e conservação do solo, independente da escolha do método de conservação. Em seguida, constroem-se as benfeitorias: canais de vinhaça e estradas.

A construção das linhas de plantio é etapa subsequente. Contudo, para o método do microterraço de drenagem operar de maneira satisfatória, o terreno deve estar nivelado e sem imperfeições. Assim, surge o primeiro nó decisório.

- Plantio com microterraços de drenagem?

Se o tomador de decisão optar por não utilizar o método do Microterraço, este deve seguir um fluxograma de plantio e conservação do solo tradicional, do contrário, segue-se novo nó decisório.

- Há necessidade de se realizar a terraplenagem?

Caso não seja constatada a necessidade da terraplenagem, executa-se o plantio.

Do contrário, realiza-se a terraplenagem e para aferição desta operação, responde-se novo nó de decisão.

- A operação de terraplenagem foi efetiva?

Se a operação não atender ao objetivo de nivelamento, a mesma deve ser repetida. Em alguns casos, o nivelamento do terreno pode ser localizado.

Se a operação atender ao objetivo de nivelamento, executa-se o plantio.

Na sequência, constroem-se os carregadores, os pontos fixos de transbordo, os canais escoadouros e se existirem, as passagens da água (dutos enterrados debaixo de estradas ou carregadores que conduzirão a água até os canais escoadouros ou as bacias naturais).

Uma vez que os canais escoadouros foram construídos é fundamental que se realize a cobertura dos mesmos. Esta cobertura deve ser realizada com o material escolhido durante o dimensionamento (Tabela 5.3). Em alguns casos, além da cobertura vegetal devem ser instalados dissipadores de energia.

Realizadas todas estas etapas, o tomador decisão encontra-se, finalmente, no final do projeto.

Figura 5.19 – Implantação do projeto no campo.

5.3 Terceira etapa – Avaliação dos custos

Como já mencionado no início do item 5, o objetivo principal desta tese é a otimização das operações mecanizadas de plantio e colheita na cultura da cana-de-açúcar, conservando o solo e a água, reduzindo o custo total. Para isso, o modelo admitido é representado na eq. (82).

$$\text{MinCT} = \sum \text{CP} + \sum \text{CC} \quad (82)$$

onde:

MinCT = Minimização dos custos totais

$\sum \text{CP}$ = somatório dos custos de plantio

$\sum \text{CC}$ = somatório dos custos de colheita

Sendo que a função MinCT está sujeita a:

1. Conservação do solo;
2. Infraestrutura existente;
3. Áreas limitantes; e
4. Condições edafoclimáticas.

Desmembrando a função de minimização dos custos de plantio

$$\sum \text{CP} = \sum \text{CPfix} + \sum \text{CPvar} \quad (83)$$

$\sum \text{CP}$ = somatório dos custos fixos + somatório dos custos variáveis do plantio

$\sum \text{CPfix}$ = é o custo da planialtimetria detalhada e do georeferenciamento da área; o custo do projeto da área de produção; os custos das análises físico-químicas do solo; os custos das operações de pré-plantio (correção química do solo: calagem, gessagem e fosfatagem corretiva; preparo do solo: limpeza da área, aração, gradagem, nivelamento do terreno, terraceamento, construção de estradas, construção de pontos fixos de transbordo); o custo da operação de plantio (adubação, mudas, defensivos, máquinas); o custo fixo dos operários; o custo fixo de manutenção (instalações fixas, mecânicos permanentes e veículos oficina); e o custo fixo dos gestores (porcentagem salarial do gerente de plantio, supervisores, encarregados, líderes e operários).

$\sum \text{CPvar}$ = é o custo da máquina que varia em função das horas de funcionamento (plantio, nivelamento, terraceamento, construção de estradas, manobras, deslocamentos); o

custo das mudas; o custo de defensivos; os custos de combustível, lubrificantes, peças, desgaste mecânico, desgaste estrutural e serviços de manutenção terceirizada.

Sendo que a função $\sum CP$ está sujeita a:

Obrigatório o plantio de cana-de-açúcar;

Restrições das áreas vizinhas – perímetro urbano;

Aptidão pedoclimática;

Disponibilidade de água;

Aptidão da fonte de água – águas residuárias;

Autorização do uso da água;

Tipo de tecnologia da plantadora;

Capacidade volumétrica da plantadora;

Velocidade média de avanço da plantadora;

Comprimento médio da linha de plantio;

Número de manobras da plantadora;

Tempo médio de manobra;

Tempo efetivo de plantio;

Levantamento planialtimétrico detalhado;

Planejamento e Projeto da área de plantio.

O custo do plantio sofrerá influências pelas operações de nivelamento do terreno; construção de terraços; e do maior ou menor comprimento da linha de plantio (custos operacionais das máquinas e operários). Análises de sensibilidade para o custo total poderão ser realizadas para as diversas alternativas de formatos geométricos.

Desmembrando a função de minimização dos custos de colheita

$$\sum CC = \sum Ccol + \sum Ctrb \quad (84)$$

$$\sum CC = \text{somatório dos custos da colhedora} + \text{somatório dos custos do trator/transbordo}$$

$$\sum Ccol = \text{somatório dos custos fixos} + \text{custos variáveis da colhedora:}$$

$\sum Ccolfix$ = é o custo da operação da colhedora; o custo fixo dos operários; o custo fixo de manutenção (instalações fixas, mecânicos permanentes, veículos oficina); o custo fixo dos gestores (porcentagem salarial do gerente de colheita, supervisores, encarregados, líderes, operários).

$\sum C_{colvar}$ = é o custo da máquina que varia em função das horas de funcionamento (colheita, manobra, deslocamento); o custo de combustível, lubrificantes, peças, desgaste mecânico, desgaste estrutural e serviços de manutenção terceirizada.

Sendo que a função $\sum C_{col}$ está sujeita a:

Velocidade média de avanço da colhedora;

Produtividade média da cana na área de colheita;

Comprimento médio da linha de plantio na área de colheita;

Número de manobras da colhedora;

Tempo médio de manobra;

Tempo efetivo de colheita;

Quantidade de cana colhida x metro linear⁻¹ (plantio simples ou alternado).

$\sum C_{trb}$ = somatório dos custos fixos + custos variáveis do trator/transbordo:

$\sum C_{trbfix}$ = é o custo da operação do trator/transbordo; o custo fixo dos operários; o custo fixo de manutenção (instalações fixas, mecânicos permanentes, veículos oficina); e o custo fixo dos gestores (porcentagem salarial do gerente de colheita, supervisores, encarregados, líderes, operários).

$\sum C_{trbvar}$ = é o custo do trator/transbordo que varia em função das horas de funcionamento (enchimento, manobra, deslocamento); o custo de combustível (caso seja um caminhão), lubrificantes, peças, desgaste mecânico, desgaste estrutural e serviços de manutenção terceirizada.

Sendo que a função $\sum C_{trb}$ está sujeita a:

Tipo de tecnologia dos veículos de transbordo;

Capacidade volumétrica dos veículos;

Distância média do malhador à colhedora;

Comprimento médio da linha de plantio na área de colheita;

Produtividade média da cana na área de colheita;

Quantidade de cana colhida por metro linear⁻¹ (plantio simples ou alternado);

Velocidade média de avanço dos veículos;

Número de manobras;

Tempo médio de manobra;

Tempo efetivo de transbordo e transporte;
Relação tempo de carregamento x tempo de ciclo do transbordo;
Sistema de despacho dinâmico dos transbordos do tipo fila única.

As avaliações são realizadas através de um modelo de simulação de movimentação das colhedoras e transbordos, desenvolvido por Rogério Ávila Junqueira, previamente apresentado no item 4 (Figura 4.14). Este modelo desenvolvido em planilha eletrônica, leva em consideração as características geométricas da rede formada pelas linhas de plantio e permite estimar o rendimento operacional das máquinas e o custo da colheita associado às diversas alternativas de configuração para uma mesma área.

6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para exemplificar os projetos de plantio e colheita, bem com os parâmetros hidráulicos foi realizado uma aplicação experimental do método proposto.

O ensaio foi conduzido no município de Nova Europa-SP. A área experimental constituiu-se de talhões da fazenda Itaquerê, propriedade da Usina Santa Fé S/A que possui as seguintes coordenadas geográficas: 21°49'13.55" de latitude Sul, 48°35'38.27" de longitude Oeste e 490 metros de altitude, com área total de 91,83 ha, constituída predominantemente por Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo, textura argilosa e declividade média de 6%.

A área experimental pode ser visualizada na Figura 6.1.

Figura 6.1 – Imagem da área experimental.

Com relação à configuração final da área de plantio podemos observar que em função da escolha do método de conservação do solo e do sentido de sulcação adotado, o projeto exibirá um desenho específico. As Figuras 6.2 e 6.3 ilustram os diferentes projetos.

Figura 6.2 – Projeto de conservação convencional com Terraços de Infiltração Tradicional (Base em nível).

Figura 6.3 – Projeto de conservação híbrida com Microterraços de Drenagem e Terraços de Infiltração Paralelo (Base em desnível).

Além de ilustrarem a diferença visual entre os projetos das áreas, as referidas Figuras ilustram os terraços, os pontos de convergência das linhas de plantio (matação) e os canais escoadouros destinados à drenagem do excesso de água. Um comparativo destas estruturas é apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Comparativo numérico das estruturas nos diferentes projetos de plantio.

Projeto de sulcação	Estrutura	Quantidade
Convencional	Terraço	8
	Canal escoadouro	0
	Pontos de matação	12
Híbrida	Terraço	2
	Canal escoadouro	11
	Pontos de matação	0

Na prática foi realizado o plantio do projeto de sulcação híbrida. Para este tipo de projeto utiliza-se mais de um método de conservação do solo, que neste caso específico, foram o Método do Microterraço de Drenagem e o Método do Terraço de Infiltração Paralelo, uma vez que as restrições das estruturas permanentes, como o canal de vinhaça e a estrada municipal impossibilitaram a construção em área total dos microterraços de drenagem.

Por ser uma área de reforma, a sequência de operações incluiu a retirada dos terraços de infiltração tradicionais considerados inoperantes no novo método de conservação do solo (Figura 6.4); o nivelamento do terreno em pontos críticos identificados pela visualização do escoamento superficial no MDT (Figura 6.5); e a construção dos canais escoadouros, após dimensionamento prévio, com passagens subterrâneas conectadas por tubos de drenagem, nos pontos considerados necessários (Figura 6.6).

Figura 6.4 – Eliminação de terraço de infiltração tradicional inoperante.

Figura 6.5 – Nivelamento detalhado do terreno.

Figura 6.6 – Tubos de drenagem conectando os canais escoadouros.

Foram analisadas, também, a área útil total, a área total das vias (somatório da área da estrada principal e área dos carregadores), a área do canal de vinhaça, a área total de terraços e a área total dos canais escoadouros. Estes dados são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Medidas específicas para os diferentes tipos de projetos de plantio.

Parâmetro	Convencional	Híbrido
Área total (ha)	91,83	91,83
Área útil total (ha)	83,04	85,29
Estrada principal (ha)	2,12	2,12
Carregadores totais (ha)	0,74	0,74
Vias totais (ha)	2,86	2,86
Canal de vinhaça (ha)	1,63	1,63
Terraços totais (ha)	4,30	1,15
Canais escoadouros totais (ha)	0,00	0,90

A área útil total representa a área real de plantio (diferença entre a área total e o somatório das vias totais, terraços totais e canais escoadouros totais) e, comparando os dois projetos observa-se que o projeto Híbrido apresenta um aproveitamento de 93% da área total, enquanto que o Convencional atinge apenas 90%.

Ao analisarmos o parâmetro área útil total é possível notar um aumento da área efetiva de plantio em, aproximadamente, 2,3 ha no projeto de sulcação Híbrida, quando comparado ao projeto Tradicional, indicando um aumento na produção de matéria-prima.

Com relação à hidráulica de escoamento, para o projeto de sulcação Híbrida foram alocadas as cristas e os talvegues, dividindo a área em setores de drenagem; traçadas as linhas de plantio com suas respectivas declividades e, conseqüentemente, os microterraços de drenagem; e dimensionados os parâmetros fundamentais. Os parâmetros hidráulicos são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Parâmetros hidráulicos calculados no projeto de sulcação Híbrida.

Setor	Declividade da linha (%)	Velocidade no microterraço (m/s)	Vazão no microterraço (m ³ /s)	Vazão da área (m ³ /s)	Número de Froude	Tipo de escoamento
1	1,9	0,14	0,004	0,64	0,2	Subcrítico
2	1,8	0,21	0,006	1,01	0,3	Subcrítico
3	0,83	0,21	0,006	0,72	0,3	Subcrítico
4	1,83	0,28	0,008	0,98	0,4	Subcrítico
5	2,15	0,38	0,011	1,51	0,6	Subcrítico
6	2,5	0,45	0,013	2,25	0,7	Subcrítico
7	3,0	0,21	0,006	2,31	0,3	Subcrítico
8	1,6	0,14	0,004	0,71	0,2	Subcrítico
9	1,0	0,14	0,004	0,45	0,2	Subcrítico
10	1,0	0,14	0,004	0,54	0,2	Subcrítico
11	1,5	0,14	0,004	0,28	0,2	Subcrítico

Através da análise dos dados, podemos observar que o excesso de água que não penetra no solo escoar superficialmente, sem causar danos ao local, em virtude das baixas velocidades e vazões, permitindo que o escoamento se caracterize como subcrítico.

Os canais escoadouros foram dimensionados através da modelagem apresentada no capítulo 5.2.4. Os valores correspondentes a cada setor são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Parâmetros hidráulicos calculados para os canais escoadouros no projeto de sulcação Híbrida.

Setor	Declividade (%)	Seção (%)	Largura (m)	Altura (m)	Velocidade no canal escoadouro (m/s)	Vazão do canal escoadouro (m³/s)	Número de Froude	Tipo de escoamento
1	7,0	10	2,35	0,24	1,0	0,68	0,88	Subcrítico
2	7,3	10	2,92	0,29	1,12	1,02	0,91	Subcrítico
3	7,3	10	2,47	0,25	1,09	0,73	0,96	Subcrítico
4	5,8	10	2,66	0,27	1,02	0,86	0,83	Subcrítico
5	5,8	10	3,39	0,34	1,13	1,39	0,87	Subcrítico
6	5,0	10	3,89	0,39	1,23	2,28	0,85	Subcrítico
7	6,0	10	4,4	0,44	1,26	2,36	0,85	Subcrítico
8	6,0	10	2,43	0,24	0,96	0,72	0,81	Subcrítico
9	6,0	10	1,95	0,2	0,87	0,46	0,79	Subcrítico
10	5,0	10	1,9	0,19	0,79	0,55	0,69	Subcrítico
11	5,0	10	1,38	0,14	0,72	0,29	0,72	Subcrítico

Assim como nos microterraços, os parâmetros hidráulicos dos canais escoadouros preservam a integridade do solo, cumprindo sua função de método de conservação.

Após a análise dos diferentes projetos de plantio, obtêm-se os respectivos mapas de colheita, representados nas Figuras 6.7 e 6.8. Estes mapas foram construídos com o objetivo de otimizar as operações mecanizadas da colheita, respeitando as limitações técnicas das máquinas e de infraestrutura do local de plantio.

A Tabela 6.5 apresenta os rendimentos de colheita para os projetos distintos.

Tabela 6.5 – Rendimentos de colheita para os diferentes projetos.

Parâmetro	Convencional	Híbrido
TCH(*)	80	80
Manobra total	142	83
Comprimento médio da linha (m)	851	1038
Rendimento da colhedora (t/dia efetivo)	794	861
Produção de cana total (t)	6.643	6.823

*TCH = tonelada de cana por hectare.

Figura 6.7 – Projeto de conservação Convencional – Blocos de colheita.

Figura 6.8 – Projeto de conservação Híbrida – Blocos de colheita.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma parte importante do desenvolvimento da pesquisa é a representação de todo o processo de planejamento e projeto de uma área de plantio de cana-de-açúcar através dos fluxogramas, que se apresentam como ferramentas auxiliaadoras nas tomadas de decisão para um problema complexo de análise combinatorial.

Assim, o fluxograma da etapa de planejamento é apresentado na Figura 5.1, tendo como objetivo principal o plantio de cana-de-açúcar. As diversas fases da etapa de projeto são apresentadas nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.15, 5.17 e 5.19.

O processo de análise de decisão proposto permite uma resolução mais lógica, uma vez que explicita os caminhos alternativos de uma forma clara, através de uma representação gráfica.

O método de conservação proposto, Método do Microterraço de Drenagem, se apresenta como alternativa potencialmente viável. Embora o método exija um maior conhecimento técnico na modelagem matemática dos escoamentos, quando comparado ao método tradicional de conservação, apresenta diversas vantagens em termos de produção e rendimentos operacionais e econômicos, além de uma quantificação dos riscos do ponto de vista da conservação do solo.

No exemplo de aplicação, constatou-se que para todos os dimensionamentos hidráulicos, os parâmetros foram mantidos em índices aceitáveis e abaixo dos críticos. Conforme apresentado nas Tabelas 6.3 e 6.4.

Com relação à produção de cana-de-açúcar, o método alternativo possibilita um maior aproveitamento de área efetiva de plantio, uma vez que as estruturas mecânicas de conservação são alteradas, substituindo os terraços tradicionais de infiltração por microterraços de drenagem e canais escoadouros. No caso apresentado, este aumento foi de 2,7% (2,3 ha), resultando em um aumento de produção de matéria-prima, da ordem de 180 toneladas, o que a preços de açúcar de 2014 corresponde a um ganho estimado de R\$ 22.500,00.

Cabe aqui salientar que, dependendo do local de projeto a ser implementado, o Método do Microterraço de Drenagem, proporcionará um aumento de área efetiva de plantio provavelmente maior que o obtido no exemplo de aplicação, pois a área do experimento é relativamente plana e, a estrada municipal e o canal de vinhaça impuseram restrições importantes na geração de soluções.

Uma vez que os terraços de infiltração são retirados, outro problema é contornado: a convergência de linhas (matação). A matação influencia negativamente o desempenho operacional das máquinas, reduzindo o número de linha de colheita, o comprimento efetivo das linhas de colheita e aumentando o número de manobras. Logo, planejar e projetar a área produtiva em detalhes é uma atividade compensadora. A Tabela 6.6 apresenta um comparativo de rendimentos entre os projetos Convencional e Híbrido.

Tabela 6.6 – Compartivo de rendimentos.

Parâmetro	Convencional	Híbrido	Ganhos (%)
TCH	80	80	
Manobra total	142	83	41,5
Comprimento médio da linha (m)	851	1038	22
Rendimento da colhedora (t/dia efetivo)	794	861	8,4
Produção de cana total (t)	6.643	6.823	2,7
Receita(*)	R\$830.400,00	R\$852.900,00	2,7
Ganho anual		R\$22.500,00	

*2,5 UNICOP/t x R\$50,00/sc açúcar.

Através da análise da Tabela 6.6, para o exemplo de aplicação, obteve-se uma redução de 58,5% no número total de manobras. Esta redução conduziu a um aumento da ordem de 8,4% no rendimento operacional da colhedora. Esse aumento de desempenho conduziu a uma estimativa de ganho da ordem de R\$ 0,63 por tonelada de cana, o que implica em um ganho adicional da ordem de R\$ 4.300,00 por safra na área total.

Neste ponto, torna-se importante a análise dos custos de investimento no plantio, uma vez que estes servirão como guia para a tomada de decisão entre as alternativas de conservação. As Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os respectivos valores de custos para os projetos nos sistemas Convencional e Híbrido de conservação do solo, na área experimental.

Tabela 6.7 – Custos de plantio no sistema Convencional.

Operação	Área (ha)	Custo	Valor
Levantamento planialtimétrico detalhado	83,04	R\$ 10,00	R\$ 830,40
Projeto de sulcação - escritório	83,04	0	R\$ 0,00
Aração / Subsolação	83,04	R\$ 140,00	R\$ 11.625,60
Subsolação - Preparo profundo	83,04	R\$ 400,00	R\$ 33.216,00
Gradagem - média	83,04	R\$ 110,00	R\$ 9.134,40
Terraceamento (R\$/m)	8086	R\$ 13,00	R\$ 105.118,00
Construção dos canais escoadouros			
Gramma + frete de entrega (R\$/m ²)	0	R\$ 4,70	R\$ 0,00
Tubulação_águas pluviais 700mm (unid.)	0	R\$ 170,00	R\$ 0,00
Terraplenagem do canal escoadouro	0	R\$ 840,00	R\$ 0,00
Construção dos canais de vinhaça	1,63	R\$ 360,00	R\$ 586,80
Terraplenagem da área	0	R\$ 840,00	R\$ 0,00
Aplicação de corretivos - calcário e gesso	83,04	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Gradagem - leve	83,04	R\$ 95,00	R\$ 7.888,80
Construção das vias	2,86	R\$ 500,00	R\$ 1.430,00
Corte da muda	83,04	R\$ 1.700,00	R\$ 141.168,00
Transporte da muda	83,04	R\$ 230,00	R\$ 19.099,20
Transporte do adubo	83,04	R\$ 10,00	R\$ 830,40
Plantio mecanizado	83,04	R\$ 1.200,00	R\$ 99.648,00
Aplicação de inseticida	83,04	R\$ 170,00	R\$ 14.116,80
Aplicação de fungicida	83,04	R\$ 60,00	R\$ 4.982,40
Recobrição manual	83,04	R\$ 200,00	R\$ 16.608,00
Aplicação de herbicida - catação	20,76	R\$ 115,00	R\$ 2.387,40
Qualidade do plantio	83,04	R\$ 1,00	R\$ 83,04
Total			R\$ 468.753,24
Total/ha			R\$ 5.644,91

Valores adaptados da Usina Santa Fé/SA, para o ano agrícola 2013/2014.

Tabela 6.8 – Custos de plantio no sistema Híbrido.

Operação	Área (ha)	Custo	Valor
Levantamento planialtimétrico detalhado	85,29	R\$ 10,00	R\$ 852,90
Projeto de sulcação - escritório	85,29	0	R\$ 0,00
Aração / Subsolagem	85,29	R\$ 140,00	R\$ 11.940,60
Subsolagem - Preparo profundo	85,29	R\$ 400,00	R\$ 34.116,00
Gradagem - média	85,29	R\$ 110,00	R\$ 9.381,90
Terraceamento (R\$/m)	2145	R\$ 13,00	R\$ 27.885,00
Construção dos canais escoadouros			
Gramma + frete de entrega (R\$/m ²)	9.000	R\$ 4,70	R\$ 42.300,00
Tubulação_águas pluviais 700mm (unid.)	9	R\$ 170,00	R\$ 1.530,00
Terraplenagem do canal escoadouro	0,90	R\$ 840,00	R\$ 756,00
Construção dos canais de vinhaça	1,63	R\$ 360,00	R\$ 586,80
Terraplenagem da área	56,13	R\$ 840,00	R\$ 47.149,20
Aplicação de corretivos - calcário e gesso	85,29	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Gradagem - leve	85,29	R\$ 95,00	R\$ 8.102,55
Construção das vias	2,86	R\$ 500,00	R\$ 1.430,00
Corte da muda	85,29	R\$ 1.700,00	R\$ 144.993,00
Transporte da muda	85,29	R\$ 230,00	R\$ 19.616,70
Transporte do adubo	85,29	R\$ 10,00	R\$ 852,90
Plantio mecanizado	85,29	R\$ 1.200,00	R\$ 102.348,00
Aplicação de inseticida	85,29	R\$ 170,00	R\$ 14.499,30
Aplicação de fungicida	85,29	R\$ 60,00	R\$ 5.117,40
Recobrição manual	85,29	R\$ 200,00	R\$ 17.058,00
Aplicação de herbicida - catação	21,32	R\$ 115,00	R\$ 2.452,09
Qualidade do plantio	85,29	R\$ 1,00	R\$ 85,29
Total			R\$ 493.053,63
Total/ha			R\$ 5.780,91

Valores adaptados da Usina Santa Fé/SA, para o ano agrícola 2013/2014.

Ao analisarmos os custos de plantio, no sistema Convencional, fica evidente a participação dos custos de terraceamento (neste caso, a construção de oito terraços de infiltração tradicional) nos custos totais. Estes representam, aproximadamente, 23% dos custos totais (R\$ 105.118,00).

No projeto Híbrido, os custos com os métodos mecânicos de conservação estão distribuídos nas operações de terraceamento (terraços de infiltração paralelos), terraplenagem da área efetiva de cultivo, terraplenagem e construção da área dos canais escoadouros, aquisição

dos tubos de drenagem e aquisição de grama (cobertura vegetal selecionada para revestimento do canal escoadouro). Estes fatores representam, aproximadamente, 26% dos custos totais. Dessa forma, podemos concluir que para o exemplo de aplicação, os custos com as estruturas mecânicas de conservação do solo e água são da mesma ordem de grandeza.

Entretanto, quando comparamos os custos de implantação da lavoura com os ganhos obtidos com o sistema Híbrido, este último é a alternativa mais atraente, tanto do ponto de vista econômico, quanto técnico. A Tabela 6.9 apresenta a análise comparativa dos ganhos e dos custos adicionais para o projeto Híbrido.

Tabela 6.9 – Análise comparativa dos custos e ganhos.

Ganhos	Produção	C + T	Total
Anuais	R\$ 22.500,00	R\$ 4.300,00	R\$ 26.800,00
Ciclo (5 anos)	R\$ 112.500,00	R\$ 21.500,00	R\$ 134.000,00
Investimentos	Por hectare	85 ha	
1º ano	R\$ 140,00	R\$ 11.900,00	
Depreciação em 5 anos	R\$ 28,00	R\$ 2.380,00	

O aumento total de custos, para a área de estudo, foi de R\$ 11.900,00, e os ganhos foram de R\$ 26.800,00, ou seja, um aumento de R\$ 140,00 por hectare forneceu um lucro final de R\$ 14.900,00 em um ano. Extendendo para um ciclo da cultura, cinco anos, o lucro total estimado é de R\$ 122.100,00.

Como já mencionado, o exemplo de aplicação foi realizado em uma área experimental real sujeita a diversas situações. Neste caso, a realização de reforma ao invés de implantação do canavial.

Durante a operação de reforma houve a mudança do sistema de conservação do solo. A alternância do sistema de infiltração pelo sistema de drenagem resultou na remoção dos terraços de infiltração paralelos considerados inoperantes e os respectivos custos relacionados a essa operação. Foram retirados seis terraços, dos oito totais, a um custo total de R\$ 13.664,30

Nesta situação, o aumento total de custos, foi de, aproximadamente, R\$ 25.500,00, ou seja, um aumento da ordem de R\$ 300,00 por hectare. Entretanto, ainda assim, o lucro final foi de R\$ 1.300,00 em um ano. Extendendo para um ciclo da cultura, cinco anos, o lucro é de R\$ 108.500,00, podendo ser considerado um valor relevante em qualquer cenário econômico.

8 CONCLUSÕES

8.1 Conclusões genéricas

O método de conservação do solo através dos Microterraços de Drenagem se apresenta como uma alternativa promissora para o setor sucroenergético.

O detalhamento das atividades contidas nas etapas de planejamento e projeto de uma área de plantio de cana-de-açúcar, assim como os aspectos de interação e recursividade dessas atividades, através de fluxogramas que explicitam o caminhamento lógico do processo de decisão, apresentam uma contribuição à gestão do manejo cultural e à compreensão das diversas opções de conservação do solo na busca de maiores rendimentos operacionais das máquinas e equipamentos de colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

O método proposto promove um aumento na área efetiva de plantio, uma vez que a área ocupada com os canais escoadouros é menor que a área ocupada com terraços de infiltração tradicionais para a conservação do solo.

O método promove uma redução dos custos nas operações de corte e transbordo, uma vez que o rendimento operacional das máquinas e equipamentos aumenta.

Os custos de implantação do Método de Microterraços de Drenagem se equiparam aos custos tradicionais de terraceamento em nível, favorecendo sua aplicação.

Apesar de se mostrar economicamente atraente, o método dos microterraços de drenagem exige do projetista conhecimentos nas áreas de sistemas de informações geográficas, desenho assistido por computador, hidráulica, informática, tratos culturais da cana-de-açúcar e conservação do solo e água, o que requer um profissional mais capacitado tecnicamente para elaborar o projeto de áreas de plantio do que o método consagrado de terraços de infiltração.

A implementação de um projeto de microterraços de drenagem em campo exige uma mudança dos conceitos de preparo do solo e plantio no setor sucroenergético, de modo a assegurar níveis de qualidade das obras que garantam a segurança do método conservacionista proposto.

8.2 Conclusões do exemplo de aplicação

O modelo proposto resultou em um ganho da ordem de 2,7% de área efetiva de plantio, o que corresponde a um retorno econômico da mesma ordem.

Para uma área relativamente plana, onde o método de conservação com terraços de infiltração já propõe um desempenho relativamente elevado das colhedoras, ocorreu um ganho da ordem de 8,4% nos rendimentos operacionais da colheita mecanizada, o que se reflete em uma estimativa de redução no custo das operações de corte e transbordo.

Os custos de implantação/ha apurados na construção da área experimental foram da mesma ordem de grandeza do valor esperado no método convencional de terraços de infiltração.

A diferença entre o lucro operacional estimado para um ciclo de produção de cinco anos do método dos microterraços de drenagem para o método tradicional de terraços de infiltração foi da ordem de R\$ ha⁻¹ 1.436,00 (implantação) e R\$ ha⁻¹ 1.276,00 (reforma). Sendo a condição de reforma de uma área com destruição de terraços de infiltração, nivelamento do terreno e implantação de microterraços de drenagem.

9 CONTINUIDADE DA PESQUISA

Para a continuidade da pesquisa, apresentam-se as seguintes propostas:

- Geração automatizada do tração das linhas de plantio através de algoritmos matemáticos;
- Medição, em campo, dos efeitos degradadores da chuva, tanto simulada, quando real para o método do microterraço de drenagem;
- Associação dos modelos de previsão de perdas de solo ao sistema de projeto das áreas;
- Análise da influência dos volumes de água, concentração de sedimentos e nutrientes despejados nos corpos d'água naturais através dos canais escoadouros;
- Desenvolvimento de um *software* na forma de *applet* na internet, com interface amigável aos usuários para executar as diversas operações de cálculos;
- Desenvolvimento de melhorias nas plantadoras, distribuidoras e equipamentos de preparo profundo que auxiliem na construção e na manutenção da forma geométrica do canteiro de plantio após as operações mecanizadas;
- Implementação do método em outras situações de solo, clima e culturas, buscando avaliar seu desempenho em condições distintas das existentes no exemplo de aplicação e o potencial de generalização das expectativas promissoras de sua aplicação; e
- Pesquisas de acompanhamento de áreas experimentais com medições e documentação de resultados positivos e falhas do processo.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMIDES NETO, J.; MOURA, L.R. 1943. Como se deve aplicar as tabelas para terraceamento. **R. Agric.**, Piracicaba, SP, v.18, p.215-217.
- ADAMS, J.E.; KIRKHAM, D.; SCHOLTES, W.H. 1958. Soil erodibility and other physical properties of some Iowa soils. **Iowa State Journal Scientific**, Ames, v.32, p.485-540.
- AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. **Catena**, Amsterdam v.64, n.1, p.247-271.
- ALBUQUERQUE, A.W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V.S. 2001. Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvisolo em Sumé (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 121-128.
- AI-DURRAH, M; BRADFORD, J.M. 1981. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. **Soil Sci. Amer. Jour**, v.45, p.949-953.
- AI-DURRAH, M; BRADFORD, J.M. 1982. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. **Soil Sci. Amer. Jour**, v.46, p.1086-1090.
- ALVES, C.M.; 1986. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 115p. (Dissertação-Mestrado).
- AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D.da; PRUSKI, F.F.; MATOS, A.T.de. 2010. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1046-1049, nov./dez.
- AMORIN, R.S.S.; SILVA, D.D.da; PRUSKI, F.F. 2009. Principais modelos para estimar as perdas de solo em área agrícola. In: PRUSKI, F.F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. atual. e ampl. Viçosa: Ed. UFV, p.76-107.
- ANDRADE, R.daS.; MOREIRA, J.A.A.; STONE, L.F.; CARVALHO, J.de A. 2002. Consumo relativo de água do feijoeiro no plantio direto em função da porcentagem de cobertura morta do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.35-38.
- ANDRIOLI, I.; PALMERI, A. J.; CHUEIRE, F. B.; NATALE, W.; CENTURION, J. F. 1997. Avaliação da estrutura e da matéria orgânica do solo em áreas de plantio direto e convencional de soja sobre palha de cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto – SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 1997. CD Rom.
- ANJOS, J.T.; UBERT, A.A.A.; VIZZOTO, V.J.; LEITE, G.B.; KRIEGER, M. 1994. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.139-145.

ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M. R. 1996. Infiltração de água em Cambissolos do Baixio do Irecê (BA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.263-370.

AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MELLO, C.R.; FONSECA, S. 2008. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.6, p.563-569.

AYRES, Q.C. 1936. **Soil erosion and its control**. New York, N.Y., McGraw-Hill, 365p.

BALASTREIRE, L.A. 1998. Potencial de utilização dos conceitos de agricultura de precisão na cultura da cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.16, n.4, p.22-26.

BALASTREIRE, L.A.; ELIAS, A.I.; AMARAL, J.R. 1997. **Agricultura de precisão**: mapeamento da produtividade do milho. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.8, p.97-111.

BARCELOS, A. A.; CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E. 1999. Infiltração de água em um Latossolo vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.35-43.

BARNETT, A.P.; ROGERS, J.S. 1966. Soil physical properties related to runoff and erosion from artificial rainfall. **Trans. ASAE**, St. Joseph, Mich. n.9, p. 123-125, 128.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. 1972. **Soil physics**. 4.ed. New York: John Wiley, 498p.

BEASLEY, R.P. 1972. **Erosion and sediment pollution control**, Ames, Iowa State University Press. 320p.

BEASLEY, R.P.; MEYER, L.D. 1955. Improved technique in terrace systems layout and construction. In: **WINTER MEETING, AMER. SOC. AGRIC. ENGINEERS**, 1955.

BELARDO, G.C. **Avaliação de desempenho efetivo de três colhedoras de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sem queima**. 2010. 136p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

BENEDINI, M.S.; CONDE, A.J. 2008. Sistematização de área para colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Revista Coplana**, Guariba, SP, n. 53, p. 23-25.

BENNETT, H.H. 1939. **Soil conservation**. New York, McGraw-Hill, 993p.

BENNETT, J.P. 1974. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. **Water Resources Research**, v.10, n.3, p.485-492.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. 2006. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: Ed. UFV, 625p.

BERTOLINI, D.; GALETI, P.A.; DRUGOWICH, M.I. 1989. Tipos e formas de terraços. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA, Campinas, 1988. **Anais...** Campinas, SP: Fundação Cargill, p.79-98.

BERTONI, D.; LOMBARDI NETO, F.; LEPSCH, I.F.; OLIVEIRA, J.B.de; DRUGOWICH, M.I.; ANDARADE, N.de O.; GALETI, P.A.; BELLINAZZI JUNIOR, R.; DECHEN, S.C.F. 1994. Tecnologias disponíveis para controlar o escoamento superficial do solo. In: LOMBARDI NETO, F. e DRUGOWICH, M.I. (Coord.) **Manual técnico de manejo e conservação de solo e água**. Campinas, CATI – Coordenadoria de Assistência Técnica Integral, v.IV, p.11-35.

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

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. 1990. **Conservação do solo**. Piracicaba, SP: Livroceres, 392p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. 2010. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 7ª edição, 355p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.; BENATTI JUNIOR, R. 1975. **Equação de perdas de solo**. Instituto Agrônomo, Campinas-SP, 25p. (Boletim Técnico, 21).

BERTONI, J.; PASTANA, F.I.; LOMBARDI NETO, F.; BENATTI JUNIOR, R. 1972. **Conclusões gerais das pesquisas sobre conservação do solo no Instituto Agrônomo**. Campinas, SP, Instituto Agrônomo, 56p.

BEVEN, K. 1989. Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models. **Journal of Hydrology**, v.105, p.157-172.

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B. 1996. Erosão entressulcos em diferentes condições de cobertura do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.3, p.565-573.

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B. 2006. Erosão em sulco em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.30, n.3, p.565-573.

BIANCHINI, A.; MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. Cultivo do solo em áreas de cana crua. **Revista STAB**, v.19, n.5, p.30-33, 2001.

BISHOP. J.C.; GRIMES, D.W. Precision tillage effects on potato root and tuber production. **American Potato Journal**, Orono, v.55, p.65-71, 1978.

BITTENCOURT, H.V.C.O. 1943. O controle da erosão nos cafezais: sulcos e cordões de contorno. Boletim Superintendência dos Serviços do Café, São Paulo, n.18 v.194 p.230-237; v.195 p.322-330, v. 196 p.418-425.

BLACKMER, T.; SCHEPERS, J.S. 1996. Using DGPS to improve corn production and water quality. **GPS World**, Duluth, p.44-52.

BLACKMORE, B.S.; LARSCHEID, G. 1997. Strategies for managing variability. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE 1997, 1., Warwick, 1997. **Proceedings...** London: BIOS Scientific, p.851-859.

BLAIR, G.J.; CHAPMAN, L.; WHITBREAD, A.M.; BALLCOELHO, B.; LARSEN, P.; TIESSEN, H. 1998. Soil carbon changes resulting from sugarcane trash management at two locations in Queensland, Australia, and in North-East Brazil. **Australian Journal of Soil Research**, v.36, p.873-882.

BLAIR, N. 2000. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, v.55, p.183-191.

BOND, W.J. 1998. Effluent irrigation: an environmental challenge for soil science. **Australian Journal of Soil Research**, v.36, p.543-555.

BONHAM-CARTER, G.F. 1997. **Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS**. Ontario: Pergamon, 398p.

BONONI, M.M.; ROSA, R.F.da. 2007. Planejamento agrícola. In: SEGATO, S.V.; FERNANDES, C.; PINTO, A. de S. (Org.). **Expansão e renovação do canavial**. Piracicaba: CP2, p. 19-36.

BOYOUCOS, G.J. 1935. The clay ratio as criterion of susceptibility of soils to erosion. **Journal of American Society of Agronomists**. v.27, p.738-741.

BRADFORD, J. M.; HUANG C. 1996. Splash and detachment by waterdrops, In: **Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation**. Ed. M. Agassi. Marcel Dekker Inc., 61-76.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. 2002. **The nature and properties of soils**. 13th ed. New Jersey: Prentice Hall, 960p.

BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. 1999. Relações da erosão em entressulcos com o tipo e quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, 711-721.

BRAKENSIEK, D.L. 1955. Estimation of surface runoff volumes from agricultural watershed by infiltration theory. Ph.D. Thesis Ames, Iowa State University.

BRANDÃO, V.dosS.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.da. 2006 **Infiltração de água no solo**. 3.ed. Atual. e Ampl. – Viçosa: Ed. UFV. 120p.

BRANQUINHO, A. 2015. Estudo de caso: aplicação da sistematização agrícola de área canavieiras na usina VO de Votuporanga, SP. In: BELARDO, G.deC.; CASSIA, M.T.; SILVA, R.P.da. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Editora SBEA, p. 105-115.

BRASIL. 2014. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar 2014/2015, terceiro levantamento, dezembro/2014/Companhia Nacional de Abastecimento**. Brasília: Conab, 2014.

BRAUNACK, M.J.; PEATEY, T.C. 1999. Changes in soil physical properties after one pass of a sugarcane haul-out unit. **Aust. J. Exp. Agric.**, 39:733 – 742.

BRAUNACK, M.V.; ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. 2006. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, v.89, p.103-121.

BRAUNBECK, O.A.; OLIVEIRA, J.T.A. 2006. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.300-308, jan./abr.

BRITO, L. T. de L.; LOUREIRO, B. T.; DENICULI, W.; RAMOS, M. M.; SOARES, J. M. 1996. Influência do método na determinação da velocidade de infiltração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.503-507.

BRUGNARO, C.; SBRAGIA, R. 1986. **Gerência agrícola em destilarias de álcool**. IAA/PLANALSUCAR. 2ed. Piracicaba, 210p.

BRYAN, R.B. 1968. **The development, use and efficiency of indices of soil erodibility**. *Geoderma*. v.2, p.5-26.

BRYAN, R.B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. **Geomorphology**, 32, p. 385–415.

BUCKINGHAM, E. 1907. **Studies of the Moviment of Soil Moisture**. USDA Bureau Soil, vol. 38.

BUIE, E.C. 1941. Terrace system planning to reduce point-row. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, Mich., 22:321-324. 1941.

CAIXETA-FILHO, J.V.; GAMEIRO, A.H.; MARTIGNON, L.deM.; SOARES, M.G.; SILVA, N.deD.V.; GALVANI, P.R.C.; LOPES, R.L.; MARQUES, R.W.daC. 2001. Movimentação Rodoviária de Produtos Agrícolas Selecionados. In: CAIXETA-FILHO J.V.; GAMEIRO, A. H. (Org.). **Transporte e logística em sistemas agroindustriais**. São Paulo: Atlas, p.154-156.

CANETTIERI, J.D. 1989. Construção de terraços – Processos tradicionais de construção. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA, Campinas, 1988. **Resumos**. Campinas: Fundação Cargill, p. 169-186, 1989.

CARVALHO FILHO, S.M. **Colheita mecanizada: desempenho operacional e econômico em cana sem queima prévia**. 2000. 108p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

CARVALHO, E.J.M.; FIGUEIREDO, M.deS.; COSTA, L.M.da. 1999. Comportamento físico-hídrico de um podzólico vermelho-amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.2, p.257-265.

CASSOL, E.A. 1986. **Erosão do solo**: influência do uso agrícola, do manejo e preparo do solo. 2.ed. Porto Alegre, IPRNR-Ataliba Paz. 40p. (Publicação IPRNR, 15).

CASSOL, E.A.; CANTALICE, J.R.B.; REICHERT, J.M.; MONDARDO, A. 2004. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.7, p.685-690.

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

CERRI, D.G.P. 2005. **Agricultura de precisão em cana-de-açúcar**: instrumentação de uma colhedora, mapeamento da produtividade e de atributos do solo. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, SP, 156p.

CHOW, V.T. 1959. **Open-channel Hydraulics**, McGraw-Hill, New York. 493p.

CLARK, R.L.; MCGUCKIN, R.L. 1996. Variable rate application technology: an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, 1996, Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA; CSSA; SSSA, p.855-862.

COELHO, M.A. 2005. **Agricultura de Precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 60p.; 21 cm. - (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277; 46).

COLETI, J.T. & STUPIELLO, J.J. 2006. Plantio da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.deS.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M.de. **Atualização em Produção de Cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, p.139-153.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA DE SÃO PAULO – CODASP. 1994. **Manual técnico de motomecanização agrícola**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 101p.

CONDE, A.J.; JOAQUIM, A.C. 1995. Planejamento de talhões pela base física. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., Piracicaba, 1995. Piracicaba: **Anais...** COPERSUCAR, p.156-160.

CONDE, A.J.; SALATA, J.C. **Épocas de plantio x época de corte em 6 variedades**. Quatã: Departamento Agrônômico da Cia Agrícola Quatã, 1985, 9p.

COOK, H.L. 1936. The nature and controlling variables of the water erosion process. **Soil Science Society Proceedings**, Madison, p.487-494.

CORDEIRO, J.C. 1977. **Características físico-hídricas de latossolos sob vegetação de cerrados do Brasil Central**. Seropédica, RJ: UFRJ, 1977. 122p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

CROSSON, P. 1995. Soil erosion estimates and costs. **Science**, n.269, p.461-462.

CRUZ, D.M. 2003. Plantio direto e preparo reduzido ganham terreno. **JornalCana**, mar., 34p.

DAKER, A. 1970. **A água na agricultura: irrigação e drenagem**. 3.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, v.3, 453p.

DALBEN, E.A.; NELLI, E.J.; ALMEIDA, O.J.; DEMATHÊ, J.L.I. 1983. Plantio direto de cana-de-açúcar em solos de baixa fertilidade. **Revista Álcool e Açúcar**, v.3, n.12, p.30-32.

DANTAS, J. S. ; MARTINS FILHO, M.V. ; MARQUES JÚNIOR, José ; RESENDE, J. M. A. ; TEIXEIRA, D. B. ; BARBOSA, R. S. ; SIQUEIRA, D. S. 2014. Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (1977. Impressa), v. 49, p. 700-707, 2014.

DE JONG VAN LIER, Q.; SPAROVEK, G.; FLANAGAN, D.C.; BLOEM, E.M.; SCHNUG, E. 2005. Runoff mapping using WEPP erosion model and GIS tools. **Computers and Geosciences**. New York, v.31, n.10, p.1.270-1.276.

DE MARIA, I.C.; MARTINS, J.P.P. 2015. Uso do terraceamento agrícola na cultura da cana-de-açúcar. In: BELARDO, G.deC.; CASSIA, M.T.; SILVA, R.P.da. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Editora SBEA, p. 117-127.

DEMATTÊ, J.L.I. 2004. Manejo e conservação de solos, na cultura da cana. **Visão Agrícola**, Piracicaba, p.8-17, jan/jun.

DENARDIN, J.E. 1990. Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1990. 122p. (Tese de Doutorado).

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA AGRICULTURA. 1956. Divisão de Conservação do solo. Tabela de espaçamento de terraços, cordões em contorno e faixas de retenção. São Paulo, 8p.

DOUGLAS, I. 1999. Sediment transfer and siltation. In: TURNER, B.L. (ed.) **Transformations of the Global Environment**. Cambridge: Cambridge University Press, p.215-234.

DRISCOLL, T.M. 2011. **Complete coverage path planning in an agricultural environment**. MSc. Thesis. Iowa State University, Computer Science Department, 71p.

DUARTE JÚNIOR, J.B.; COELHO, F.C. A cana-de-açúcar em sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.6, p.576-583, 2008.

DULLEY, F.L. 1939. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. **Soil Science American Journal Proceedings**, v.4, p.60-64.

DUNIN, F. 1975. **The use of physical process models**. In: CHAPMAN, T.; DUNIN, F. (Eds.), Prediction in Catchment Hydrology - A National Symposium on Hydrology. Australian Academy of Science, Canberra, p. 277-291.

ELLIOT W.J. LEIBENOW, A.M.; LAFLÉN, J.M.; KOHL, K.D.1989. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988**. West Laffayette: Ohio State

University and USDA Agricultural Research Service Available from USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory, 316p. (NSERL Report nº 3).

ELLISON, W.D. 1945. Some effects of raindrops and surface-flow on soil erosion and infiltration. **Transactions of the American Geophysical Union**, v.26, n.3, p.415-430.

ELLISON, W.D. 1947a. Soil erosion studies. **Agricultural Engineering**, v.28, p.145-147, 197-201, 245-248, 297-300, 349-351, 402-405, 442-444.

ELLISON, W.D. 1947b. **Soil erosion**. Soil Sci. Amer. Proc. Madison, Wisc., v. 12, p. 479-484.

ELLISON, W.D.; ELLISON, O.T. 1947. Soil erosion studies – Part VII. **Agriculture Engineering**. St. Joseph, p. 442-450.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. 1969. **Engineering field manual**. Washington, D.C., 1969. 994p.

FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. **Área de plantio direto no mundo**. Disponível em: www.febrapdp.org.br. Acesso em: 27 jan. 2012.

FEIGIN, A.; RAVINA, I.; SHALHEVET, J. 1991. **Irrigation with treated sewage effluent**: management for environmental protection. Berlin: Springer, 224p.

FERREIRA, M.M. 1988. **Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos brasileiros**. Viçosa, MG: UFV, 1988. 79p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa.

FERRO, V.; MINACAPILLI, M. 1995. Sediment delivery processes at basin scale. **Hydrological Sciences Journal**, v.40, n.6, p.703-717.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M.A. 1995. USDA Water Erosion Prediction Project hillslope and watershed model documentation. **NSERL Report No. 10**. West Lafayette, Ind.:USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.

FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH II J.C.; NEARING, M.A.; LAFLEN J.M. 2001. Chapter 7: The Water Erosion Prediction Project (WEPP) model. In **Landscape Erosion and Evolution Modeling**, 145-199. R. S. Harmon and W. W. Doe III, eds. New York, N.Y.: Kluwer Academic / Plenum Publishers.

FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH II, J.C.; GETER, W.F.; DAVID, O. 2005. Development of a hillslope erosion module for the object modeling system. **ASAE Paper No. 052012**. St. Joseph, Mich.: ASAE.

FLANAGAN, D.C.; ENGEL, B.A.; LAFLEN J.M.; NELSON S.C. 1995. A multimedia CD-ROM for delivery of WEPP technology. **ASAE Paper No. 952388**. St. Joseph, Mich.: ASAE.

FLANAGAN, D.C.; FRANKENBERGER, J.R.; ENGEL B. A. 2004. Web-based GIS application of the WEPP model. **ASAE Paper No. 042024**. St. Joseph, Mich.: ASAE.

FLANAGAN, D.C.; FU H.; FRANKENBERGER, J.R.; LIVINGSTON, S.J.; MEYER, C.R. 1998. A Windows interface for the WEPP erosion model. **ASAE Paper No. 982135**. St. Joseph, Mich.: ASAE.

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

FLANAGAN, D.C.; LIVINGSTON S.J. 1995. Water Erosion Prediction Project (WEPP) Version 95.7: User summary. **NSERL Report No. 11**. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.

FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. 2000. Sediment particle sorting on hillslope profiles in the WEPP model. **Trans. ASAE** 43(3): 573-583.

FLANAGAN, D.C.; WHITTEMORE D.A.; LIVINGSTON, S.J.; ASCOUGH, J.C.; SAVABI, M.R.. 1994. Interface for the Water Erosion Prediction Project model. **ASAE Paper No. 942105**. St. Joseph, Mich.: ASAE.

FONSECA, A.F.; HERPIN, U.; PAULA, A.M.; VICTORIA, R.L.; MELFI, A.J. 2007. Agricultural use of treated sewage effluents: agronomical-environmental implications and perspectives for Brazil. **Scientia Agricola**, v.64, p.194-209.

FOSTER, G.R. 1982. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSSIEK, D.L. **Hidrologic modeling of small watersheds**. St Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p.296-380. (Monograph, 5).

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

FOX, D.M.; LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. 1998. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression. **Catena**, v.32, p.87-100.

FREIRE, O.; PESSOTTI, J.E.S. 1976. Erodibilidade dos solos de Piracicaba. **Revista de Agricultura**, v.51, n.3/4, p.195-202.

FURTINI NETO, A.E.; VALE, F.R.do; RESENDE, A.V.de; GUILHERME, L.R.G.; GUEDES, G.A. de A. 2001. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 261p.

GANDINI, M. O.; GAZON, A. L.; CONDE, A. J. DONZELLI, J. L. 1996. **Conservação de solos e planejamento de sulcação em áreas de colheita mecânica de cana crua**. In: CONGRESSO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO DE TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL (STAB), Recife.

GOERING, C.E. 1993. Recycling a concept. **Agricultural Engineering**, v.74, p.25.

GONÇALVES, N. H. 2006. **Manejo do solo para implantação da cana-de-açúcar**. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A.; JENDIROBA, E.; NOBREGA, J. C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, CP 2, 2006. 415p.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. 1911. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, v.4, n.1, p.1-24.

GUIMARÃES, R.V.; RAFFO, J.G.daG. 2005. Utilização de Sistema de Informações Geográficas para o planejamento da base física na cultura da cana-de-açúcar. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia. **Anais...** p.167-172.

HAMILTON, C.L. 1938. **Terracing for soil and water conservation**. Washington, D.C., USDA, 59p. (Farmer's Bulletin, 1789).

HAMILTON, C.L.; JEPSON, H.G. 1939. **Graphic solution of open channel dimensions**. USDA, 1939. 10p. (Soil Conservation Service, SCS ED – 15).

HARPER, H.J. 1937. Soil structure and moisture movement. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v.2, pp.15-20.

HILLEL, D. 1980. **Applications of soil physics**. California: Academic Press Inc., 385p.

HOUSER P. 2003. Infiltration and Soil Moisture Processes. In POTTER T.D.; COLMAN B.R. (eds.), **Handbook of Weather, Climate and Water: Atmospheric Chemistry, Hydrology and Societal Impacts**. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2003.

HUANG, C.; BRADFORD, J.M.; CUSHMAN, J.H. 1982. A numerical study of raindrop impact phenomena: the rigid case. **Soil Sci. Soc. Amer. Jour.**, v.46, p.14-19.

HUANG, C.; BRADFORD, J. M.; CUSHMAN, J. H. 1983. A numerical study of the raindrop impact phenomena: The elastic deformation case, **Soil Sci. Soc. Amer. Jour.**, v.47, p. 855-861.

HUDSON, N. W. 1995. **Soil conservation**. Ames: Iowa State University Press. 391p.

HUDSON, N.W. 1971. **Soil Conservation**. 1st edition, Batsford Ltd., London.

HUDSON, N.W. 1973. **Soil conservation**. Ithaca, N.Y. Cornell University Press, 320p.

IZIDORIO, R. 2004. **Perdas de nutrientes e sua distribuição espacial num Latossolo Vermelho**. 68p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

IZIDORIO, R.; MARTINS FILHO, M.V.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. 2005. Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.660-670.

JABRO, J.D. 1996. Variability of field-saturated hydraulic conductivity in Hagerstown soil as affected by initial water content. *Soil Science*, Baltimore, v.161, n.11, p.735-739.

- JAKEMAN, A.J.; GREEN, T.R.; BEAVIS, S.G.; ZHANG, L.; DIETRICH, C.R.; CRAPPER, P.F. 1999. Modelling upland and in-stream erosion, sediment and phosphorus transport in a large catchment. **Hydrological Processes**, v.13, n.5, p.745-752.
- JAKEMAN, A.J.; HORNBERGER, G.M. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? **Water Resources Research**, v.29, n.8, p.2637-2649.
- JHA, M.K.; SCHONFELD, P.; JONG, J.C.; KIM, E. 2006. **Intelligent Road Design**. WIT Press, Boston, MA, ISBN: 1-84564-003-9, 448 pp.
- JIN, J.; TANG L., 2010a. Optimal Coverage Path Planning for Arable Farming on 2D Surfaces, **Transactions of the ASABE**, v.53, n.1, p.283-295.
- JIN, J.; TANG, L. 2010b. Optimal Coverage Path Planning on 3D Terrain. Annual International Meeting Sponsored by ASABE. **Proceedings...** Pittsburgh, Pennsylvania, 2010.
- KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. 1999. Modelling sugarcane production systems I: development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 27-36.
- KOFLER, N.F; DONZELI, P. L. 1997. **Avaliação de solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar** In: PARANHOS, S. B. (Coord.). Cana-de-açúcar: Cultivo e utilização. Campinas. Fundação Cargil, v.2. p.19-41.
- LABUSCHAGNE, N., JOUBERT, D. Profile modification as a means of soil improvement: promoting root health through deep tillage. In: UPHOFF, N.; BALL, S.A.; PALM, C. **Biological approaches to sustainable soil systems**. Boca Raton: CRC Press, 2006. Chap. 38, p.547-558.
- LAFLEN, J.M.; FOSTER, G.R.; ONSTAD, C. 1985. Simulation of individual storm soil losses for modeling the impact of soil erosion on cropland productivity. In: EL-SWAFY, S.A.; MULDENHAUER, W.C.; ANDREW, L. (Ed.). **Soil erosion and conservation**. Ankeny: SCSA. p.285-295.
- LAFLEN, J.M.; LANE, L.J.; FOSTER, G.R. 1991. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.46, p.34-38.
- LAFLEN, J.M.; MOLDENHAUER, W.C. 2003. **Pioneering Soil Erosion Prediction: The USLE Story**, World Association of Soil and Water Conservation Special Publication No. 1, Editor: Michael A. Zebisch.
- LAGUË, C.; AGNEW, J.; KHELIFI, M. 2003. Theoretical evaluation on the feasibility of controlled-traffic farming (CTF) using wide-span implement carriers (WSIC) for Canadian agriculture. In: ANUAL MEETING OF THE CSAE/SCGR, Montréal. **Proceedings**. Montréal: CSAE/SCGR, 2003. (CSAE. Paper, 03-233).
- LAL, R. 1974. No-tillage effects on soil properties and maize (*Zea mays* L.) production in Western Nigeria. **Plant and Soil**, Amsterdam, v.40, p.321-331.
- LAL, R. 1976. Soil erosion on alfisols in western Nigeria. III. Effects of rainfall characteristics. **Geoderma**, Amsterdam, v.16, p.389-401.

LANE, L.J.; RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; LAFLEN, J.M. 1992. Development and application of modern soil erosion prediction technology – The USDA experience. **Australian Journal of Soil Research**, v. 30, n.6, p. 893-912.

LAWS, J.O. 1940. Recent studies in raindrops and erosion. **Agri. Eng.**, v.21, p.431-433.

LAWS, J.O. 1941. Measurements of the fall-velocities of water-drops and raindrops. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, D.C., n.22, p.709-721

LAWS, J.O.; PARSON, D.A. 1943. The relation of raindrop-size to intensity. **Transactions of the American Geophysical Union**, Part II, Washington, D.C., p.452-459.

LEAL, R.M.P.; FIRME, L.P.; MONTES, C.R.; MELFI, A.J.; PIEDADE, S.M. de S. 2009. Soil exchangeable cations, sugarcane production and nutrient uptake after wastewater irrigation. **Scientia Agricola**, v.66, p.242-249.

LETCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J.; MERRITT, W.S.; McKEE, L.J.; EYER, B.D.; BAGINSKA, B. 1999. **Review of techniques to estimate catchment exports**. EPA Technical Report 99/73. Environmental protection authority, Sydney <http://www.environmental.gov.au/epg/npi/pubs/pubs/nswreport.pdf>.

LINSLEY, C.M.; BAUER, F.C. 1929. **Test your soil for acidity**. Circular 346. College of Agriculture and Agricultural Experiment Station, University of Illinois, Champaign, IL.

LIU, D. L.; KINGSTON, G.; BULL, T. A. 1999. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including sub optimum and supra optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 90, p. 119-139.

LIU, T. L.; JUANG, K.W.; LEE, D. Y. 2006. Interpolating soil properties using kriging combined with categorical information of soil maps. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, n.4, p.1200-1209.

LOCH, R.; ROSEWELL, C. 1992. Laboratory methods for measurement of soil erodibilities (K factors) for the universal soil loss equation. **Australian Journal of Soil Research** v.30, p.233–248.

LOMBARDI NETO, F.; BELINAZZI JUNIOR, R.; LEPSCH, I.F.; OLIVEIRA, J.B.; BERTOLINI, D. GALETI, P.A.; DRUGOWICH, M.I. 1994. **Terraceamento agrícola**. Campinas: Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, CATI, 39 p. (Boletim Técnico, 206).

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. 1975. **Erodibilidade dos solos paulistas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 12p. (Boletim Técnico, 27).

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. 1975b. **Tolerância de perda de terra para solos do Estado de São Paulo**. Campinas, SP, Instituto Agrônômico, 12p. (Boletim técnico 28).

LOMBARDI NETO, F.; CASTRO, O.M.; DECHEN, S.C.F.; SILVA, I.R.; BENATTI JUNIOR, R. 1980. Sistemas de preparo do solo em relação à erosão e à produção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3. **Anais...** Brasília, 1980.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. 1980. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3. Recife-PE, Brasil. **Anais...** fl. 13.

LOMBARDI NETO, F.; PRUSKI, F.F.; TEIXEIRA, A.F. 2000. **Sistema de cálculo da erosividade da chuva para o estado de São Paulo**. Viçosa. CD-ROM.

LOMBARDI NETO, F.; SILVA, I.R.; CASTRO, O.M. 1980. Potencial de erosão das chuvas no Estado de São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3. Recife-PE, Brasil. **Anais...** fl. 13.

LOPES, A.S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. 2004. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos, 116p.

LOPES, P.R.C.; COGO, N.P.; CASSOL, E.A. 1987. Influência da cobertura vegetal morta na redução da velocidade da enxurrada e na distribuição de tamanhos dos sedimentos transportados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, n.2, p.193-197.

LOWDERMILK, W.C. 1929. Further studies of factors affecting surficial runoff and erosion, International Cong. Forestry, **Proc.**

LOWDERMILK, W.C. 1930. Influence of forest litter on runoff, percolation and erosion. **Jour. Forestry**, v.28, n.4.

LUCA, E.F.; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C.; MANECHINI, C. 2008. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio no em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.32, p.789-800.

LUCHIARI, A.; SHANAHAN, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J.; LIEBIG, M.; SCHEPERS, A.; PAYTON, S. 2000. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In P.C. Robert et al. (ed.). Fifth Intl. Conf. on Site-Specific Management for Agricultural Systems. **Proceedings...** Minneapolis, MN. 16-19 July 2000. CD-ROM. Bloomington, MN. ASA, SSSA, ASA., Madison, WI.

MACHADO, J. (Coords.). **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fund. Cargill, p.163-179.

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

MANZATTO, C.V.; ASSAD, E.D.; BACCA, J.F.M.; ZARONI, M.J.; PEREIRA, S.E.M. 2009. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar: Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 55p.

MARGÓLIS, E. 1989. Terraceamento na região nordeste do Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA, 1., 1998, Campinas. **Anais...** Campinas, SP: Fundação Cargill, p.3-10.

MARQUES J.Q.A.; BERTONI, J.; BARRETO, G.B. 1961. Perdas por erosão no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, n.20, p.1143-1181.

MARQUES, J.Q.A. 1950. **Conservação do solo em cafezal**. Boletim da Superintendência dos Serviços do Café, São Paulo, 234p.

MARTINS FILHO, M.V. 1999. Modelagem do processo de erosão entressulcos em latossolos de Jaboticabal - SP. 1999. 140p. **Tese** (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

MARTINS FILHO, M.V. 2007a. **Modelagem do processo de erosão e padrão espacial da erodibilidade em entressulcos**. 121p. Tese (Livre-Docência) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2007.

MARTINS FILHO, M.V. 2007b. Manejo e conservação do solo em áreas de expansão e renovação de canavial. In: SEGATO, S.V.; FERNANDES, C.; PINTO, A.S. (Org.). **Expansão e renovação de canavial**, Piracicaba: CP2, 2007b. v.2, p.53-68.

MARTINS FILHO, M.V.; CAMPOS, M.P.de; IZIDORIO, R.; COTRIN, F.B.; SERRA, E.A.; AMARAL, N.S.do; SOUZA, Z.M.de. 2004. Modelos para estimativa do subfator cobertura-manejo (CiII) relativo à erosão entressulcos. **Engenharia Agrícola** (Impresso), Jaboticabal, v. 24, n.3, p. 603-611, 2004.

MARTINS FILHO, M.V.; LICCIOTTI, T.T.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SANCHEZ, R.B. 2009. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** (Impresso), v. 29, p. 8-18, 2009.

MAZZA, J.A. 2015. Manejo dos solos na cana-de-açúcar como subsídio à mecanização. In: BELARDO, G.deC.; CASSIA, M.T.; SILVA, R.P.da. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Editora SBEA, p. 89-103.

McINTYRE, D.S. 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. **Soil Science**, v. 85, p. 261-266.

MEAD, D.W. 1919. **Hydrology**. New York, N.Y., McGraw-Hill, 647 p.

MEIN, R.G.; LARSON, C.L. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resource Research**, v.9, n.4, p.384-394.

MERRITT, W.S.; LATCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v.18, p.761-799.

MEYER, A.F. 1917. **The elements of hydrology**. New York, N.Y., John Wiley, 522p.

MIDDLETON, H.E. 1930. **Properties of soils which influences soil erosion**. Washington, D.C., USDA, 16p. (Technical Bulletin, 178).

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

MOLIN, J. P. 2004. Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. **Anais...** Piracicaba, SP – ESALQ/USP.

MOLIN, J. P. 2002. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.1, p.83-92.

MOLIN, J. P.; FONTANA, G.; GUIMARÃES, R.V.; CABRERA, F.R.; COSTA, M.B. 2004. Elaboração de mapas de produtividade de cana-de-açúcar em corte manual com queima prévia. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, p. 1-7.

MOLIN, J.P.; SILVA JÚNIOR, R.L.da. 2003. Variabilidade espacial do índice de cone, correlacionada com textura e produtividade. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 14, nº único, p. 49-57.

MOLIN, J.P.; MILAN, M.; NESRALLAH, M.G.T.; CASTRO, C.N.de; GIMENEZ, L.M. 2006. Utilização de dados georreferenciados na determinação de parâmetros de desempenho em colheita mecanizada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, p.759-767.

MONDO, V.H.V.; GOMES JUNIOR, F.G.; PINTO, T.L.; MARCHI, J.L. ; MOTOMIYA, AV.deA.; MOLIN, J.P.; CICERO, S.M. 2012. Spatial variability of soil fertility and its relationship with seed physiological potential in a soybean production area. **Revista Brasileira de Sementes** (Impresso), v. 34, p. 193-201.

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. 1997. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.) **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, p. 1-18.

MUSGRAVE, C.W. 1947. The quantitative evaluation of factors in water erosion, a first approximation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.2, p.133-138.

MUSGRAVE, G.W.; FREE, G.R. 1937. Preliminary report on the determination of comparative infiltration rates on some major soil types, Am. Geophys. **Union Trans**. Part II, p.345-349.

MYHARA, Y. 1952. **Raindrops and soil erosion**. Nat. Inst. Agric. Sci., Tokyo, Japan. (English translation from Japanese published in July 1951).

NEARING, M.A., DEER-ASCOUGH, L.; LAFLEN, J.M. 1990. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. American Society of Agricultural Engineers, v. 3, n. 33, p. 839-849.

NEARING, M.A.; LANE, L.J.; LOPES, V.L., 1994. Modelling soil erosion. In: Lad, R. (Ed.), **Soil Erosion: Research Methods**, pp. 127–156.

NERY, M.S. **Desempenhos operacional e econômico de uma colhedora em cana crua**. 2000. 108p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

NEVES, J.L.M. **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras de cana-de-açúcar picada e alternativas para sua redução**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 223p.

NICHOLS, M.L. 1937. **An improved channel-type terrace for the south-east**. Washington, D.C., USDA (Technical Bulletin, 558).

NIELSEN, D.R.; WENDROTH, O.; JÜRSCHIK, P.; KÜHN, G.; HOPMANS, J.W. 1996. Precision agriculture: challenges and opportunities of instrumentation and field measurements. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 1., nov. 1996, São Carlos, SP. 1996. **Anais...** São Carlos: EMBRAPA-CNPIDIA.

NUNES JÚNIOR, D.; GONÇALVES, J.L.; SILVA JÚNIOR, A.C.da; NAGUMO, M.; D'ARAGONE, R.B. 2014. **Indicadores de desempenho da agroindústria canavieira : Safras 2012/2013 e 2013/2014**. Ribeirão Preto: IDEA – Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial, 2014.

OKSANEN, T. 2007. **Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines**. PhD dissertation. Helsinki University, Department of Automation and Systems Technology, Helsinki, Finland, 112p.

OLIVEIRA, F.G.; SERAPHIM, O.J. 2011. Cultivo da cana-de-açúcar e o uso do solo em áreas de preservação permanente. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.26, n.2, p.36-48.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B., BARROS, N.F. 2002. **Fertilidade do solo no sistema plantio direto**. Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa, v. 2, p.393-486.

OLSON, T.C.; WISCHMEIER, W.H. 1953. Soil erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion station. **Soil Sci. Amer. Proc.**, Madison, Wisc. n. 27, p.590-593.

OSTERGAARD, H.S. 1997. Agronomic consequences of variable fertilization. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE '97, 1, 1997, Oxford. **Proceedings...** London: BIOS Scientific Publications, v.1, p. 315-320.

PAIVA, E.M.C.D.; PAIVA, J.B.D.; MOREIRA, A.P.; MAFFINI, G.F.; MELLER, A.; DILL, P.R.J. 2001. Evolução de processo erosivo acelerado em trecho do Arroio Vacacaí Mirim. **R. Bras. Rec. Híd.** v.6, p.129-135.

PAIXÃO, F.J.R.; ANDARADE, A.R.S.; AZEVEDO, C.A.V.; COSTA, T.L.; GUERRA, H.O.C. 2009. Ajuste da curva de infiltração por meio de diferentes métodos empíricos. **Pesquisa aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.2, n.1, p.108-122.

PAMPLONA, E.de O.; MONTEVECHI, J.A.V. 2005. **Apostila de Engenharia Econômica II**. Disponível em: <http://www.iepg.unifei.edu.br/edson/download/Engecon2/Apostee2.pdf> Acesso: 30 jan. 2012.

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

PAVLYCHENKO, T.K. 1937. The soil-block washing method in quantitative root study, **Canadian Jour. Research**, v.5.

PEELE, T.C. 1937. The relation of certain physical characteristics to the erodibility of soils. **Soil Science Society of American Procedures**. Madison, Wiscosin, v.2, p.97-100.

PENARIOL, A.L.; SEGATO, S.V. 2007. Importância da rotação de culturas na cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; FERNANDES, C.; PINTO, A.S. **Expansão e renovação de canavial**. Piracicaba: CP 2, p. 11-18.

PENATTI, C.P. 2006. Planejamento da sulcação para plantio e colheita mecanizada. **Revista Coplana**, Guariba, SP, n. 27, 21 p.

PERTICARRARI, J.G.; IDE, B.Y. 1986. Cultivo mínimo . III Seminário de Tecnologia Agronômica . Centro Tecn.COPERSUCAR. **Anais...** , Piracicaba SP, p.387-409.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; McNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRITZ, L.; FITTON, L.; SAFFOURI, R.; BLAIR, R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, v.267, n.5201, p.1117-1123.

PIMENTEL, D.; SKIDMORE, E.L. 1999. Rates of erosion. **Science**, v 286, n.5444, p.1477.

PIRES, J.L.F.; CUNHA, G.R.da; PASINATO, A.; FRANÇA, S.; RAMBO, L. 2004. **Discutindo agricultura de precisão**: aspectos gerais, dez. 2004. Disponível em: www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_dp42.htm. Acesso em: 12 nov. 2012.

PORTO, R. 2000. Drenagem urbana. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2. Ed. Porto Alegre: ABRH-EDUSP, 943P.

PORTO, R. de M. 2006. **Hidráulica básica**. 4 ed. São Carlos, SP: EESC-USP, 540p.

PRADO, H. 2005. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. In: Potafós. **Encarte do Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.110, p.12-17, jun.

PRUKSI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. 2004. **Escoamento superficial**. Viçosa, MG: Editora UFV, 87p.

PRUSKI, F.F. 2009a. Escoamento superficial. In: PRUSKI, F.F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. atual. e ampl. Viçosa: Ed. UFV, p.108-131.

PRUSKI, F.F. 2009b. Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. In: PRUSKI, F.F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. atual. e ampl. Viçosa: Ed. UFV, p.40-73.

PRUSKI, F.F.; GRIEBELER, N.P.; SILVA, J.M.A.da; OLIVEIRA, J.R.S.de. 2009c. Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica em áreas agrícolas. In: PRUSKI, F.F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. atual. e ampl. Viçosa: Ed. UFV, p.13-23.

PRUSKI, F.F.; SILVA, J.M.A. da; CALIJURI, M.L.; BHERING, E.M. **Terraço for Windows**, versão 1.0. Viçosa: UFV - Departamento de Engenharia Agrícola, 1996. (1 disquete + manual do usuário).

PRUSKI, F.F.; VENDRAME, V.; OLIVEIRA, E.F.; BALBINO, L.C.; FERREIRA, P.A.; WERLANG, L.; CARVALHO, L.T. 1997. Infiltração de água num Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, n.1, p.77-84.

RAIFFA, H. 1970. **Decision Analysis: Introductory Lectures on Choices under Uncertainty**. Addison-Wesley, 2 ed. 309p.

RAMSER, C.E. 1917. **Prevention of erosion of farm lands by terracing**. Washington, D.C., USDA, 17. 23p. (Bulletin, 512).

RAMSER, C.E. 1924. **Terracing farm lands**. U.S. Washington, D.C.: Government Printing Office, Department of Agriculture (Farmer's Bulletin No 1386).

RAMSER, C.E. 1927. Runoff from small agricultural areas. **J. agric. Res.**, Washington, D.C., v. 34 (9), p. 797-823.

RAMSER, C.E. 1945. Development in terrace spacing. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, Mich., v.26, p. 285-288.

RAWLS, W.L.; DAVID, G.; van MULLEN, J.A.; WARD, T.J. 1996. Infiltration. In: ASCE. **Hidrology handbook**. 2. Ed. New York, p.75-124. (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 28).

REICHARDT, K. 1996. **Dinâmica da matéria e de energia em ecossistemas**. 2.ed. Piracicaba, SP: USP/ESALQ, 505p.

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

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; McCOOL, D.K; YODER, D.C. 1997. **Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. U.S. Department of Agriculture, 404p. (Agriculture Handbook No 703).

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. 1997. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 2.ed. Viçosa: NEPUT, 367p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.de; CORRÊA, G.F. 2007. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5 ed. rev. Lavras: Editora UFLA, 322p.

RIPOLI, T.C.C. 1996. Ensaio & certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar. In: MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba: FEALQ, p.635-673.

RIPOLI, T.C.C.; NERY, M.S.; DE LÉON, M.J.; PIEDADE, S.M.S. Desempenho operacional de uma colhedora em cana crua em função da velocidade de avanço. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.19, n.2, p.199-207, 1999.

RIPOLI, T.C.C.; NERY, M.S.; MOLINA Jr, W.F.; RIPOLI, M.L.C. Operational and economic performance of a green cane chopped harvester, in Brazil. In: ASAE INTERNATIONAL ANNUAL MEETING, 2001, Sacramento. **Proceedings...** St. Joseph: ASAE, p.718-726, 2001.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. 2009. **Biomassa da cana-de-açúcar**: colheita, energia e ambiente. 2.ed. Piracicaba: Os autores, 333p.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. 2006. **Plantio de cana-de-açúcar**: Estado da arte. Piracicaba: T.C.C.Ripoli. 216 p.

ROQUE, A.A. de O.; SOUZA, Z.M. de; BARBOSA, R.S.; SOUZA, G.S. de. 2010. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.7, p.744-750, jul. 2010.

ROUSSEVA, S.; TORRI, D.; PAGLIA, M. 2002. Effect of rain on the macroporosity at the soil surface. **European Journal of Soil Science**, v.53, p.83-94.

ROZEF, N. The effects of operating velocity on productivity in green and burned sugar cane. **Sugar Cane**, Texas, n.1, p.7-19, nov. 1999.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. 1995. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.2, p.313-319.

SCHUELLER, J.K. 1992. A review and integrating analysis of spatially-variable crop control of crop production. **Fertilizer Research**, The Hague, v.33, p.1-34.

SCHWAB, G.O. FREVERT, R.K.; EDMISTER, T.W.; BARNE, K.K.1966. **Soil and water conservation engineering**. 2 ed. New York: John-Wiley & Sons, 683p.

SEERUTTUN, S.; CROSSLEY, C.P. 1997. Use of digital terrain modelling for mechanical harvest of sugar cane in Mauritius. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.18, p.29-42.

SEGANFREDO, M.L.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R.de. 1997. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.287-291.

SERGIO, J.; COSTA, C.A.G.; TEIXEIRA, A.S.; ORTEGA, E. 2008. Aplicação da USLE e SIG na caracterização de três microbacias hidrográficas no Brasil. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, São José dos Pinhais, v.6, n.2, p.213-221.

SEYFRIED, M.S.; WILCOX, B.P. 1995. Scale and the nature of spatial variability: field examples having implications for hydrologic modeling. **Water Resources Research**, v.31, n.1, p.173-184.

SHAINBERG, I. LEVY, G.J. 1995. Infiltration and seal formation processes. In: **Soil erosion, conservation, and rehabilitation**. New York: Ed. M. Agassi, Marcel Dekker, Inc. p.1-22.

SHEAR, G.M. 1968. **The development of the no-tillage concept in the United States**. Outlook on Agriculture, Bracknell, Berks, v.5, n.6, p.247-251.

SIDIRAS, N.; DERPSCH, R.; MONDARDO, A. 1983. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo na variação da umidade e rendimento da soja, em Latossolo Roxo distrófico (Oxisol). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.103-106.

SILVA, A.M.; MELLO, C.R.; CURI, N.; OLIVEIRA, P.M. 2008. Simulação da variabilidade espacial da erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica de Latossolos no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.32, n.5, p.2.125-2.134.

SILVA, I.de F. da; CAMPOS FILHO, O.R; ANDRADE, A.P. de; COELHO, E.A.C; DINIZ, E.J. 1989. Influência do cultivo isolado e do consórcio sobre as perdas de solo e água numa terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p.111-115.

SINGH, V.P.; WOOLHISER, D.A. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.7 (4), p. 270–292.

SMEDEMA, L.K.; RYCROFT, D.W. 1983. **Land drainage**: Planning and desing of agricultural drainage systems. New York: Cornell University Press. 376p.

SMITH, H. F. 1938. An empirical law describing heterogeneity in fields of agriculture crops. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 28, p. 1-23.

SOJKA, R.E.; WESTERMANN, D.T.; BROWN, M.J.; MEEK, B.D. Zone-subsoiling effects on infiltration, runnof, erosion and yields of furrow-irrigated potatoes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdan, v.25, p.351-368, 1993.

SOROOSHIAN, S. 1991. Parameter estimation, model identification and model validation: conceptual-type models. In: BOWLES, D.S.; O'CONNELL, P.E. (Eds.). **Recent Advances in the Modelling of Hydrological Systems**. Kluwer Academic, p.443-467.

SOUSA, G.B.; MARTINS FILHO, M.V. ; MATIAS, S.S.R. 2012. Perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba - SP. **Engenharia Agrícola** (Impresso), v. 32, p. 490-500, 2012.

SOUZA, E.G.; JOHANN, J.A.; ROCHA, J.V.; RIBEIRO, S.R.A.; SILVA, M.S.; URIBEPAZO, M.A.; MOLIN, J P.; OLIVEIRA, E.F.; NOBREGA, L.H.P. 1999. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em um latossolo roxo distrófico da região de Cascavel - PR. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, n.3, p. 80-92.

SOUZA, Z.M. de; PRADO, R. de M.; PAIXÃO, A.C.S.; CESARIN, L.G. 2005. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.271-278.

SOUZA, Z.M.; MARTINS FILHO, M.V.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. 2005. Variabilidade de fatores de erosão em Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.105-114.

SPAROVECK, G.; MAULE, R.F. 2015. Controle do escoamento superficial difuso de água. In: BELARDO, G.deC.; CASSIA, M.T.; SILVA, R.P.da. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Editora SBEA, p. 129-148.

SPAROVEK, G. 1997. Informações geográficas para a identificação de áreas com potencialidade para colheita de cana crua. In: SEMANA DA CANA-DE-AÇÚCAR DE PIRACICABA, 2., Piracicaba, **Anais...** p.58-60.

SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. 2001. Soil tillage and precision agriculture: A theoretical case study for soil erosion control in Brazilian sugar cane production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.61, n.1-2, p.47-54.

STRAUSS, C.; CUGNASCA, C.E.; SARAIVA, A.M.; PAZ, S.M. 1998. The ISO11783 standard and its use in precision agriculture equipment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, 4., 1998, Minnesota, **Proceedings...** Minnesota: ASA; CSSA; SSSA, v.2, p.1253-1261.
Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de

TOMASINI, B.A; VITORINO, A.C.T.; GARBIATE, M.V.; SOUZA, C.M.A.de; SOBRINHO, T.A. 2010. Infiltração de água no solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de colheita e modelos de ajustes de equações de infiltração. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1060-1070, nov/dez.

TOMAZ, H.V. de Q. 2013. Sistema de preparo profundo do solo e sua influência no desenvolvimento de cana-de-açúcar. 2013, 132p. **Tese** (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

TORSEN M.; REFSGAARD, J.C; HANSEN, S.; PEBESMA, E.; JENSEN, J.B.; KLEESCHULTE, S. 2001. Assessment of uncertainty in simulation of nitrate leaching to aquifers at catchment scale. **Journal of Hydrology**, n. 242, p. 210-227.

TREIN, C.R.; LEVIEN, R.; SOUZA, L.F.C. 2005. Tráfego controlado: pneus e compactação. **Cultivar Máquinas**, v.41, p.22-25.

TRIMBLE, S.W. 1999. Decreased rates of aluvial sediment storage in the Coon Creek Basin, Wisconsin. **Science**, v.285, n.5431, p.1244-1246.

TRIMBLE, S.W.; CROSSON, P. U.S. 2000. Soil erosion rates – myth and reality. **Science**, v.289, n.5477, p.248-250.

TULLBERG, J.N. 1997. Tractor-based systems for traffic control in Australia. **Landwards**, v.52, p.12-15.
UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURAL – USDA. 1995. **Water erosion prediction project** – WEPP. West Laffayette (Technical documentation, NSERL, Report, n.10).

VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. 1992. Morphology genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**. v. 55, p. 225-245.

VASCONCELOS, A.C.M. 2002. **Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 140p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

VIEIRA, M.J. 1981. Propriedades físicas do solo. In: IAPAR. (Londrina, PR). **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina, p.19-32. (IAPAR. Circular, 23).

VIEIRA, M.J. 1985. Comportamento físico do solo em plantio direto. In: FANCELLI, A.L.; TORRADO, P.V.;

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. 1975. **A Hidrologia aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill, 245p.

WHEATER, H.S.; JAKEMAN, A.J.; BEVEN, K.J. 1993. Progress and directions in rainfall-runoff modelling. In: JAKEMAN, A.J.; BECK, M.B.; MCALEER, M.J. (Eds.). **Modelling Change in Environmental Systems**. John Wiley and Sons, Chichester, p.101-132.

WILENSKY, U. 1999. **NetLogo**. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Acesso em: 10 set. Disponível em: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

WILENSKY, U. 2006. NetLogo Grand Canyon model. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. Acesso em 10 set. Disponível em: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/GrandCanyon>.

WISCHMEIER, W.H. 1960. Cropping-management factor evaluations for a universal soil loss equation. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, Madison, Wisc. n.24, p.322-326.

WISCHMEIER, W.H. 1975. Estimating the soil loss equations cover and management factor for undisturbed areas. In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. Washington: **Agricultural Research**. p.118-124. (ARS-S-40).

WISCHMEIER, W.H.; MANNERING, J.W. 1969. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society of American Procedures**. Madison, Wisconsin, v.33, p.131-137.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1958. Rainfall energy and its relationships to soil loss. **Transaction, American Geophysical Union**, v.39, n.2, p.280-285.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1960. A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. In: INTERNATIONAL SOIL SCIENCE, 7., Madison Wisc. **Transactions**, p. 418-425.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1965. **Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains**. Washington, USDA, 47p. (Handbook, 282).

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1978. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 58p. (Agricultural Handbook, 537).

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

WU, L.; SWAN, J. B.; PAULSON, W. H.; RANDALL, G. W. 1992. Tillage effects on measured soil hydraulic properties. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.25, p.17- 23.

YODER, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **J. Amer. Soc. Agron.**, Madison, Wisconsin, v. 28, p.337-351.

YOUNG, I.M.; BENGOUGH, A.G.; MACKENZIE, C.J.; DICKSON, J.W. Differences in potato development (*Solanum tuberosum* cv. Maris Piper) in zero and conventional traffic treatments are related to soil physical conditions and radiation interception. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.26, p.341-359, 1993.

ZANDONADI, R.S. 2012. **Computational tools for improving route planning in agricultural field operations**. PhD. Thesis, University of Kentucky, Biosystems and Agricultural Engineering Department, 125p.

ZHANG L.; O'NEILL, A.L.; LACEY, S. 1996. Modelling approaches to the prediction of soil erosion in catchments. **Environmental Software**, v.11,p. 123–133.

ZHANG, L.; O'NEILL, A.; LACY, S. 1995. Spatial analysis of soil erosion in catchments: a review of modelling approaches. International Congress on Modelling and simulation (MODSIM95). **Water Resources and Ecology**, v.3, p.58–64.

ZINGG, A.W. 1940. An analysis of degree and length of slope data as applied to terracing. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, Mich., v.21, p.99-101.