Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço 15/03/96

Ass.:

Análise e Ajuste de Modelos Matemáticos para Perdas de Rendimento Causadas por Plantas Daninhas na Cultura de Milho

Claudia Regina Adati

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientadora: Profa. Dra. Vilma Alves de Oliveira

DEDALUS - Acervo - EESC

31100053712

EESC-USP Biblioteca Campus de S. Carlos

São Carlos

2005

Class. TESE
Cutt. 0118
Tombo T054/06
Sysno 1496252

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A221p

Adati, Claudia Regina
Análise e ajuste de modelos matemáticos para perdas de rendimento causadas por plantas daninhas na cultura do milho / Claudia Regina Adati. -- São Carlos, 2005.

Dissertação (Dissertação) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientadora: Profª. Drª. Vilma Alves de Oliveira.

1. Agricultura de precisão. 2. Modelos matemáticos. 3. Perdas de rendimento. 4. Milho (*zea mays*). 5. Plantas daninhas. 6. Competição. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Licenciada **CLÁUDIA REGINA ADATI**

Dissertação defendida e julgada em 08-12-2005 perante a Comissão Julgadora:

APROVADA

Profa. Titular **VILMA ALVES DE OLIVEIRA (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada

Dr. **DÉCIO KARAM**
(EMBRAPA/Sete Lagoas)

Aprovada

Prof. Dr. **DORIVAL LEÃO PINTO JUNIOR**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/USP)

Prof. Associado **HOMERO SCHIABEL**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico a minha família, que apesar de todas as nossas imperfeições, é o que há de mais importante para mim.

Agradecimentos

Devo o mérito que houver deste trabalho a muitas pessoas, e as falhas que existirem são todas minhas. Desculpo-me por aqueles que por ventura não constarem, nestes agradecimentos, pois foram muitos que colaboraram comigo de diversas formas. Creio que a realização de algo, tem a participação dos trabalhos anteriores a este e que desenvolveram o conhecimento de que se faz uso, e ainda a todos os auxílios recebidos de outros durante sua realização e finalização.

Meus agradecimentos são extensivos...

À Deus, pela vida, saúde, família e por guiar meus caminhos ....

À minha orientadora Dra Vilma Alves de Oliveira, que é uma das responsáveis por estar concluindo este trabalho. Ela acreditou em mim e concedeu-me uma oportunidade que será importante por toda minha vida. Foi através dela que pude acrescentar novos conhecimentos acrescentado mais senso crítico às informações recebidas e fornecidas.

À minha família, meus pais Carlos e Carmem, meus irmãos, Carla, Márcio, Kátia, Renato e Paulo; que foram muito importantes em minha formação e na aquisição das qualidades que tenho, e novamente os defeitos são de minha responsabilidade.

Ao meu querido Anibal, que esteve ao meu lado nas dificuldades científicas e da vida.

Aos meus sobrinhos Victória, Guilherme, Gabriel e Márcio, pela alegria que acrescentaram durante os dias deste trabalho.

À Embrapa Milho e Sorgo e ao Dr Décio Karam por tornar possível a realização do experimento.

Aos amigos Carlos, Glaucia, Hémerson e Fábio pelo auxílio científico e pelos almoços e jantares divertidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida.

À Universidade de São Paulo (EESC) por fornecer recursos necessários para a realização deste trabalho.

Todas as pessoas a seguir contribuíram de diversas formas, auxiliando na coleta de dados, nas discussões teóricas e de muitas outras maneiras: Marquinhos, Tânia, Geraldo, Alexandre, Valério, Paulo e Daniel.

Conteúdo

Lista de Figuras viii

Lista de Tabelas xiv

Resumo xviii

Abstract xix

1 Introdução 1

1.1 Impacto das Plantas Daninhas na Cultura 3

1.2 Justificativa do Trabalho 5

1.3 Objetivos do Trabalho 6

1.4 Organização do Trabalho 7

2 Revisão de Literatura 8

2.1 Modelos Matemáticos 9

2.1.1 Modelos Lineares de Perda de Rendimento 10

2.1.2 Modelos Não-Lineares de Perda de Rendimento 13

2.1.3 Dinâmica de Populações de Plantas Daninhas e Perda de Rendimento 34

2.1.4 Modelos de Perda de Rendimento e Heterogeneidade Espacial 44

2.2 Considerações sobre os Modelos de Perda de Rendimento 45

2.2.1 Aplicações dos Modelos de Perda de Rendimento 46

2.3 Discussão 54

3 Delineamento dos Experimentos 55

3.1 Coleta dos Dados 57

4 Resultados e Discussão 62

4.1 Dados Obtidos 62
4.2 Plantas Daninhas na Área Experimental 64
4.3 Análise dos Indicativos de Perda de Rendimento 64
4.3.1 Análise dos Dados dos Diâmetros dos Colmos das Plantas da Cultivar 66
4.3.2 Análise dos Dados de Alturas da Cultivar de Milho 68
4.4 Análises de Associações 70
4.4.1 Correlação entre a Densidade e a Biomassa de Plantas Daninhas 70
4.4.2 Correlação entre Cobertura Foliar e Produção de Sementes 74
4.4.3 Correlação entre Densidade e Produção de Sementes . . . 74
4.4.4 Correlação entre Biomassa e Produção de Sementes 75
4.5 Variáveis para o Ajuste de Modelo 75
4.5.1 Análises das Variáveis Independentes do Modelo 76
4.5.2 Análises da Variável Dependente do Modelo 78
4.6 Ajuste dos modelos 81
4.6.1 Modelos para Perdas de Rendimento e Densidade de Plantas Daninhas 83
4.6.2 Modelos para Perdas de Rendimento e Biomassa de Plantas Daninhas 91

5 Conclusões **94**
5.1 Propostas de Continuidade 98

A Estimação dos Parâmetros dos Modelos de Regressão **100**
A.1 Regressão Linear 100
A.1.1 Intervalos de Confiança 105
A.2 Regressão Não Linear 105
A.2.1 Métodos Numéricos 107
A.2.2 Intervalos de Confiança 113
A.2.3 Linearização dos Modelos de Perda de Rendimento 114

B Tabelas dos Dados Coletados no Campo Experimental **117**

C Conceitos Estatísticos **137**
C.1 Distribuição Normal 137

C.2 Análise Exploratória de Dados 138
C.3 Teste de Hipóteses 139
C.3.1 Teste de Correlação de Pearson 140
C.3.2 Teste de Igualdade das Variâncias: Teste F 141
C.3.3 Teste de Igualdade de Médias: Teste-t 141
C.3.4 Teste de Médias com Variâncias Conhecidas: Teste-Z . . . 142
C.3.5 Teste de Médias com Variâncias Desconhecidas 143
C.3.6 Teste de Kolmogorov-Smirnov 144
C.3.7 Teste de Significância dos Parâmetros 146

D Espécies Daninhas Encontradas na Área Experimental 148
D.1 Espécies de Folhas Largas 148
D.1.1 Botão-de-Ouro (*Melampodium perfoliatum*) 148
D.1.2 Caruru (*Amaranthus hybridus*) 148
D.1.3 Erva-de-Santa Luzia (*Euphorbia hirta L.*) 149
D.1.4 Erva-de-Touro (*Tridax procumbens* L.) 150
D.1.5 Erva-Quente (*Spermacoce latifolia*) 150
D.1.6 Leiteiro (*Euphorbia heterophylla*) 151
D.1.7 Mentrasto (*Ageratum conyzoides* L.) 152
D.1.8 Picão-Preto (*Bidens pilosa* L.) 152
D.1.9 Poaia (*Richardia brasiliensis*) 152
D.1.10 Trapoeraba (*Commelina benghalensis* L.) 154
D.2 Espécies de Folhas Estreitas 154
D.2.1 Braquiária (*Brachiaria decumbens*) 154
D.2.2 Capim-Colchão (*Digitaria ciliaris*) 154
D.2.3 Capim-Guiné (*Panicum maximum*) 155
D.2.4 Capim-Marmelada (*Brachiaria plantaginea*) 156
D.2.5 Capim Pé-de-Galinha (*Eleusine indica*) 156
D.2.6 Sorgo Selvagem (*Sorghum arundinaceum*). 157
D.2.7 Timbête (*Cenchrus echinatus* L.) 157
D.2.8 Tiririca (*Cyperus rotundus*) 157

E Condições Climáticas 159
E.1 Novembro - 2004 159

E.2 Dezembro - 2004 164
E.3 Janeiro - 2005 169
E.4 Fevereiro - 2005 174
E.5 Março - 2005 178
E.6 Abril - 2005 183

Bibliografia **187**

Lista de Figuras

Figura 1.1 Exemplo de cultura infestada: milho e plantas daninhas. . 4

Figura 2.1 Modelo linear para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas ($\beta_0' = 2569; \beta_1' = 18,01; R_0 = 3000$). 11

Figura 2.2 Modelo quadrático para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas ($R^2 = 0,84; \lambda_0' = 2867; \lambda_1' = -5371; \lambda_2' = 0,4846; R_0 = 3000$). 13

Figura 2.3 Modelo cúbico para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas ($\eta_1 = 2,73; \eta_2 = -0,0465; \eta_3 = 0,000289$). 14

Figura 2.4 Séries de substituição. 15

Figura 2.5 Séries aditivas. 16

Figura 2.6 Modelo hiperbólico para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas. . . . 18

Figura 2.7 Perda de rendimento em função da densidade de plantas daninhas com a época relativa de emergência entre plantas daninhas e cultura. A primeira curva (de cima para baixo) ilustra as perdas de rendimento para $T = -10$, isto é, para plantas daninhas emergindo dez dias antes da cultura. A curva intermediária ilustra as perdas de rendimento para $T = 0$, ou seja, para plantas daninhas e cultura emergindo ao mesmo tempo. A terceira curva (de cima para baixo) ilustra as perdas de rendimento para $T = 10$, isto é, para plantas da cultura emergindo dez dias antes das plantas daninhas. 21

Figura 2.8 Relações teóricas entre a perda de rendimento e a área foliar relativa de daninhas para valores distintos do parâmetro q no modelo (2.34). 27

Figura 2.9 Modelo sigmóide para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas. 32

Figura 2.10 Representação esquemática da dinâmica populacional de plantas daninhas. As linhas tracejadas indicam onde as plantas daninhas e a cultura interagem. 35

Figura 2.11 Representação do ciclo de vida de uma daninha anual. . . 37

Figura 2.12 Comportamentos da população descritos por (2.55). . . . 39

Figura 2.13 Trajetórias descritas pelo modelo (2.65) para diferentes níveis de controle com herbicidas. 42

Figura 2.14 Período crítico de controle com x denotando o somatório da temperatura (^oCd) e y a biomassa total da cultura (gm^{-2}). . . 49

Figura 3.1 Foto aérea do pivô experimental - Sete Lagoas, MG. . . . 55

Figura 3.2 Cobertura de uma parcela para que esta não sofra a ação do herbicida aplicado. 56

Figura 3.3 Distribuição das 41 parcelas experimentais pelo pivô. . . . 57

Figura 3.4 Quadro utilizado em campo para coletar amostras de plantas daninhas. 59

Figura 3.5 Instrumento para realizar a coleta de solo: trado. 60

Figura 4.1 Contagem de espécies de plantas daninhas nas parcelas. . 64

Figura 4.2 Número de plantas daninhas por parcela. 65

Figura 4.3 Gráfico de caixa dos diâmetros dos colmos das plantas do milho sob diferentes tratamentos: tratamento com utilização de hercidas (ch) e tratamento sem utilização de herbicidas (sh). . . . 67

Figura 4.4 Gráfico de caixa dos diâmetro dos colmos das plantas do milho sob diferentes tratamentos com remoção de valores atípicos. 68

Figura 4.5 Gráficos de caixas das alturas das plantas do milho sob diferentes tratamentos: com utilização de herbicidas (ch) e sem utilização de herbicidas (sh). 69

Figura 4.6 Gráficos de caixas das alturas das plantas do milho sob diferentes tratamentos com remoção dos valores atípicos. 70

Figura 4.7 Gráfico de dispersão dos valores da densidade e biomassa das plantas daninhas por espécie encontradas em cada parcela experimental (Situação 1). 71

Figura 4.8 Gráfico de dispersão dos valores dos somatórios da densidade e da biomassa das plantas daninhas em cada parcela experimental (Situação 2). 72

Figura 4.9 Análise de correlação entre densidade e biomassa para cada espécie daninha. 73

Figura 4.10 Gráfico de dispersão da produção de sementes e cobertura foliar de plantas daninhas. 74

Figura 4.11 Gráfico de dispersão da produção de sementes e cobertura foliar de plantas daninhas. 75

Figura 4.12 Gráfico de dispersão dos valores de densidade e produção de sementes. 76

Figura 4.13 Densidades e espécies de plantas daninhas. 77

Figura 4.14 Biomassa e espécies de plantas daninhas. 78

Figura 4.15 Densidade de plantas daninhas nas 38 parcelas experimentais. 79

Figura 4.16 Biomassa de plantas daninhas nas 38 parcelas experimentais. 79

Figura 4.17 Gráfico de médias de densidades de plantas daninhas por parcela. 80

Figura 4.18 Gráfico de médias de biomassas de plantas daninhas por parcela. 80

Figura 4.19 Gráfico de dispersão dos valores de perda de rendimento e densidade de plantas daninhas. 84

Figura 4.20 Gráfico de caixa para os valores de densidade de plantas daninhas. 84

Figura 4.21 Gráfico de caixas para os valores de perdas de rendimento. 85

Figura 4.22 Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.1) para a densidade de plantas daninhas. 87

Figura 4.23 Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.2) para a densidade de plantas daninhas. 88

Figura 4.24 Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.3) para a densidade de plantas daninhas. 88

Figura 4.25 Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.4) para a densidade de plantas daninhas. 89

Figura 4.26 Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.5) para a densidade de plantas daninhas. 89

Figura 4.27 Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.6) para a densidade de plantas daninhas. 90

Figura 4.28 Histograma e gráfico de normalidade dos resíduos padronizados do modelo (4.4). 90

Figura 4.29 Histograma e gráfico de normalidade dos resíduos padronizados do modelo (4.6). 91

Figura 4.30 Modelo hiperbólico para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas e valores observados. 92

Figura 4.31 Modelo sigmóide para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas e valores observados. 93

Figura 4.32 Gráfico de dispersão dos valores de perda de rendimento e biomassa de plantas daninhas. 93

Figura D.1 Botão de ouro (*Melampodium perfoliatum*). 149

Figura D.2 Caruru branco (*Amaranthus hybridus*). 149

Figura D.3 Erva-de-santa luzia (*Euphorbia hirta L.*). 150

Figura D.4 Erva de touro (*Tridax procumbens*). 150

Figura D.5 Erva quente (*Spermacoce latifolia*). 151

Figura D.6 Leiteiro (*Euphorbia heterophylla*). 151

Figura D.7 Mentrasto (*Ageratum conyzoides*). 152

Figura D.8 Picão preto (*Bidens pilosa*). 153

Figura D.9 Poaia (*Richardia brasiliensis*). 153

Figura D.10 Trapoeraba (*Commelina benghalensis*). 154

Figura D.11 Braquiária (*Brachiaria decumbens*). 155

Figura D.12 Capim colchão (*Digitaria ciliaris*). 155

Figura D.13 Capim guiné (*Panicum maximum*). 156

Figura D.14 Capim marmelada (*Brachiaria plantaginea*). 156

Figura D.15 Sorgo selvagem (*Sorghum arundinaceum*). 157

Figura D.16 Timbête (*Cenchrus echinatus L.*). 158

Figura D.17 Tiririca (*Cyperus rotundus*). 158

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Localização das 41 parcelas experimentais obtida por uso do GPS. 58

Tabela 4.1 Espécies de plantas daninhas encontradas nas parcelas experimentais do pivô. 62

Tabela 4.2 Resultados obtidos com o aplicativo R para a análise de correlação entre a densidade e a biomassa de plantas daninhas. . . 71

Tabela 4.3 Densidade e biomassa total por espécie. 77

Tabela 4.4 Resumo dos valores das variáveis. 81

Tabela 4.5 Resultados dos ajustes dos modelos para perdas de rendimento em função da densidade de plantas daninhas somente com remoção dos valores atípicos de perdas de rendimento. 86

Tabela 4.6 Continuação da Tabela 4.5. 86

Tabela 4.7 Resultados da análise de resíduos dos modelos (4.4) e (4.6). 87

Tabela B.1 Densidade de plantas por m^2 por espécies em cada parcela. 118

Tabela B.2 Densidade de plantas por m^2 por espécies em cada parcela (continuação). 119

Tabela B.3 Densidade de plantas por m^2 por espécies em cada parcela (continuação). 120

Tabela B.4 Densidade de plantas por m^2 por espécies em cada parcela (continuação). 121

Tabela B.5 Biomassa de plantas por m^2 para cada espécie daninha por parcela. 122

Tabela B.6 Biomassa de plantas por m^2 para cada espécie daninha por parcela (continuação). 123

Tabela B.7 Biomassa de plantas por m^2 para cada espécie daninha por parcela (continuação). 124

Tabela B.8 Biomassa de plantas por m^2 para cada espécie daninha por parcela (continuação). 125

Tabela B.9 Biomassa de plantas daninhas. 126

Tabela B.10 Cobertura vegetal 127

Tabela B.11 Densidade de sementes por espécies de plantas daninhas e densidade total de sementes em cada parcela. Espécie 1: trapoeraba, 2: mentrasto, 3: capim colchão, 4: brachiaria, 5: marmelada, 6: leiteiro, 7: picão preto, 8: sorgo, 9: caruru, 10: capim guiné, 11: santa luzia. 128

Tabela B.12 12: capim pé de galinha, 13: serralha, 14: timbete, 15: cordão de frade e Total de sementes (continuação). 129

Tabela B.13 Medição das alturas das plantas que não sofreram tratamento com herbicidas. 130

Tabela B.14 Medição das alturas das plantas que sofreram tratamento com herbicidas. 131

Tabela B.15 Medição dos diâmetros dos colmos das plantas que não sofreram tratamento com herbicidas. 132

Tabela B.16 Medição dos diâmetros dos colmos das plantas que sofreram tratamento com herbicidas. 133

Tabela B.17 Rendimento de grãos das parcelas que não sofreram tratamento com herbicidas. 134

Tabela B.18 Rendimento de grãos das parcelas que sofreram tratamento com herbicidas. 135

Tabela B.19 Perda de rendimento. 136

Tabela C.1 Valores críticos para a estatística do Teste de Kolmogorov-Smirnov (D_n). 145

Tabela E.1 Pressão. 160

Tabela E.2 Temperatura. 161

Tabela E.3 Vento. 162

Tabela E.4 Preciptação. 163

Tabela E.5 Pressão. 165

Tabela E.6 Temperatura. 166

Tabela E.7 Vento. 167

Tabela E.8 Preciptação. 168

Tabela E.9 Pressão. 170

Tabela E.10 Temperatura. 171

Tabela E.11 Vento. 172

Tabela E.12 Preciptação. 173

Tabela E.13 Pressão. 174

Tabela E.14 Temperatura. 175

Tabela E.15 Vento. 176

Tabela E.16 Preciptação. 177

Tabela E.17 Pressão. 179

Tabela E.18 Temperatura. 180

Tabela E.19 Vento. 181

Tabela E.20 Preciptação. 182

Tabela E.21 Pressão. 183

Tabela E.22 Temperatura. 184

Tabela E.23 Vento. 185

Tabela E.24 Preciptação. 186

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo analisar os modelos matemáticos existentes na literatura para descrever as perdas de rendimento ocasionadas por plantas daninhas considerando o seu ajuste matemático e a sua interpretação biológica bem como ajustar um modelo às perdas obtidas para a cultivar de milho BRS1030, cultivada em área com pivô central em sistema de plantio direto, localizada na área experimental da EMBRAPA Milho e Sorgo situada no município de Sete Lagoas, Minas Gerais. Os modelos adotados são lineares, hiperbólicos e sigmóides com variáveis independentes sendo a densidade e a biomassa de plantas daninhas. A escolha de modelos para os dados utilizados é feita com base na análise estatística de resíduos e na significância dos parâmetros. Em adição, diferentes análises de indicativos de perda de rendimento e associações entre densidade e biomassa, cobertura foliar e produção de sementes, densidade e produção de sementes e, biomassa e produção de sementes foram realizadas. Resultados obtidos com o aplicativo estatístico R para a cultivar de milho infestada por dezoito espécies daninhas são apresentados.

Palavras-chave: Modelos matemáticos, perdas de rendimento, milho (*Zea mays*), plantas daninhas, competição.

Abstract

The goal of this work is to present a review on the existing mathematical models used to describe the yield loss considering both their mathematical fit and their biological meaning as well as to adjust a model to the yield loss obtained with a corn cultivar BRS1030 grown in an experimental farm of the Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), located in Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. The considered models are the linear, hyperbolic and sigmoid model models with weed density and biomass as the independent variables. The choice of the model for the obtained data is accomplished by the statistical analysis of the errors and significance of the parameters. In addiction, analysis of the indicatives of yield loss e associations between weed density and biomass, weed coverage and weed seeds production, density and production of weed seeds and, biomass and production of weed seeds are performed. Results of a corn cultivar infested by eighteen weed species obtained with the statistical software R are presented.

Key Words: Mathematical models, yield loss, corn (zea mays), weed.

Capítulo 1

Introdução

Segundo Lorenzi (2000), plantas daninhas são vegetais que crescem onde não são desejados. As plantas daninhas existem desde a antiguidade. Não era feita a eliminação dessas plantas que cresciam junto com as plantas cultivadas, pois estas possuíam agressividade suficiente para sobreviverem sem sofrer grandes prejuízos decorrentes da competição. A habilidade de competição das plantas daninhas em relação às plantas da cultura, pode ser atribuída ao próprio homem, que com o intuito de melhorar as espécies úteis, retirou-lhes gradativamente a agressividade de sobreviverem sozinhas. Como resposta da natureza, as plantas silvestres tornaram-se cada vez mais eficientes quanto à sobrevivência, desenvolvendo alguns atributos ou mecanismos, tais como:

- agressividade competitiva (maior habilidade em relação às plantas cultivadas no aproveitamento dos elementos vitais disponíveis: luz, água, nutrientes e gás carbônico);
- grande produção de sementes (enquanto as plantas cultivadas não conseguem produzir mais que algumas dezenas de sementes por planta, uma espécie daninha pode produzir dezenas e centenas de milhares de sementes);
- facilidade de dispersão das sementes (as sementes de plantas daninhas possuem formas geométricas especiais que favorecem suas dispersões pelos

agentes do meio) e

- grande longevidade das sementes (enquanto as sementes das plantas cultivadas mantém a sua viabilidade germinativa durante apenas alguns meses no solo, as sementes das plantas daninhas possuem uma dormência temporária que pode durar anos, garantindo assim a perpetuação das espécies mesmo quando as condições do meio são desfavoráveis).

A classificação das plantas daninhas pode ser feita dependendo do interesse do estudo. A mais comum é a que se baseia na duração do seu **ciclo vital** que é mais indicada para fins de controle e/ou erradicação (Lorenzi, 2000):

- **Plantas anuais**: compreendem as plantas que germinam e completam o seu ciclo até a maturação das sementes dentro da mesma estação de crescimento (60 a 140 dias). São a maioria das plantas infestantes das grandes culturas;
- **Plantas bianuais**: são aquelas que germinam e crescem até a formação de folhas em roseta no primeiro ano completando o ciclo no próximo ano. Existem poucas espécies deste grupo num país tropical como o Brasil;
- **Plantas perenes**: são aquelas que vivem durante muitos anos, típicas de regiões muito frias ou muito secas.

Para efeito de controle químico, as plantas daninhas têm sido frequentemente classificadas como espécies de **"folhas largas"** e de **"folhas estreitas"** (Lorenzi, 2000). As plantas daninhas podem ainda ser classificadas de acordo com a textura em **"plantas herbáceas"**, **"plantas arbustivas"** e **"plantas arbóreas"**. Dependendo do meio em que vivem podem ser classificadas em **"plantas aquáticas"**, **"plantas terrestres"** e **"plantas parasíticas"**. As plantas parasíticas vivem sobre outras plantas extraindo destas seus elementos vitais (seiva elaborada) (Lorenzi, 2000).

As principais espécies daninhas presentes na cultura do milho são picão preto (*Bidens pilosa*), trapoeraba (*Commelina ssp*), timbête (*Cenchrus echinatus L*),

corda de viola (*Ipomoea spp*), leiteira (*Euphorbia heterophyla*) e capim marmelada (*Brachiaria plantaginea*) (Karam e da Cruz, 2004).

1.1 Impacto das Plantas Daninhas na Cultura

As culturas agrícolas estão sujeitas a fatores do ambiente que influenciam a produtividade. Dentre esses fatores é possível citar as influências climáticas, ou seja, os diferentes índices pluviométricos e as diferenças nas temperaturas (Hansen e Indeje, 2004); a fixação de nitrogênio pelas plantas (Peoples et al., 1995; Sinclair et al., 2002); interceptação de luz (Wiles e Wilkerson, 1991); ozônio (King, 1987); condições do solo e práticas de fertilidade; distribuição espacial da planta daninha com respeito a cultura (Berti e Sattin, 1996), espaçamentos das entrelinhas da cultura (Oliveira e Constantin, 2001), entre outros. Estes fatores influenciam o rendimento da cultura através da competição das populações de plantas. A competição é a disputa entre plantas por elementos vitais (luz, água, nutrientes, entre outros) com disponibilidade limitada. Não ocorre somente entre indivíduos de espécies distintas (competição interespecífica), mas também entre indivíduos da mesma espécie (competição intra-específica). A natureza da competição entre a cultura e as espécies daninhas pode alterar com as estações de crescimento: nos estádios iniciais de crescimento, a competição pode ser por água, nutriendes e em estádios mais tardios, a competição pode ser por luz e espaço. As condições climáticas e o tempo relativo de emergência também podem afetar a competição.

As plantas daninhas representam um sério problema para as culturas, podendo acarretar em perdas de rendimento significativas dependendo da espécie, da densidade, da distribuição em relação à cultura, entre outras. Estas constituem um sério problema para a agricultura por se desenvolver em condições semelhantes às das plantas cultivadas. Se as condições são propícias à cultura, também são para as espécies daninhas, mas, se as condições ambientais não são propícias às espécies cultivadas, as espécies daninhas, por apresentarem elevado grau de adaptação, podem sobreviver e se perpetuar muito mais facilmente (Lorenzi, 2000).

A Figura 1.1 ilustra uma cultura de milho infestada por plantas daninhas.

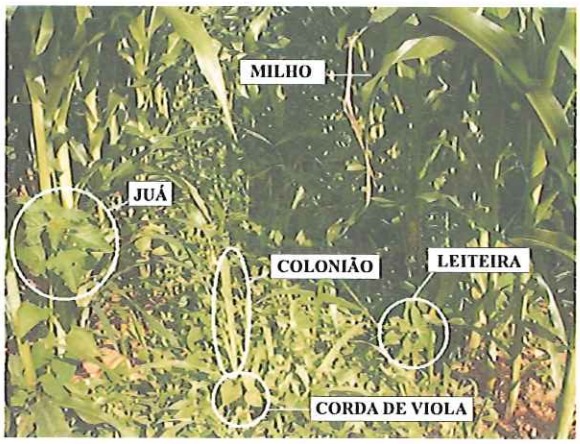

Figura 1.1: Exemplo de cultura infestada: milho e plantas daninhas.

Os efeitos negativos causados pela presença das plantas daninhas não devem ser atribuídos exclusivamente à competição, mas sim, a uma resultante total de condições ambientais, que podem ser diretas (competição, alelopatia, interferência na colheita e outras) e indiretas (hospedar insetos, doenças e outras). Esse efeito total denomina-se interferência. O grau de interferência imposto pelas plantas daninhas à cultura depende de fatores como a espécie de planta daninha presente, o nível de infestação, a espécie e variedade da cultura, a densidade e espaçamento da cultura, a duração da interferência, o nível dos elementos vitais disponíveis, entre outros (Stoller et al., 1987).

O grau de interferência entre populações de plantas, em pesquisas recentes, tem sido quantificado a partir de estimativas de perdas de rendimento da cultura (Park et al., 2003; Vitta e Quintanilla, 1996; Deen et al., 2003).

No presente trabalho a cultura pesquisada é o milho (*Zea mays*) infestado por diversas espécies daninhas, cuja área experimental é a Embrapa Milho e Sorgo, situada no município de Sete Lagoas, Minas Gerais

1.2 Justificativa do Trabalho

O agronegócio brasileiro vem se constituindo no principal suporte da economia, tanto na geração de renda como no resultado positivo da balança comercial. Segundo o Ministério da Agricultura, os fortes investimentos dos setores público e privado em tecnologia, insumos, máquinas, financiamento e logística movimentam um grande número de setores que, em conjunto, respondem por cerca de 37% do PIB e 44% das exportações (Domingos, 2004). Dessa forma, pode-se considerar que o setor de agronegócio é de grande relevância, necessitando de metodologias de controle avançadas, para melhorar a eficiência de operação e a qualidade dos produtos, que são propostas na agricultura de precisão.

Um dos interesses da agricultura de precisão é a perspectiva de aumento da produtividade e redução dos impactos ambientais causados pelo uso de herbicidas. A redução do uso de herbicidas minimiza os custos de produção, os impactos ambientais e ameniza o processo de seleção natural que torna as plantas daninhas cada vez mais resistentes. O Brasil é deficiente em ferramentas tecnológicas capazes de indicar a perda de rendimento que uma dada espécie daninha pode ocasionar em uma determinada cultura e o principal método de controle de plantas daninhas é a aplicação de herbicidas, o qual necessita de um procedimento de decisão que possa avaliar o potencial de perda de rendimento da cultura ocasionado pelas plantas daninhas (Lemieux et al., 2003).

Modelos matemáticos podem ser instrumentos úteis para entender, estimar e simular os impactos causados pela interferência das plantas daninhas em uma certa cultura. Se for possível estimar as perdas de rendimento com uma certa antecedência, será possível decidir se é viável ou não a aplicação de uma medida de controle. Assim, a estimação das perdas de rendimento pode ser útil para a escolha das estratégias de manejo das plantas daninhas na cultura, que podem contribuir para a racionalização do uso de herbicidas (Lotz et al., 1996). A estimativa das perdas de rendimento devido à presença de plantas daninhas possibilitaria, aos produtores, comparar o custo de controle com o valor de produção, caso as plantas daninhas não fossem controladas.

Há diversos modelos matemáticos empíricos de perda de rendimento na cultura presentes na literatura. Embora tenham sido desenvolvidos predominantemente em outros países, é possível ajustá-los e validá-los para as áreas brasileiras de cultivo, usando implementação de estratégias de controle de plantas daninhas.

Este trabalho insere-se no projeto multidisciplinar: "Desenvolvimento de Sistemas de Análise e Controle Integrados para Populações de Plantas", cujos integrantes são professores, pesquisadores, graduandos, pós -graduandos e pós-doutorandos ligados ao Departamento de Engenharia Elétrica/EESC/USP, Departamento de Ciência de Computação e Estatística/IBILCE/UNESP, Departamento de Engenharia Elétrica/ FEIS/ UNESP e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

1.3 Objetivos do Trabalho

O presente trabalho tem como objetivo, além de apresentar uma análise dos modelos matemáticos existentes, ajustar um modelo matemático para perdas de rendimento na cultivar de milho (BRS1030), ocasionada pela infestação de dezoito espécies daninhas presentes na área experimental. Os modelos matemáticos de perdas de rendimento adotados são lineares, hiperbólicos e sigmóides, cujas variáveis dependentes são a densidade e biomassa de plantas daninhas. É feita a escolha do modelo que apresenta o melhor ajuste e variável que melhor explica as perdas de rendimento com base na análise estatística dos resíduos e significância dos parâmetros. Análises de indicativos de perda de rendimento, como a interferência de plantas daninhas na espessura do diâmetro do colmo e altura da cultivar são feitas. Outras análises, como as de associação entre observações são também realizadas.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2, seguindo esta introdução, resume os principais modelos matemáticos para perdas de rendimento presentes na literatura. Apresentam-se também algumas aplicações desses modelos. No Capítulo 3, apresenta-se a descrição da área onde o experimento foi conduzido, bem como os procedimentos de coleta dos dados utilizados neste trabalho. No Capítulo 4, é feita análise dos dados, ajustes dos modelos e os resultados obtidos são comentados. No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas com a realização do trabalho e proposta de continuidade.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

A necessidade de explicitar a extensão e a percepção dos conhecimentos, explicar fenômenos e predizer comportamentos, levaram à construção de modelos matemáticos para permitir ao homem compreender o ambiente que o rodeia. À medida que vão surgindo dificuldades e deficiências nos modelos, vão surgindo outros modelos mais refinados ou completamente modificados. O objetivo de um modelo matemático é representar algumas das características observadas em um sistema real (Aguirre, 2000). O uso da matemática para testar as idéias e fazer predições sobre o mundo real tem sido vastamente explorado nas diversas áreas do conhecimento. O modelo matemático é, sem dúvida, o modelo mais barato e versátil para ser usado, uma vez que diferentes variações nas características e entradas de um sistema podem ser analisadas através do comportamento das respostas do modelo.

Um problema bastante discutido é a interferência de plantas daninhas nas culturas. As plantas daninhas acarretam reduções no rendimento das culturas agrícolas. Os modelos matemáticos de estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas podem ser instrumentos úteis à tomada de decisão de manejo. Se for possível estimar as perdas de rendimento com uma certa antecedência, será possível decidir se é viável ou não a aplicação de uma medida de controle, contribuindo para a racionalização do uso de herbicidas. Há na literatura vários modelos matemáticos empíricos utilizados para

estimar as perdas de rendimento devido às plantas daninhas. Estes são lineares e não lineares. Os não lineares possuem formas quadrática, cúbica, sigmóide e hiperbólica.

A dinâmica do banco de sementes também é considerada importante por vários autores, devendo ser avaliada para a tomada de decisão para o uso de herbicidas (Buhler et al., 1997; Canner et al., 2002; Wu, 2001; Fleck et al., 2003; Voll et al., 2004). Uma combinação eficaz dos modelos para predizer a perda de rendimento devido à infestação de plantas daninhas, as informações do banco de sementes e o uso de tecnologias apropriadas, podem ser essenciais para o desenvolvimento de sistemas de manejo avançados destas com reduzido uso de herbicidas (Lotz et al., 1994).

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão dos modelos matemáticos presentes na literatura utilizados para estimar as perdas de rendimento que as plantas daninhas acarretam na cultura, bem como a dinâmica do banco de sementes destas. São apresentadas, também, algumas considerações sobre estes modelos, como aplicações e métodos para obtenção das estimativas dos parâmetros.

2.1 Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos de perda de rendimento foram desenvolvidos para descrever e estimar os efeitos das plantas daninhas na cultura. Vários autores têm considerado os modelos de perda de rendimento como quantificadores da competição entre plantas devido a sua simplicidade e por possuir níveis aceitáveis de estimação (Cousens, 1985b; Kropff et al., 1992; Kropff e Laar, 1993; Florez et al., 1999; Murphy et al., 2002; Kim et al., 2002; Park et al., 2003; Deen et al., 2003).

O desenvolvimento de modelos para perda de rendimento tem sido um dos objetivos do estudo da competição entre populações de plantas. Este estudo de competição de populações de plantas (intra-específico e interespecífico), teve

início por volta de 1900 (Kropff e Laar, 1993).

Dentre os modelos matemáticos de perda de rendimento existentes na literatura, os mais utilizados atualmente são os hiperbólicos, que supõem que em baixas densidades de plantas a competição inter específica é máxima. Outro modelo também utilizado, embora pareça ter um menor nível de aceitação conforme resultados de experimentos realizados (Ngouajio et al., 1999; Florez et al., 1999), é o sigmóide. Este modelo supõe que existe uma certa densidade de daninhas abaixo da qual não existe competição. Uma interpretação aceita na atualidade, é que o modelo sigmóide é incapaz de detectar minúcias estatisticamente significantes quando as densidades de plantas são muito baixas. O modelo que melhor explica as perdas de rendimento dependerá do conjunto de dados disponível.

2.1.1 Modelos Lineares de Perda de Rendimento

Há modelos lineares propostos na literatura para representar a perda de rendimento que a planta daninha acarreta na cultura (Chemale e Fleck, 1982; Cousens, 1985b; Bauer e Mortensen, 1992; Harvey, 1997; González-Andújar et al., 2001). Um modelo linear afim para o rendimento é representado por (Chemale e Fleck, 1982)

$$R = \beta_0 + \beta_1 D_d \tag{2.1}$$

onde R é o rendimento da cultura, D_d representa os valores de densidades de plantas daninhas (variável independente do modelo), β_0 e β_1 são parâmetros do modelo. Em termos de perda de rendimento, o modelo (2.1) torna-se

$$P_r(D_d) = 1 - \left(\frac{R}{R_o}\right) = \beta_0' + \beta_1' D_d \tag{2.2}$$

onde P_r é a perda de rendimento, R_0 é o rendimento máximo da cultura, ou seja, o rendimento máximo da cultura livre de infestação por plantas daninhas, β_0' e β_1' são parâmetros do modelo. Segundo Chemale e Fleck (1982), o melhor ajuste

do modelo linear afim aos dados de cultivares de soja infestada por *Euphorbia heterophylla* (leiteira) está ilustrado na Figura 2.1.

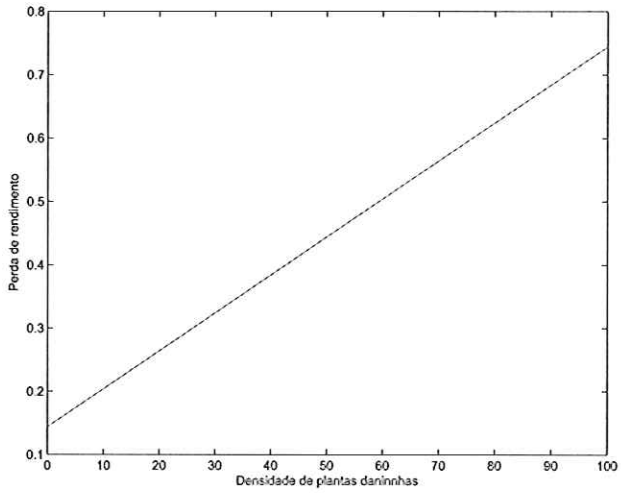

Figura 2.1: Modelo linear para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas ($\beta_0' = 2569; \beta_1' = 18,01; R_0 = 3000$).

O modelo linear sugerido por Cousens (1985b) para representar a estimativa da perda de rendimento na cultura no início da interferência por plantas daninhas é dado por

$$P_r(D_d) = aD_d \tag{2.3}$$

onde a é um parâmetro do modelo que indica a perda de rendimento da cultura quando a densidade de plantas daninhas tende a zero e D_d como definido anteriormente. Diferindo do modelo (2.2), neste modelo, quando houver ausência de plantas daninhas, a perda de rendimento devido a estas será nula.

Bauer e Mortensen (1992) consideraram que para estimar as perdas de rendimento em função da aplicação do herbicida, o modelo (2.3) pode ser alterado para

$$P_r(D_d) = aD_d(1 - \epsilon_h) \tag{2.4}$$

onde ϵ_h é a eficácia do herbicida ($0 \leq \epsilon_h \leq 1$).

Em Harvey (1997) foi apresentado o seguinte modelo linear para estimar as perdas de rendimento causadas por diferentes níveis de infestação de plantas daninhas

$$P_r(Z) = kZ \tag{2.5}$$

onde k é um parâmetro, Z é uma estimativa da porcentagem de plantas daninhas na cultura, com $0 \leq Z \leq 100$, sendo que o valor zero representa a ausência de plantas daninhas e o valor 100 representa a ausência de plantas da cultura. O valor 100 representa infestação total da área.

Outro modelo linear para a estimativa de perda de rendimento em termos da severidade de infestação foi proposto por González-Andújar et al. (2001). A estimativa de perda de rendimento devido às plantas daninhas é dada por

$$P_r(I_s) = 100 I_s u \tag{2.6}$$

onde I_s representa a severidade da infestação por plantas daninhas e I_s foi estabelecido por González-Andújar et al. (2001) em três intervalos: $Is = 0$, $0 < Is < 1$ ou $Is = 1$, sendo que $Is = 1$ representa a densidade de plantas daninhas que atinge o nível de dano econômico e u é um parâmetro que indica o valor para o nível de dano econômico. González-Andújar et al. (2001) consideraram $u = 0,124$. Desta forma, para valores de perda acima de $12,4\%$, algum método de controle deveria ser providenciado.

Os modelos não lineares descritos na literatura possuem formas quadrática, cúbica, sigmóide e hiperbólica e são detalhados a seguir.

2.1.2 Modelos Não-Lineares de Perda de Rendimento

Modelo Quadrático

Em Chemale e Fleck (1982) o modelo quadrático é ajustado para estimar o rendimento na cultura. O modelo quadrático é representado por

$$R = \lambda_0 + \lambda_1 D_d + \lambda_2 D_d^2 \tag{2.7}$$

onde λ_0, λ_1 e λ_2 são parâmetros e, D_d e R já foram definidos anteriormente. Reescrevendo (2.7) em termos de perda de rendimento, obtém-se

$$P_r(\lambda) = 1 - \left(\frac{R}{R_o}\right) = \lambda_0' + \lambda_1' D_d + \lambda_2' D_d^2. \tag{2.8}$$

Segundo Chemale e Fleck (1982), o modelo (2.8) se ajusta melhor aos dados experimentais do que o modelo linear afim (2.1), pois com o aumento da população de plantas daninhas inicia-se a competição intra-específica. A perda de rendimento, de acordo com o modelo (2.8), está representada na Figura 2.2.

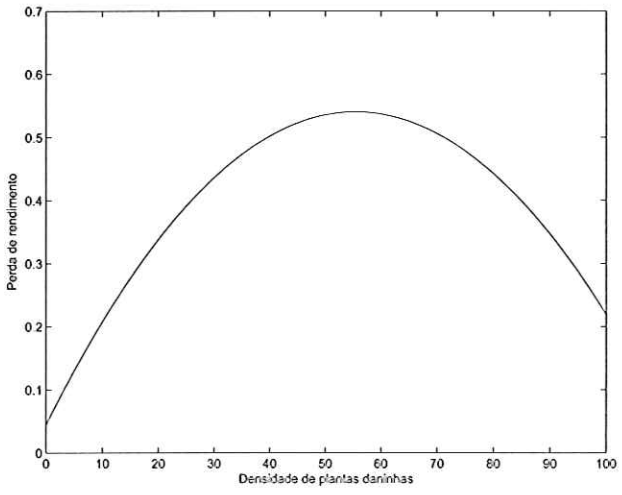

Figura 2.2: Modelo quadrático para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas ($R^2 = 0,84; \lambda_0' = 2867; \lambda_1' = -5371; \lambda_2' = 0,4846; R_0 = 3000$).

Modelo Cúbico

O modelo polinomial não linear nas variáveis para estimativa de perda de rendimento ajustado por Harvey (1997) possui a forma cúbica como segue

$$P_r(\eta) = \eta_1 Z + \eta_2 Z^2 + \eta_3 Z^3 \tag{2.9}$$

onde η_1, η_2 e η_3 são coeficientes e Z já foi definido anteriormente. O modelo cúbico ajustado por Harvey (1997) está ilustrado na Figura 2.3.

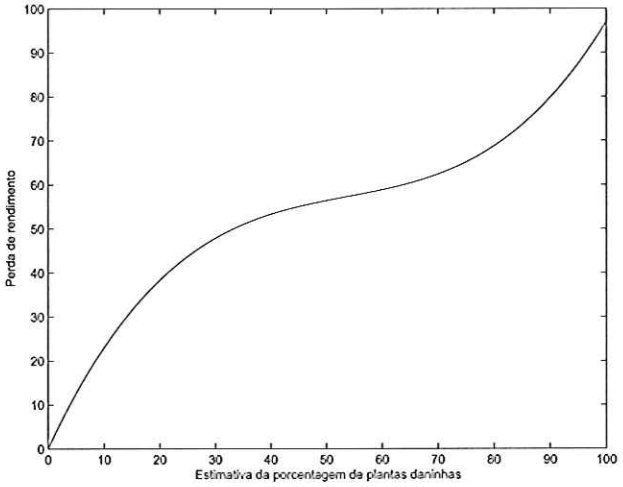

Figura 2.3: Modelo cúbico para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas ($\eta_1 = 2,73; \eta_2 = -0,0465; \eta_3 = 0,000289$).

Modelos Hiperbólicos

É apresentado a seguir um breve histórico sobre os modelos hiperbólicos relacionados com diferentes variáveis independentes.

Origem dos Modelos Hiperbólicos

O ponto de partida para o desenvolvimento do modelo hiperbólico para o rendimento da cultura em função da densidade de plantas daninhas foi a hipérbole descrita por De Wit (Apud Kropff e Laar (1993)). De Wit começou a analisar a

competição de plantas em monoculturas em termos de rendimento descrito pelo modelo hiperbólico

$$R_0 = \frac{D_c}{u_{c0} + u_{cc}D_c} \tag{2.10}$$

onde R_0 é o rendimento da cultura em monocultura (gramas m^{-2}), D_c é a densidade da cultura (plantas m^{-2}), u_0 é o intercepto e u_c é a declividade da curva.

A análise da competição em composições baseada no modelo hiperbólico também foi introduzida por De Wit (Apud Kropff e Laar (1993)) que apresentou equações utilizando um modelo experimental denominado séries de substituição. Esse modelo experimental considera que as proporções relativas dos componentes de uma mistura são variados, mas, a densidade total é mantida constante. As Figuras 2.4 e 2.5 representam os modelos experimentais para séries de substituição e aditivas, respectivamente.

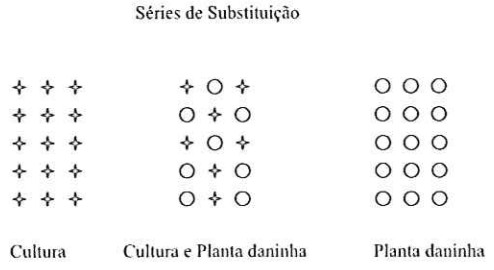

Figura 2.4: Séries de substituição.

Na ciência das plantas daninhas, as séries de substituição não são reais. Assim, surge um novo modelo experimental denominado séries aditivas, onde as plantas daninhas são adicionadas na densidade da cultura.

O modelo experimental de séries de substituição foi utilizado por Spitters (1983) para o desenvolvimento do modelo hiperbólico, que tornou-se

$$R_{cd} = \frac{D_c}{u_{c0} + u_{cc}D_c + u_{cd}D_d} \tag{2.11}$$

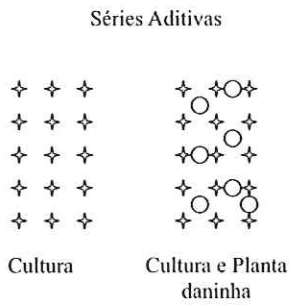

Figura 2.5: Séries aditivas.

onde R_{cd} é o rendimento da cultura na presença de planta daninha, D_d e D_c são as densidades da planta daninha e da cultura, respectivamente, u_{c0} é uma medida da competição intra-específica entre as plantas da cultura (sem adição de novas plantas), u_{cc} é uma medida da competição intra-específica (plantas da cultura) e u_{cd} é uma medida da competição interspecífica entre as espécies. Para o rendimento da planta daninha adicionada à cultura, o modelo hiperbólico torna-se

$$R_{dc} = \frac{D_d}{u_{d0} + u_{dd}D_d + u_{dc}D_c} \tag{2.12}$$

onde u_{d0} é uma medida da competição intra-específica entre as plantas daninhas (sem adição de novas plantas), u_{dd} é uma medida da competição intra-específica (plantas daninhas) e u_{dc} é a medida da competição interespecífica das espécies.

Supondo que a cultura está crescendo com uma densidade fixa e simplificando as situações representadas em (2.11) e (2.12), obtém-se respectivamente

$$R_0 = \frac{1}{a_0} \tag{2.13}$$

e

$$R_{cd} = \frac{1}{a_0 + u_{cd}D_d} \tag{2.14}$$

onde $a_0 = u_{c0} + u_{cc}D_c$. Então, o rendimento relativo de uma cultura na presença

de plantas daninhas pode ser expresso por (Spitters, 1983)

$$\frac{R_{cd}}{R_0} = \frac{a_0}{a_0 + u_{cd}D_d} = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_{cd}}{a_0}\right) D_d}. \tag{2.15}$$

Perda de Rendimento e Densidade de Plantas Daninhas

Em termos de perda de rendimento da cultura o modelo (2.15) pode ser expresso por

$$P_r = 1 - \left(\frac{R_{cd}}{R_0}\right) = 1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{u_{cd}}{a_0} D_d}\right) = \frac{aD_d}{1 + aD_d} \tag{2.16}$$

onde $a = \frac{u_{cd}}{a_0}$ descreve a perda de rendimento sob baixas densidades de plantas daninhas .

A perda de rendimento da cultura causada por múltiplas espécies de plantas daninhas pode ser quantificada a partir do modelo (2.16), o qual é modificado para (Spitters, 1983)

$$P_r = \frac{a_1 D_{d1} + a_2 D_{d2} + ...a_n D_{dn}}{1 + (a_1 D_{d1} + a_2 D_{d2} + ...a_n D_{dn})} \tag{2.17}$$

para distintas espécies daninhas de um até n.

Como visto anteriormente, segundo Cousens (1985b), em baixas densidades de plantas daninhas, a perda de rendimento se aproxima de uma relação linear que representa o efeito da competitividade das plantas daninhas e pode ser representado por (2.3). Incorporando o fato de que o efeito de cada planta daninha irá decrescer com o aumento da densidade no modelo (2.3), a relação linear foi dividida, obtendo-se assim a forma hiperbólica para a perda de rendimento da cultura (Spitters, 1983). Para o desenvolvimento do modelo (2.16), Cousens (1985b) introduziu um outro parâmetro, denotado b, para limitar a perda de rendimento, obtendo assim o seguinte modelo hiperbólico de perda de rendimento em função da densidade de plantas daninhas

$$P_r(D_d) = \frac{aD_d}{1 + \left(\frac{a}{b}\right) D_d} \tag{2.18}$$

onde P_r é a perda de rendimento para cada valor de D_d, D_d é a densidade de plantas daninhas (plantas m^{-2}), a é o parâmetro que representa a perda de rendimento causada a cada adição de uma planta daninha por m^2 (baixas densidades de plantas daninhas) e b é o parâmetro que indica a perda de rendimento quando a densidade de plantas daninhas tende ao infinito (altas densidades de plantas daninhas). Assim, o limite de Pr quando $D_d \to \infty$ é b, ou seja:

$$lim_{D_d \to \infty} P_r = \frac{aD_d}{1 + \left(\frac{a}{b}\right) D_d} = \frac{aD_d}{D_d \left(\frac{1}{D_d} + \frac{a}{b}\right)} = \frac{a}{\frac{a}{b}} = b. \tag{2.19}$$

Os parâmetros a e b são ambos influenciados por outras variáveis tais como a densidade da cultura, o tempo relativo de emergência entre plantas daninhas e cultura, o tipo de solo, entre outras. Os valores destes parâmetros podem portanto, ser usados para comparar a competitividade entre cultura e plantas daninhas em experimentos sob diferentes condições (Cousens, 1985a). A Figura 2.6 ilustra a perda de rendimento para o modelo hiperbólico.

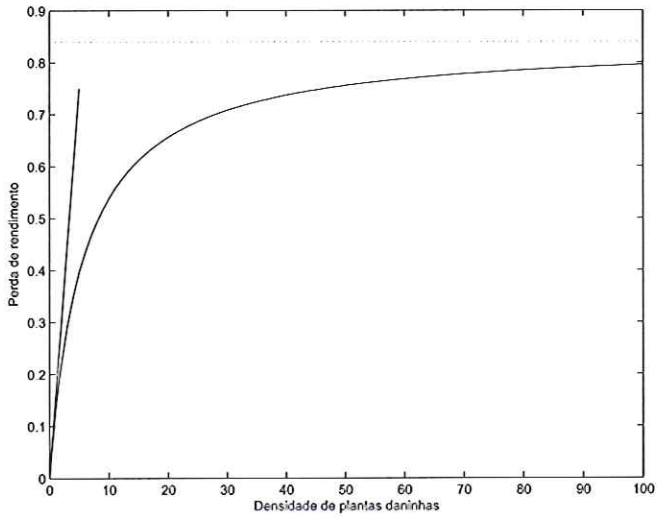

Figura 2.6: Modelo hiperbólico para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas.

Uma explicação biológica para a representação matemática do modelo hiperbólico (2.18), é que em densidades baixas, o efeito provocado pelo aumento da

densidade é aditivo. Isso ocorre porque as áreas de influência de plantas individuais não chegam a se sobrepor. Em densidades altas, o efeito da competição decorrente de cada unidade de planta que é adicionada à cultura diminui. Isso ocorre porque as áreas de influência já começam a se sobrepor e, como consequência desse aumento na intensidade da competição intra-específica, as perdas no rendimento tendem a se estabilizar.

A equação (2.18) pode ser reescrita em termos de $s = \frac{a}{b}$ como

$$P_r(D_d) = \frac{aD_d}{1 + sD_d} \tag{2.20}$$

onde a relação $s = \frac{a}{b}$ reflete o grau de competição intra-específica das espécies de plantas daninhas, sendo que s é um parâmetro de forma refletindo a taxa de aproximação do limite e b é um parâmetro de escala refletindo a perda máxima de rendimento possível para uma dada espécie daninha e cultura sob condições ambientais particulares (Cousens, 1985a).

A taxa de aumento da perda de rendimento com o aumento da densidade pode ser obtida através da derivada de P_r em função de D_d (Cousens, 1985b)

$$\frac{\partial P_r}{\partial D_d} = bs(1 + sD_d)^{-1} - bs^2 D_d(1 + sD_d)^{-2} = \frac{1}{bs}\left(\frac{P_r}{D_d}\right)^2. \tag{2.21}$$

A taxa de aumento da perda de rendimento é maior em baixas densidades de plantas daninhas (Stoller et al., 1987).

O modelo de perda de rendimento em função da densidade de plantas daninhas, considera a densidade da cultura como sendo fixa. Para considerar as variações na densidade da cultura, Cousens (1985a) desenvolveu um modelo onde esta variável está inclusa.

Perda de Rendimento e Densidades de Plantas Daninhas e Cultura

Em Cousens (1985a), o modelo de perda de rendimento em função da densidade de plantas daninhas foi estendido para incluir a densidade da cultura como uma

variável adicional. Intuitivamente, o parâmetro a do modelo (2.18) decresce com o aumento da densidade da cultura. Assim, para descrever este comportamento, o parâmetro a foi modificado para

$$a = \frac{v_1}{1 + v_2 D_c} \tag{2.22}$$

onde D_c é a densidade da cultura, v_1 e v_2 são parâmetros adicionais. Dessa forma, substituindo a dado em (2.22) em (2.18), obtém-se

$$Pr(D_d, D_c) = \frac{v_1 D_d}{1 + v_2 D_c + \left(\frac{v_1}{b}\right) D_d}. \tag{2.23}$$

A utilização do modelo (2.23) nem sempre é viável, pois o aumento no número de parâmetros pode aumentar os erros de estimação. Os modelos foram avaliados utilizando um conjunto de dados da cultura de trigo infestada por cevada. Segundo Cousens (1985a), o modelo hiperbólico (2.18) proposto foi o que descreveu melhor os dados quando comparado com outros modelos presentes na literatura.

Uma crítica ao modelo (2.18), é que este não considera o tempo de emergência de plantas daninhas que influencia muito nas perdas de rendimento da cultura (Lotz et al., 1994). Nesse sentido, os parâmetros do modelo podem alterar quando os valores do tempo de emergência de plantas daninhas diferem. Por essa razão, Cousens et al. (1987) introduziram uma variável adicional no modelo hiperbólico para quantificar os diferentes tempos relativos de emergência, como descrito a seguir.

Perda de Rendimento Versus Densidade de Plantas Daninhas e Época Relativa de Emergência

Para descreverem a relação entre a densidade da população e a época relativa de emergência das plantas daninhas Cousens et al. (1987) sugeriram o seguinte modelo

$$P_r(D_d) = \frac{aD_d}{e^{cT} + \left(\frac{a}{b}\right) D_d} \tag{2.24}$$

onde T é o tempo relativo de emergência entre plantas daninhas e cultura, sendo que T assume valores negativos ($T < 0$) se as plantas daninhas emergirem primeiro e valores positivos ($T > 0$) se as plantas da cultura emergirem primeiro, a, b e c são parâmetros, sendo que o parâmetro c representa a taxa de variação na competitividade de plantas daninhas dependendo do tempo que estas emergem. A Figura 2.7 ilustra o comportamento das perdas de rendimento em função de distintos tempos relativos de emergência entre plantas daninhas e da cultura.

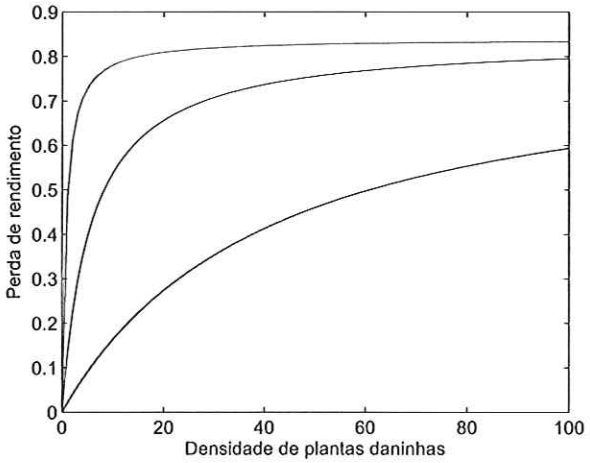

Figura 2.7: Perda de rendimento em função da densidade de plantas daninhas com a época relativa de emergência entre plantas daninhas e cultura. A primeira curva (de cima para baixo) ilustra as perdas de rendimento para $T = -10$, isto é, para plantas daninhas emergindo dez dias antes da cultura. A curva intermediária ilustra as perdas de rendimento para $T = 0$, ou seja, para plantas daninhas e cultura emergindo ao mesmo tempo. A terceira curva (de cima para baixo) ilustra as perdas de rendimento para $T = 10$, isto é, para plantas da cultura emergindo dez dias antes das plantas daninhas.

Para valores de T negativos, as perdas de rendimento são maiores, indicando que quanto antes emergirem as plantas daninhas em relação à emergência da cultura, maiores serão os valores das perdas de rendimentos.

O modelo de Cousens et al. (1987) permitiu a inclusão da época de emergência das plantas daninhas, melhorando assim o modelo de perda de rendimento.

Porém, para que seu uso seja possível, são necessários dados precisos de época de emergência das plantas daninhas, em relação ao estágio de desenvolvimento da cultura. A obtenção desses dados é difícil ou até impossível, pois as plantas daninhas costumam emergir em fluxos distintos e sucessivos. Para superar a limitação em (2.24), Rizzardi et al. (2003b) alteraram o significado da constante T que passa a ser a época de semeadura da cultura em relação à data da dessecação da cobertura vegetal preexistente na área e (2.24) pode ser reescrito como

$$P_r(D_d) = \frac{aD_d}{e^{-cT} + \frac{a}{b}D_d} \tag{2.25}$$

onde T é expresso em unidades calóricas e pode ser calculada de acordo com

$$T = \left[\frac{(t_{max} + t_{min})}{2} - t_b\right] \tag{2.26}$$

onde t_{max} é a temperatura diária máxima do ar, t_{min} é a temperatura mínima do ar e t_b é a temperatura base (temperatura mínima pela qual a cultura cessa seu crescimento).

O ajuste de Rizzardi et al. (2003b) para a cultura de soja infestada por picão-preto (*Bidens spp*) e guanxuma (*Sida rhombifolia L.*) proporcionou uma solução para a quantificação de T, mas sua utilização está relacionada com uma dessecação vegetal preexistente na área de cultivo, o que nem sempre é uma prática adotada pelos agricultores.

A variável densidade pode ser quantificada através da contagem do número de plantas por m^2, entretanto a dificuldade em considerar esta variável no modelo está relacionada com as diferentes alturas das plantas. Uma possível solução para este problema, seria considerar a biomassa das plantas (gramas m^{-2}) ao invés da densidade.

Perda de Rendimento e Biomassa de Plantas Daninhas

A biomassa é a quantidade de matéria viva em forma de uma ou mais espécies de organismos, presentes em um determinado habitat, comumente expressa como massa de um organismo por unidade de área do habitat. Segundo Kim et al. (2002), a biomassa de plantas daninhas depende principalmente da fertilidade do solo, temperatura e condições ambientais.

O modelo de perda de rendimento em função da biomassa de plantas daninhas pode ser representado pelo modelo (2.18), substituindo a densidade de plantas daninhas pela biomassa de plantas daninhas como segue

$$P_r(B) = \frac{aB}{1 + \left(\frac{a}{b}\right) B} \tag{2.27}$$

onde B é a biomassa de plantas daninhas (unidade de massa em m^2). A biomassa de daninhas pode ser medida através da medida da massa da matéria seca (obtida com a secagem da matéria). O inconveniente da utilização da matéria seca é que se as medições forem feitas em estágios tardios de crescimento da planta daninha a biomassa não pode ser considerada constante. Se a densidade for medida em estágios recentes ou tardios de crescimento da cultura, esta pode ser considerada praticamente constante por não existir alterações significativas no número de plantas. Assim, uma forma de solucionar este problema é realizar um estudo nas curvas de crescimento de plantas daninhas para inferir valores de biomassa para o início da interferência.

Segundo Erasmo et al. (2003) a maior taxa de acúmulo de matéria seca dos componentes vegetativos da planta daninha *Murdannia nudiflora* está compreendida entre 10 e 80 dias após a emergência destas, sendo que ocorreu aumento de matéria seca até os 110 dias . Assim, segundo este autor, aos 110 dias as perdas de rendimento causadas pelas plantas daninhas tendem a se estabilizar.

O modelo matemático ajustado para explicar o acúmulo de matéria seca ao longo do ciclo de vida da planta daninha *Murdannia nudiflora* que apresentou

melhor ajuste é descrito por (Erasmo et al., 2003)

$$M_s(D_{ae}) = -1,7241 + 0,2059D_{ae} - 0,0011D_{ae}^2 \tag{2.28}$$

onde M_s é a matéria seca (em mg) e D_{ae} representa os dias após a emrgência da planta.

Para Pedrinho et al. (2004) os pontos de máximo acúmulo de matéria seca da planta daninha poaia branca (*Richardia brasiliensis*) varia entre 138 e 147 dias após a emergência da planta daninha. Os pontos de inflexão ficaram em torno de 106 e 111 dias após a emergência. O acúmulo máximo de massa seca se deu aos 146 dias com o valor teórico de 17 gramas por planta. A curva de acúmulo de massa seca total para a poaia branca é dada por (Pedrinho et al., 2004)

$$M_s = -4,43068 + 0,201D_{ae} + 0,0003548D_{ae}^2. \tag{2.29}$$

As curvas de crescimento presentes na literatura para as espécies daninhas citadas podem ser influenciadas por diversos fatores, tais como alterações no clima, solo, interferência de outras espécies daninhas presentes, etc.

Perda de Rendimento e Área Foliar Relativa de Plantas Daninhas

Para superar algumas limitações impostas pelo modelo de densidade, Kropff e Spitters (1991) propuseram um modelo baseado na observação da área foliar relativa de plantas daninhas. Também, sugeriram que a área foliar relativa pode refletir tanto diferenças de densidade quanto de época de emergência das plantas daninhas. Assim, introduziram um modelo empírico que relaciona as perdas de rendimento com a área foliar de plantas daninhas em relação à área foliar da cultura.

A importância da área foliar de uma cultura é amplamente conhecida por ser um indicativo de produtividade, pois o processo fotossintético depende da interceptação de energia luminosa pelas folhas.

A quantificação desta variável pode ser feita eletronicamente (Rizzardi et al., 2003a; Bianco et al., 2003). Uma estimativa da área foliar, denotada E_{AF}, elaborada por Bianco et al. (2003) é dada por

$$E_{AF} = \rho(C_{fm}L) \tag{2.30}$$

onde ρ é um parâmetro, C_{fm} é comprimento máximo e L é a largura máxima da folha.

A estimativa da perda de rendimento em função da área foliar relativa, proposto por Kropff e Spitters (1991) em termos do índice de área foliar, denotado I_{AF}, de plantas daninhas e cultura é dada por

$$P_r(I_{AFd}, I_{AFc}) = \frac{\left(q\frac{I_{AFd}}{I_{AFc}}\right)}{\left(1 + q\frac{I_{AFd}}{I_{AFc}}\right)} \tag{2.31}$$

onde I_{AFd} é o índice de área foliar das plantas daninhas e I_{AFc} é o índice de área foliar ocupada pela cultura. A estimativa de I_{AF} é dada por

$$I_{AF} = DA_F \tag{2.32}$$

onde A_F é a média da área foliar por planta e D é a densidade de plantas.

Em geral, a variação temporal do índice de área foliar aumenta até um máximo, onde permanece por algum tempo, decrescendo em seguida, devido à senescência das folhas velhas. Como a fotossíntese depende da área foliar, o rendimento da cultura será maior quanto mais rápido a planta atingir o índice de área foliar máximo e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa.

Entretanto, um parâmetro que pode ser mais fácil estimar do que a relação entre os índices de área foliar é a área foliar relativa de plantas daninhas denotado A_{Frd}

$$A_{Frd} = \frac{A_{Fd}}{A_{Fd} + A_{Fc}} \tag{2.33}$$

onde A_{Fd} é a área foliar de plantas daninhas e A_{Fc} é a área foliar da cultura (área

da superfície da folha da planta). Assim, (2.31) pode ser reformulado para expressar a perda de rendimento da cultura em função da área relativa de daninhas

$$P_r(A_{Frd}) = \frac{qA_{Frd}}{1 + (q-1)A_{Frd}} \tag{2.34}$$

onde q é o coeficiente de dano relativo (parâmetro do modelo).

O modelo (2.34) relaciona a perda de rendimento da cultura com a área foliar das plantas daninhas em relação à da própria cultura, usando um único parâmetro q. Este parâmetro integra os efeitos dos parâmetros a e b do modelo (2.18). Além disso, o parâmetro q representa um índice da competitividade das plantas daninhas sobre a cultura, isto é, quanto maior for seu valor, mais competitiva é a planta daninha sobre a cultura e consequentemente ocasionando uma maior perda de rendimento da cultura provocada pela planta daninha (Kropff e Spitters, 1991). Se $q \cong 1$, as plantas da cultura e as plantas daninhas têm características fisiológicas e morfológicas parecidas; se $q > 1$ as plantas daninhas são mais competitivas que as plantas da cultura e se $q < 1$ as plantas da cultura é que são mais competitivas. A relação entre a perda de rendimento e os diferentes valores do parâmetro q é ilustrada na Figura 2.8, sendo que curvas convexas acima da linha diagonal representam situações em que as plantas daninhas são mais competitivas e as curvas côncavas abaixo da linha diagonal representam situações em que as plantas da cultura são mais competitivas.

Segundo VanAcker et al. (1997), o parâmetro q no modelo (2.34) é influenciado pelo período entre a emergência de plantas da cultura e o momento em que a área foliar relativa de plantas daninhas é determinada. A vantagem de (2.34) é que este pode ser usado em situações nas quais as plantas daninhas emergem em fluxos separados, determinando-se a área foliar relativa das plantas daninhas apenas uma vez em um período determinado (Lotz et al., 1994).

Kropff et al. (1992) expandiram o modelo (2.34) para incluir a interferência

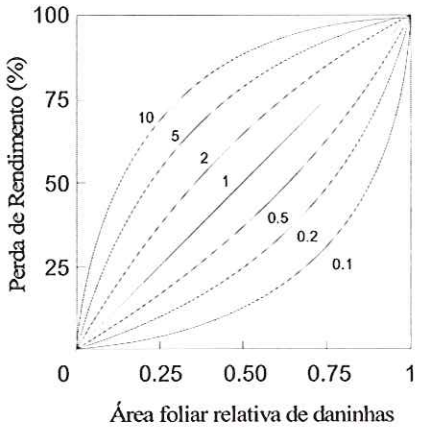

Figura 2.8: Relações teóricas entre a perda de rendimento e a área foliar relativa de daninhas para valores distintos do parâmetro q no modelo (2.34).

de várias espécies de plantas daninhas resultando

$$P_r(A_{Frd,i}) = \frac{\sum_i^n q_i A_{Frd,i}}{1 + \sum_i^n (q_i - 1) A_{Frd,i}} \tag{2.35}$$

onde cada índice $i = 1, ..., n$ representa uma espécie daninha.

Lotz et al. (1992) incluiram outro parâmetro, denotado m, no modelo (2.34). A inclusão deste parâmetro limita a perda máxima de rendimento e fornece uma assíntota para a curva hiperbólica. O modelo de perda de rendimento na cultura pela observação na área foliar relativa de plantas daninhas proposto por Lotz et al. (1992) com a inclusão de uma assíntota é dado por

$$P_r(A_{Frd}) = \frac{qA_{Frd}}{1 + \left(\frac{q}{m} - 1\right) A_{Frd}} \tag{2.36}$$

onde m é o parâmetro que indica o limite superior de perda de rendimento.

O parâmetro m pode ou não ser incluído no modelo, sendo que este é comumente usado para conjuntos de dados contendo valores pequenos para os valores máximos de perdas de rendimento (Rizzardi et al., 2003c).

Para a inclusão do efeito de múltiplas espécies no modelo (2.36), o modelo

torna-se

$$P_r(A_{Frd,i}) = \frac{\sum q_i A_{Frd,i}}{1 + \sum \left(\frac{q_i}{m_i} - 1\right) A_{Frd,i}}. \tag{2.37}$$

A utilização de modelos matemáticos usando a área foliar para a estimação de perdas de rendimentos na cultura causados pela infestação das plantas daninhas depende da precisão da estimativa dessa variável (Rizzardi e Fleck, 2004).

Perda de Rendimento e Cobertura Foliar Relativa de Plantas Daninhas

A cobertura foliar relativa de plantas daninhas foi sugerida por vários autores como uma variável alternativa ao índice de área foliar relativa (Kropff et al., 1992; Lotz et al., 1992; Florez et al., 1999). Em estágios recentes do ciclo de crescimento da cultura, a área foliar relativa de plantas daninhas pode ser caracterizada pela cobertura foliar relativa de plantas daninhas (Vitta e Quintanilla, 1996; Lotz et al., 1994).

Segundo Lotz et al. (1994), as plantas daninhas com diferentes morfologias mostram a mesma relação linear entre a área foliar relativa de plantas daninhas e a cobertura foliar relativa de daninhas, avaliadas três ou quatro semanas após a emergência da cultura, mas quando avaliadas em estágio avançados de crescimento, as plantas daninhas de diferentes morfologias apresentaram diferenças nesta relação.

A cobertura foliar é definida como a proporção de aérea do solo ocupada pela projeção vertical da parte área de uma espécie (Rizzardi e Fleck, 2004). Os métodos de quantificação de cobertura foliar relativa de plantas daninhas foram estudados por diversos pesquisadores (Lotz et al., 1994; Vitta e Quintanilla, 1996; Rizzardi e Fleck, 2004). A quantificação da cobertura foliar relativa de plantas daninhas pode ser feita utilizando os métodos de avaliação visual, mecânica e por análise de imagens (Rizzardi e Fleck, 2004; Lotz et al., 1994).

A avaliação visual pode ser feita por especialistas para classificar a infestação utilizando uma escala percentual de zero (0) a cem (100), onde o valor zero corresponde à ausência de cobertura vegetal do solo e o valor cem à cobertura

completa do solo, o que seria inviável para estimar as perdas de rendimento.

A avaliação mecânica pode ser realizada através da projeção vertical de agulhas (método do ponto quadrado). Em cada unidade experimental, é posicionado um quadro, contendo duas barras dispostas nas diagonais opostas. Nas barras, são fixadas agulhas de ferro que se prolongam até tocarem o solo, com pontos na diagonal. Para cada unidade, verifica-se o número de contatos das agulhas com folhas de plantas daninhas ou da cultura. Caso ocorra contato foliar em todos os pontos, a cobertura do solo por plantas daninhas proporcionada por plantas daninhas ou da cultura representa 100%.

Em Yang et al. (1991), a cobertura foliar de plantas daninhas é avaliada partindo da suposição que estas plantas estão distribuídas pelo campo com a mesma probabilidade de ser encontrada entre as linhas da cultura. As imagens são captadas somente entre as linhas da cultura e pelo sistema RGB *(Red-Green-Blue)* faz-se o reconhecimento e quantificação da cobertura de plantas daninhas. A cobertura de plantas daninhas é definida como a porcentagem de pixels verdes na imagem analisada. Seguindo essa idéia e considerando a cobertura foliar relativa de plantas daninhas, pode-se fazer a avaliação entre as linhas de plantio da cultura. Subtraindo a porcentagem de plantas daninhas presentes nas imagens, poderia-se considerar o restante como sendo a cultura e assim, obter uma estimativa da porcentagem de cobertura de plantas daninhas e cultura, podendo, portanto, estimar a cobertura foliar relativa de plantas daninhas.

A utilização de imagens digitais parecem propiciar boas estimativas para a cobertura foliar relativa de plantas daninhas. O modelo de cobertura foliar relativa estima o efeito de densidades e fluxos de emergência de plantas daninhas, constituindo-se em medida precisa que substitui outros métodos de quantificação da infestação de plantas daninhas, como a densidade de plantas daninhas e a área foliar relativa (Rizzardi e Fleck, 2004).

Segundo Berti e Sattin (1996), o uso da cobertura foliar relativa diminui a variabilidade na estimativa de perdas de rendimento da cultura causadas pela presença de plantas daninhas de ano para ano. Isso ocorre porque a cobertura fo-

liar relativa contempla indiretamente a época de emergência das plantas daninhas em relação à cultura.

A estimativa da cobertura foliar relativa proposta por Vitta e Quintanilla (1996) é dada por

$$C_{Frd} = \frac{C_{Fd}}{C_{Fd} + C_{Fc}} \tag{2.38}$$

onde C_{Frd} é a cobertura foliar relativa de plantas daninhas, C_{Fd} é a cobertura foliar da planta daninha m^{-2}, C_{Fc} é a cobertura foliar da cultura m^{-2}.

O modelo de perda de rendimento proposto por Lotz et al. (1996) é da forma

$$P_r(C_{Frd}) = \frac{qC_{Frd}}{\left(1 + \left(\frac{q}{m} - 1\right) C_{Frd}\right)} \tag{2.39}$$

onde C_{Frd} já foi definido anteriormente, q é o parâmetro que representa o dano relativo e m é o parâmetro que representa a perda máxima de rendimento. O modelo (2.39) pode ser representado excluindo o parâmetro m, caso o modelo com um único parâmetro, q, seja adequado para uma dada situação.

Com a inclusão de mais espécies de plantas daninhas, o modelo (2.39) torna-se

$$P_r = \frac{\sum q_i C_{Frd,i}}{(1 + (\sum \frac{q_i}{m_i} - 1) C_{Frd,i})}. \tag{2.40}$$

Para escolher um modelo adequado é preciso dispor de uma variável que além de ser quantificada de modo prático não reduza a precisão da estimação da perda de rendimento. A utilização da cobertura foliar relativa como variável independente no modelo matemático para perda de rendimento causada por plantas daninhas, justifica-se caso houver disponibilidade de métodos rápidos e precisos para sua determinação. Se a cobertura foliar relativa não for avaliada em estágios recentes de crescimento, uma limitação para o uso dessa variável, estaria associada a diferentes níveis de cobertura (tanto para culturas quanto para espécies de plantas daninhas). Dessa forma, a variável volume foliar relativo de plantas daninhas pode ser promissora como variável independente do modelo de perda de

rendimento.

Perda de Rendimento e Volume Relativo de Plantas Daninhas

O volume da planta pode assumir várias formas. O volume cilíndrico é facilmente determinado pela altura da planta e a área do dossel (Bussler et al., 1995). A quantificação dessa variável tem sido feita em diferentes estágios vegetativos e reprodutivos da cultura (Conley et al., 2003b; Conley et al., 2003a; Moechnig et al., 2003).

Segundo Bussler et al. (1995), o volume relativo de daninhas, denotado V_{Frd}, pode ser melhor do que a densidade em quantificar a interferência entre plantas daninhas e cultura. As medidas de volume quantificam as diferenças entre o tempo de emergência e a variação na taxa de crescimento. Esta variável pode ser quantificada através da equação descrita por Conley et al. (2003a)

$$V_{Frd} = \frac{V_d}{V_c + V_d} \tag{2.41}$$

onde V_d é o volume de daninhas e V_c é o volume da cultura. Em Conley et al. (2003a) o volume por m^2 de cada espécie foi estimado multiplicando a média de volume pela densidade de cada espécie.

Se existirem duas espécies daninhas, (2.41) pode ser reescrita como (Moechnig et al., 2003)

$$V_{Frd,i} = \frac{V_{d,i} D_{d,i}}{V_c D_c + V_{d,i} D_{d,i} + V_{d,j} D_{d,j}} \tag{2.42}$$

onde $V_{d,i}$ é o volume de plantas daninhas da espécie i, $V_{d,j}$ é o volume da planta daninha j e V_c é o volume da cultura. Assim, o modelo hiperbólico de perda de rendimento em termos de volume foliar relativo de daninhas pode ser dado por (Moechnig et al., 2003; Conley et al., 2003a)

$$P_r(V_{Frd,i}) = \frac{\sum q V_d}{\left(1 + \left(\sum \frac{q}{m} - 1\right) V_d\right)}. \tag{2.43}$$

Com a inclusão de várias espécies daninhas no modelo (2.43) obtém-se

$$P_r(V_{Frd,i}) = \frac{\sum q_i V_{d,i}}{\left(1 + \left(\sum \frac{q_i}{m_i} - 1\right) V_{d,i}\right)}. \tag{2.44}$$

Modelos Sigmóides de Perda de Rendimento

O modelo sigmóide de perda de rendimento parte da suposição que em baixas densidades de plantas daninhas, as perdas de rendimento não são significativas. A Figura 2.9 ilustra este caso.

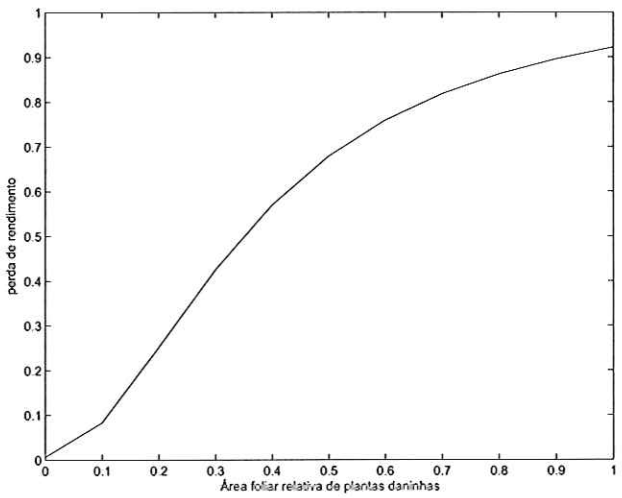

Figura 2.9: Modelo sigmóide para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas.

Segundo Ngouajio et al. (1999), os modelos hiperbólicos descrevem um rendimento assintótico para altos níveis de infestações de daninhas, o que pode resultar em uma superestimação do impacto das plantas daninhas. A forma sigmóide para os modelos matemáticos para perdas de rendimento pode ser mais adequada quando as espécies de plantas daninhas infestantes são menos competitivas ou para situações onde haja boas condições ambientais em baixos níveis de infestação. Este fato biológico é representado no modelo sigmóide que possui um ponto de inflexão e a estabilização para as perdas de rendimento.

Swinton e Lyford (1996) propuseram o seguinte modelo sigmóide de rendi-

mento em termos da densidade de plantas daninhas

$$R = \frac{R_0\gamma + \alpha D_d^{\delta}}{\gamma + D_d^{\delta}} \tag{2.45}$$

onde R é o rendimento da cultura, D_d é a densidade de plantas daninhas, α é o rendimento mínimo (ou assíntota quando a densidade de daninhas tende ao infinito), R_0 é o rendimento máximo (cultura livre de plantas daninhas), γ é a curvatura inferior da sigmóide e δ é a curvatura superior da sigmóide.

Em termos de perda de rendimento, (2.45) pode ser reescrito como

$$P_r(D_d) = 1 - \frac{R}{R_0} = 1 - \left(\frac{R_0\gamma + \alpha D_d^{\delta}}{R_0(\gamma + D_d^{\delta})}\right). \tag{2.46}$$

Segundo Ngouajio et al. (1999), a maioria dos trabalhos que envolve a comparação entre o modelo de rendimento sigmóide e os outros modelos é baseado na densidade como variável independente, sendo que este autor considera que os modelos de área e cobertura foliar relativa de daninhas têm diversas vantagens.

O modelo sigmóide de rendimento em termos da área foliar relativa de daninhas (AF_{rd}) é dado por

$$R = \frac{R_0\gamma(1 - (A_{Frd})^{\delta}) + \alpha(A_{Frd})^{\delta}}{\gamma(1 - A_{Frd})^{\delta} + (A_{Frd})^{\delta}} \tag{2.47}$$

e, em termos de perda de rendimento (2.47) pode ser reescrita como

$$P_r(A_{Frd}) = 1 - \left(\frac{R_0\gamma(1 - (A_{Frd})^{\delta}) + \alpha(A_{Frd})^{\delta}}{R_0(\gamma(1 - A_{Frd})^{\delta} + (A_{Frd})^{\delta})}\right). \tag{2.48}$$

O modelo (2.47) foi reparametrizado para reduzir os efeitos de não linearidades nos parâmetros (Swinton e Lyford, 1996). A versão reparametrizada substitui γ^{δ} por γ' como segue

$$R = \frac{R_0 + \alpha(\chi)^{\delta}}{1 + (\chi)^{\delta}} \tag{2.49}$$

onde $\chi = \left(\frac{AF_{rd}}{(1-AF_{rd})\gamma'}\right)$.

Os parâmetros do modelo (2.49) podem ser interpretados biologicamente como: R é o rendimento da cultura, R_0 é o rendimento máximo da cultura em condições livre de plantas daninhas (assíntota superior), α é o rendimento mínimo quando a área foliar se aproxima de um (assíntota inferior), δ é a medida da curvatura da sigmóide (e pode ser interpretado também como medida da habilidade competitiva de daninhas comparada com a cultura) (Ngouajio et al., 1999).

Em Ngouajio et al. (1999) o modelo hiperbólico de rendimento é apresentado como um caso especial do modelo sigmóide, ou seja

$$R = \frac{R_0(\frac{a}{b})(1 - D_d)^\delta + R_0(1 - b)D_d^\delta}{(\frac{b}{a})(1 - D_d)^\delta + D_d^\delta} \tag{2.50}$$

fazendo $\alpha = R_0(1 - b)$, $\beta = R_0$, $\gamma = \frac{b}{a}$ e $\delta = 1$, tem-se que (2.50) é um caso especial de (2.46).

A complexidade do modelo sigmóide está relacionada à quantidade de parâmetros que este apresenta e, isso pode favorecer o uso do modelo hiperbólico, mas segundo Ngouajio et al. (1999) e Swinton e Lyford (1996), a alta flexibilidade do modelo sigmóide permite detectar alguns casos especiais.

2.1.3 Dinâmica de Populações de Plantas Daninhas e Perda de Rendimento

Para descrever as perdas de rendimento na cultura em função da densidade do banco de sementes, é preciso primeiramente, descrever a dinâmica das plantas daninhas. Para isso, são apresentados os principais modelos, presentes na literatura, que representam essa dinâmica.

Modelos da Dinâmica da População de Plantas Daninhas

O entendimento da dinâmica das plantas daninhas é particularmente importante para o desenvolvimento e aperfeiçoamento das estratégias de controle dessas plantas (Swinton e King, 1994; Sartorato et al., 1996; Buhler et al., 1997; Wu, 2001; Fleck et al., 2003). As sementes de plantas daninhas que germinam, viram plântulas que em um determinado tempo iniciam a produção de novas sementes que são adicionadas ao banco de sementes do solo. A representação da dinâmica populacional de plantas daninhas está representado na Figura 2.10 (Kropff e Laar, 1993).

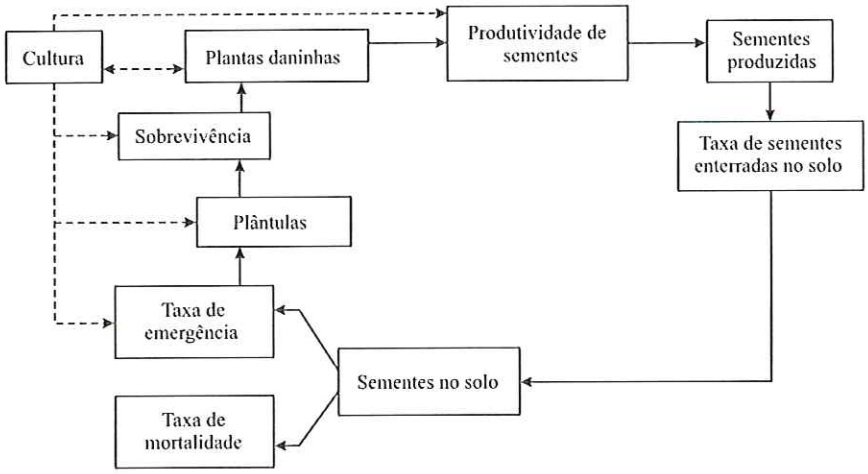

Figura 2.10: Representação esquemática da dinâmica populacional de plantas daninhas. As linhas tracejadas indicam onde as plantas daninhas e a cultura interagem.

Quando o manejo é eficiente, o número de sementes no banco tende a reduzir, acarretando reduções nas perdas de rendimento da cultura a longo prazo. O comportamento da população de plantas daninhas pode ser descrito por modelos matemáticos que, em geral, são não lineares.

A dinâmica populacional de plantas daninhas é resultado da influência de fatores intrísecos e extrínsecos (tempo, manejo e outros organismos tais como insetos, patógenos, grandes herbívoros e outras espécies de plantas) (Cousens e Mortimer, 1995). Assim, são apresentados modelos matemáticos da dinâmica das

plantas daninhas considerando alterações nos fatores extrínsecos. Dessa forma, os modelos dinâmicos são divididos nos que consideram os fatores extrínsecos constantes (dinâmica intrínseca) e os que consideram alterações nos fatores extrínsecos.

Dinâmica da População de Plantas: Fatores Extrínsecos Constantes

Considerando que os fatores extrínsecos permanecem constantes ao longo das gerações, a dinâmica das plantas daninhas pode ser caracterizada como intrínseca e os fatores que são relevantes para o estudo da dinâmica são resultantes da competição intra-específica e interespecífica.

Os modelos de dinâmica intrínseca que são apresentados são modelos de único estádio para efeito de simplificação. Modelos que consideram estádios múltiplos podem ser encontrados em Cousens e Mortimer (1995), sendo que modelos de estádios múltiplos consideram que o ciclo de vida da espécie de planta daninha é dividido em estádios, considerando os ganhos e perdas de um estágio para o outro em um mesmo ciclo.

O ciclo de vida de sementes de uma planta daninha (de ciclo anual) foi descrito por Sakai (2001): germinação no solo, crescimento vegetativo, floração, produção de sementes, difusão de sementes, sobrevivência ou mortalidade de sementes no solo e germinação no ciclo seguinte, e, pode ser representado pela Figura 2.11.

Os modelos de estádio único consideram as alterações nas densidades iniciais da população, tanto de plantas como de sementes, em intervalos de uma geração individual para cada ciclo. A dinâmica intrínseca de populações de plantas daninhas foram modeladas por diversos autores encontrados na literatura (Sakai, 2001; Cousens e Mortimer, 1995; Wu, 2001).

Cousens e Mortimer (1995) apresentaram um estudo de modelos de dinâmica populacional de plantas daninhas baseado na trajetória da densidade da população, tanto no que se refere à plantas como no que se refere à sementes.

Sob baixas densidades de plantas, a produção de sementes por área é dada

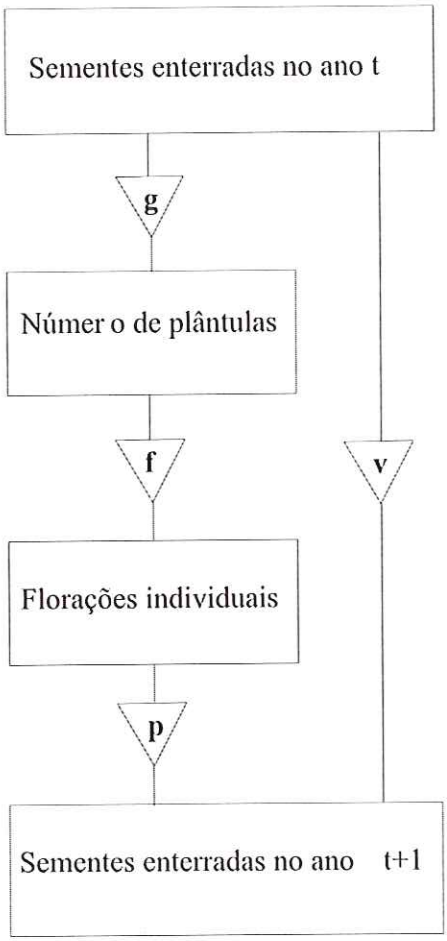

Figura 2.11: Representação do ciclo de vida de uma daninha anual.

por

$$S_{t+1} = CS_t \tag{2.51}$$

onde C é a taxa de crescimento finita em baixa densidade de plantas (não é influenciada pela densidade, pois supõe-se que as plantas ainda não começaram a competir), S_t é a densidade de sementes no ciclo (ano) t e S_{t+1} é o número de sementes no ciclo (ano) $t+1$.

Considerando uma densidade inicial de sementes, denotada S_0, (2.51) pode

ser escrita como

$$S_t = C^t S_0. \tag{2.52}$$

Incorporando o fato de que o aumento na densidade de plantas provoca a competição entre estas, tem-se que sob altas densidades de plantas, a produção de sementes por planta sofre um decréscimo com o aumento da competição.

A equação que representa a população em que S_{t+1} se aproxima de um limite superior quando S_t aumenta, a equação é dada por (Cousens e Mortimer, 1995)

$$S_{t+1} = \lambda S_t \tag{2.53}$$

e λ é dado por

$$\lambda = \frac{C}{(1 + dS_t)} \tag{2.54}$$

onde d é a taxa de declínio de λ com o aumento da densidade. A densidade de equilíbrio da população é dada no ponto em que $S_{t+1} = S_t$, ou seja, quando $\lambda = 1$.

O modelo (2.53) descreve uma série de degraus discretos de uma geração para a outra e é mais adequado para plantas daninhas anuais (Cousens e Mortimer, 1995).

As relações entre S_{t+1} e S_t possuem pontos máximos e podem ser representados por

$$S_{t+1} = \frac{CS_t}{(1 + dS_t)^\eta} \tag{2.55}$$

onde η é representa os efeitos das alterações nas densidades de plântulas que descreve a forma da trajetória populacional. O modelo (2.55) descreve uma relação sigmóide entre a densidade de plântulas e o tempo.

O tipo de trajetória populacional é influenciada pelos valores de C e η (Cousens e Mortimer, 1995). As trajetórias definem quatro zonas no gráfico, como ilustrado na Figura 2.12.

Para os parâmetros na zona 1 o comportamento da população se aproxima

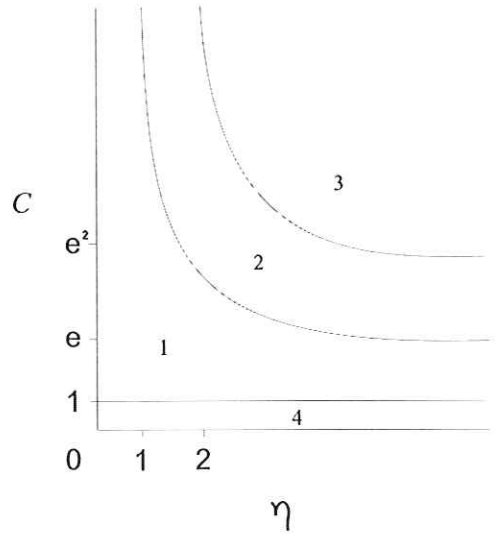

Figura 2.12: Comportamentos da população descritos por (2.55).

assintóticamente do equilíbrio, na zona 2 apresentam oscilações convergentes para o equilíbrio, os que estão na zona 3 apresentam oscilações divergentes e os que estão na zona 4 apresentam comportamento assintótico da população declinando para zero (Cousens e Mortimer, 1995).

Considerando que exista outra espécie de planta daninha, Cousens e Mortimer (1995) estenderam (2.55) para

$$S_{1,t+1} = \frac{C_1 S_{1,t}}{(1 + d_1(S_{1,t} + \alpha_1 S_{2,t}))^{\eta}} \tag{2.56}$$

$$S_{2,t+1} = \frac{C_2 S_{2,t}}{(1 + d_2(S_{2,t} + \beta_2 S_{1,t}))^{\eta}} \tag{2.57}$$

onde os subscritos com números 1 e 2 referem-se à espécie de planta.

Considerando que uma espécie seja a planta daninha e a outra seja uma cultura (semeadas em uma uma mesma densidade em cada ano), Cousens e Mortimer (1995) representaram a dinâmica da densidade como

$$S_{t+1} = \frac{CS_t}{(1 + d(S_t + \alpha S_c))^{\eta}} \tag{2.58}$$

onde S_c é a densidade da cultura e α é um parâmetro relacionado à cultura. Neste modelo, a taxa de crescimento populacional λ pode ser escrita como

$$\lambda = \frac{C}{(1 + d(S_t + \alpha S_c))^{\eta}}. \tag{2.59}$$

Sakai (2001) descreveu a dinâmica das sementes das plantas daninhas de ciclos anuais para um dado número inicial de sementes. Assim, a densidade de sementes no ano $t+1$ é determinada pela densidade de sementes no ano t através da equação a diferença linear da forma

$$S_{t+1} = gfpS_t + (1 - g)vS_t \tag{2.60}$$

onde S é a densidade de sementes (número de sementes por área); g, f, p e v são parâmetros que representam as taxas de germinação, floração, produtividade (número de sementes produzidas por planta) e de sementes viáveis no solo no ciclo seguinte. Os parâmetros f, p e v variam com o aumento da densidade de plântulas e o parâmetro g independe das alterações das densidades de plântulas, sendo que os valores dos parâmetros variam de zero a um, exceto os parâmetros p e v.

Sakai (2001), descreveu a densidade de plântulas de daninhas em termos de densidade de sementes, dada por

$$Dp_t = gS_t \tag{2.61}$$

onde Dp_t é a densidade de plântulas (número de plântulas por área). Considerando (2.61), pode-se representar a densidade de sementes dada em (2.60) por

$$S_{t+1} = fpDp_t + (1 - g)vS_t. \tag{2.62}$$

Dinâmica da População de Plantas: Fatores Extrínsecos Variáveis

O ambiente de uma população de plantas daninhas não é constante e é influenciado pelos fatores bióticos e abióticos. Um entendimento da dinâmica de uma população no mundo real depende dos conhecimentos dos efeitos de vários fatores extrínsecos e sua interação com a dinâmica intrínseca das plantas daninhas (Cousens e Mortimer, 1995).

Segundo Cousens e Mortimer (1995), os fatores extrínsecos podem ser divididos em três grupos:

- fatores de manejo,
- fatores de tempo e
- outros organismos, tais como patógenos, insetos, grandes herbívoros e outras espécies de plantas.

Esses fatores extrínsecos não agem isoladamente, mas juntos afetam a densidade de plântulas de diferentes espécies de plantas daninhas (Cousens e Mortimer, 1995).

O fator extrínseco que será tomado como fato relevante nesse estudo é o efeito do herbicida na dinâmica da população. O efeito do herbicida na dinâmica populacional tem sido explorado extensivamente com o auxílio de modelos matemáticos (Cousens e Mortimer, 1995). Se for incluído o efeito do herbicida no modelo (2.51) tem-se (Cousens e Mortimer, 1995)

$$S_{t+1} = C(1-\kappa)S_t \tag{2.63}$$

onde κ é a proporção de plantas mortas pelo herbicida. Então, $(1-\kappa)$ é a proporção de plantas sobreviventes à aplicação herbicidas.

O efeito do herbicida pode ser introduzido no modelo (2.55). Seja o número de indivíduos no fim da geração reduzidos pela proporção κ (κ inclui a mortalidade

da planta e os efeitos sub-letais na produção de sementes), dessa forma, a equação (2.55) torna-se (Cousens e Mortimer, 1995)

$$S_{t+1} = \frac{(1-\kappa)CS_t}{(1+dS_t)^{\eta}}. \tag{2.64}$$

As trajetórias dadas por (2.64) apresentam os diferentes níveis de controle para um dado herbicida. O controle de plantas daninhas reduz a população em uma proporção fixa de sementes produzidas. Se for considerado também que para diferentes níveis de controle por herbicidas as reduções na densidade de plântulas são fixas, (2.64) pode ser reescrita como

$$S_{t+1} = \frac{CS_t(1-\kappa)}{(1+dS_t(1-\kappa))^{\eta}} \tag{2.65}$$

e os tipos de trajetória dadas por (2.65) podem ser representadas pela Figura 2.13 onde supõe-se que o herbicida reduz a densidade de plântulas para uma densidade constante.

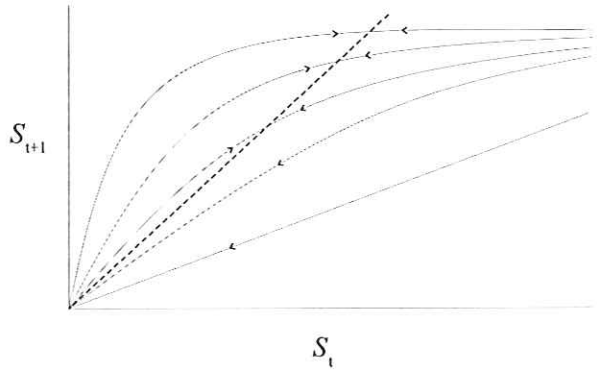

Figura 2.13: Trajetórias descritas pelo modelo (2.65) para diferentes níveis de controle com herbicidas.

Wu (2001), considerou que o número de plantas daninhas que sobrevivem à aplicação de herbicida denotada W_t é dada pela equação exponencial

$$W_t = gS_t e^{-\vartheta H_t} \tag{2.66}$$

onde g é a taxa de germinação, H_t é a dosagem herbicida (pode ser interpretado também como a toxidade do herbicida usado) e ϑ é uma constante positiva que depende do uso do herbicida e da espécie de planta daninha. A sobrevivência de plantas maduras produzem novas sementes para o banco de sementes do solo. O banco de sementes no início do próximo ciclo, S_{t+1}, é representado por (Wu, 2001)

$$S_{t+1} = (1 - g)S_t + kW_t. \tag{2.67}$$

Wu (2001) assumiu para efeito de simplicidade que todas as sementes germinam ($g = 1$) ou que morrem $S_t = 0$. Sob essas suposições, tem-se

$$S_{t+1} = kW_t = kgS_t e^{-\vartheta H_t} \tag{2.68}$$

onde a taxa de germiniação g e a eficácia herbicida, denotada por ϑ, são parâmetros aleatórios porque são influênciados pela quantidade de chuva, temperatura e outros fatores que não são conhecidos certamente (Wu, 2001).

Perda de Rendimento e Sementes de Plantas Daninhas

Segundo Wu (2001) a incorporação da dinâmica de plantas daninhas nas estratégias de controle aumentam os lucros dos produtores entre 1 e 1.4%.

Bernhard et al. (1998) utilizaram o modelo hiperbólico para estimar as perdas de rendimento na cultura à partir de amostras do número de sementes de plantas daninhas encontradas no solo.

Os modelos de perdas de rendimento (hiperbólico e sigmóide), cuja variável é a densidade, podem incorporar a dinâmica das sementes das plantas daninhas. Considerando que a densidade de plantas pode ser escrita pelos modelos (2.61) e (2.66), sendo que o primeiro modelo considera que os fatores extrínsecos são constantes e, o segundo modelo, que os fatores extrínsecos estão variando (inclusão do efeito do herbicida). Pode-se escrever o modelo de perda como $Pr(Dp)$ ou $Pr(W)$.

A equação (2.66) para estimar W_{t+1} à partir de uma estimativa de S_{t+1}, poderia ser reescrita como

$$W_{t+1} = f(S_{t+1}). \tag{2.69}$$

A quantificação do banco de sementes em ciclos (ou anos) sucessivos permite a avaliação da eficácia das estratégias de manejo que estão sendo adotadas. Às vezes, a estrátégia de manejo pode ser eficiente a curto prazo, ou seja, pode demonstrar ser eficaz para a cultura em um tempo determinado, porém pode estar ocorrendo um aumento na quantidade de sementes no solo (no banco de sementes). Este aumento do banco de sementes pode acarretar o aumento das infestações futuras, o que ocasiona gastos futuros para o controle de plantas daninhas. Assim, o controle de plantas daninhas deve ser eficiente a curto e longo prazo e nesse sentido, o banco de sementes é particularmente importante para o controle de plantas daninhas.

2.1.4 Modelos de Perda de Rendimento e Heterogeneidade Espacial

As plantas daninhas possuem uma tendência de se agrupar em certas áreas em detrimento de outras. No sistema de plantio direto, a distribuição tende a ser mais homogênea, porém, no sistema de plantio convencional, por haver um deslocamento das sementes no solo, a distribuição tende a ser heterogênea. os modelos de perda de rendimento, em geral, não supõem que as plantas daninhas podem possuir uma distribuição homogênea.

A importância de considerar a distribuição espacial das plantas daninhas nas estimativas de perda de rendimento é devido à superestimação das perdas devido à suposição da uniformidade da distribuição das plantas pelo campo (González-Andújar et al., 2001; Zanin et al., 1998). A incorporação da variabilidade espacial das plantas daninhas no processo de tomada de decisão pode aperfeiçoar a base biológica e a qualidade das predições estratégias a longo prazo e podem auxiliar no desenvolvimento de táticas de controle mais econômicas (Zanin et al., 1998). O

modelo linear considera que a heterogeneidade da distribuição espacial de plantas daninhas é dada por

$$P_r(I_s) = A_r I_s u \tag{2.70}$$

onde A_r representa a porcentagem de área para cada valor de I_s e I_s representa a severidade da infestação por plantas daninhas (plantas m^{-2}), como definido anteriormente. A perda de rendimento estimada para toda a área é obtida com o somatório das perdas correspondentes a cada A_r

O modelo não linear de perda de rendimento considerando a variabilidade espacial das plantas daninhas é dado por (Withrow, 2004)

$$P_r = \sum_{i=1}^{n} w_i P_{ri} \tag{2.71}$$

onde w_i é a porcentagem de área para uma dada densidade de planta daninha, P_{ri} é a perda de rendimento correspondente a cada área e n é o número de áreas que o campo seria dividido de acordo com a distribuição das plantas daninhas. A perda de rendimento estimada para toda a área é obtida com o somatório das perdas correspondentes a cada área. O modelo para P_{ri} pode ser tanto hiperbólico quanto sigmóide.

2.2 Considerações sobre os Modelos de Perda de Rendimento

De um modo geral, as estimativas das perdas de rendimento que as plantas daninhas acarretam na cultura podem ser importantes para

- estimar os danos que as plantas daninhas causam na ausência de tratamentos herbicidas e assim torna-se possível comparar o custo de controle e o custo de perda de rendimento monetária na ausência de controle;

- estimar os danos causados pelas plantas daninhas que sofreram tratamentos com herbicidas e investigar a potencialidade do herbicida através da redução (ou não) da habilidade competitiva da planta daninha.

Os modelos matemáticos de perda de rendimento possuem várias aplicações que são discutidas a seguir, juntamente com alguns métodos de estimação dos parâmetros dos modelos.

2.2.1 Aplicações dos Modelos de Perda de Rendimento

Sistemas de Apoio à Tomada de Decisão

A escolha da melhor opção de controle de plantas daninhas pode ser feita usando sistemas de apoio à tomada de decisão (Berti e Zanin, 1997). Um importante componente de sistemas de apoio à tomada de decisão para o manejo de plantas daninhas é a medida da perda de rendimento devido a infestação da cultura (Wilkerson et al., 1991; Swinton e King, 1994; Berti e Zanin, 1997), principalmente quando a estimativa da perda é relacionada com outros fatores tais como o preço da cultura, os rendimentos esperados, os custos e a eficácia dos herbicidas. O modelo de perda de rendimento indica os danos causados por pragas (plantas daninhas, patógenos e insetos) para diferentes situações de produção[1] (Willocquet et al., 2000).

Os sistemas de manejo podem ser direcionados na minimização das perdas de rendimento e reprodução de sementes de plantas daninhas, considerando as margens econômicas (Kropff e Laar, 1993).

Segundo Willocquet et al. (2000), para quantificar as perdas de rendimento é necessário combinar os dois tipos de decisão: a estratégica e a tática. A decisão estratégica está relacionada com grandes áreas e períodos longos de tempo e a decisão tática está relacionada com uma cultura particular em uma estação de crescimento. As informações de perda de rendimento são necessárias em um nível

[1]Situação de produção nesse contexto é a combinação dos fatores ambientais e o rendimento.

estratégico para desenvolver políticas e prioridades de pesquisa e é necessário o nível tático para a implementação das ações ou para melhorar as decisões de manejo de plantas daninhas (Willocquet et al., 2000).

Diversos programas foram desenvolvidos para indicar a melhor de manejo de plantas daninhas. Wilkerson et al. (1991) desenvolveram o programa denominado HERB para avaliar o potencial de dano na cultura ocasionado pela interferência de múltiplas espécies daninhas na cultura e determinar um conjunto apropriado de ações. A recomendação para a aplicação de herbicidas é baseada no custo e eficiência destes, sob diferentes condições e preços de vendas esperados para a cultura. As saídas do programa HERB fornecem as estimativas de danos e as recomendações sobre o uso ou não do herbicida. Kropff e Laar (1993) desenvolveram um programa denominado INTERCOM para estimar o impacto das plantas daninhas na cultura em termos de perdas de rendimento e assim determinar a eficácia dos tratamentos com herbicidas. O programa computacional descrito em Berti e Zanin (1997), o GESTINF, foi desenvolvido para avaliar a seleção da melhor opção de controle pós-emergentes na cultura (soja e trigo). As saídas do GESTINF fornecem a estimativa do dano potencial na cultura devido à infestação por múltiplas espécies e as diferentes opções de controle de acordo com os retornos esperados. O programa desenvolvido por Swinton e King (1994) denominado WEEDSIM utiliza a perda de rendimento e simulação do banco de sementes para fornecer a recomendação do uso de herbicidas pós-emergentes. A estimativa das perdas de rendimento neste caso é feita pelo modelo hiperbólico (2.18).

O modelo usado no programa GESTINF para descrever a perda de rendimento em função da densidade de plantas daninhas é o hiperbólico (Cousens, 1985b). Considera-se para uma espécie hipotética que os parâmetros a e b possuem o valor 100. Assim, a perda de rendimento para estes parâmetros de referência pode ser representado como segue (Berti e Zanin, 1997)

$$P_r = \frac{100 D_d}{1 + D_d} \tag{2.72}$$

e para a espécie j que tem parâmetros a_j e b_j a densidade equivalente denotada $D_{eq,j}$ pode ser obtida a partir de

$$\frac{100D_{eq,j}}{1+D_{eq,j}} = \frac{a_j D_j}{1+\frac{a_j}{b_j}D_j} \tag{2.73}$$

e, portanto, $D_{eq,j}$ é dada por

$$D_{eq,j} = \frac{a_j D_j}{1+a_j D_j\left(\frac{100}{b_j}-1\right)}. \tag{2.74}$$

Para obter a densidade equivalente total D_{eqt} é necessário somar todos os valores de $D_{eq,j}$, ou seja,

$$D_{eqt} = \sum_{i=1}^{n} D_{eq,j} \tag{2.75}$$

onde n é o número de espécies daninhas.

A perda de rendimento para infestações mistas usando a densidade equivalente é dada por (Berti e Zanin, 1997)

$$P_r = \frac{100D_{eqt}}{1+D_{eqt}}. \tag{2.76}$$

Cada combinação entre espécie daninha e estágio de crescimento é caracterizado por uma taxa de mortalidade específica (expressa como a porcentagem de controle) (Berti e Zanin, 1997). O programa GESTINF estima as perdas de rendimento após tratamento com herbicidas denotada P_{rh} utilizando a densidade equivalente dada por (2.76) e a taxa de mortalidade específica, ou seja, a densidade utilizada é a densidade de plantas daninhas que sobrevivem à aplicação de herbicidas.

Indicação do Período Crítico de Controle

O período crítico indica quando as plantas da cultura estão vulneráveis aos efeitos da competição com as plantas daninhas. Pode ser usado para estimar quando as plantas daninhas precisam ser controladas para prevenir as perdas de rendimento.

Isto está relacionado com a habilidade competitiva da cultura (Kropff e Laar, 1993).

O período crítico de controle indica quando as plantas da cultura estão mais vulneráveis aos efeitos da competição e consequentemente é o momento em que ocorre perdas de rendimento mais significativas.

Vitta e Satorre (1999) utilizaram a biomassa para indicar o período crítico. Segundo estes autores o período crítico é o momento onde ocorre a estabilização da biomassa conforme ilustrado na Figura 2.14.

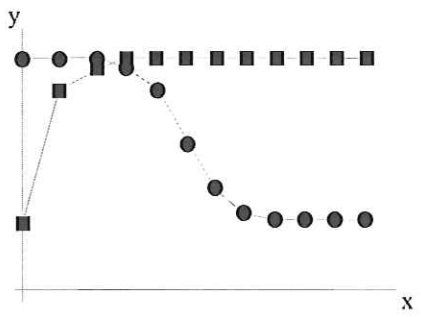

Figura 2.14: Período crítico de controle com x denotando o somatório da temperatura (^oCd) e y a biomassa total da cultura (gm^{-2}).

Estimação do Nível de Dano Econômico

Para usar herbicidas pós-emergentes eficientemente, é preciso determinar quando a população excede o nível de dano econômico (Wilkerson et al., 1991). O nível de dano econômico é definido como a densidade de plantas daninhas em que os benefícios obtidos com o tratamento com herbicidas iguala-se aos custos de tratamento, ou seja, o retorno econômico de uma aplicação herbicida é nulo. A estimativa do retorno econômico de uma aplicação herbicida denotado L_r é dado por (Withrow, 2004)

$$L_r = L_{ah} - L_{sah} \tag{2.77}$$

onde L_{ah} é o retorno econômico se houvesse a aplicação de herbicida e L_{sah} é o retorno econômico se não existisse a aplicação de herbicida. A estimativa de L_{ah}

e L_{sah} são dadas, respectivamente, por

$$L_{ah} = C_c R_o(1 - P_{rh} - C_f - C_h - C_a) \tag{2.78}$$

e

$$L_{sah} = C_c R_o\,(1 - P_{rsh} - C_f) \tag{2.79}$$

onde C_c é o preço de custo da cultura, R_0 é o rendimento máximo, P_{rh} e P_{rsh} representam as perdas de rendimento com e sem aplicação de herbicidas, respectivamente, C_h representa o custo de herbicidas, C_a representa os custos de aplicação de herbicidas e C_f é o custo de materiais, combustíveis, equipamentos, taxas, etc. Reescrevendo (2.77) tem-se

$$L_r = C_c R_0\,(P_{rsh} - P_{rh}) - C_h - C_a. \tag{2.80}$$

Como descrito anteriormente, o nível de dano econômico, denotado N_{de} pode ser definido como o retorno econômico igualando-se $L_r = 0$ (Withrow, 2004)

$$P_{rsh} - P_{rh} \geq \frac{C_h - C_a}{C_c R_0} \tag{2.81}$$

o que equivale a

$$P_{rsh} - P_{rh} \geq \psi \tag{2.82}$$

onde $\psi = \frac{C_h - C_a}{C_c R_0}$. Um valor de $\psi = 0,1$ indicaria que o custo com tratamento herbicida estaria associado a 10% do lucro total se não houvesse plantas daninhas presentes. Assim, para que o uso de herbicidas seja viável, ψ deve pertencer ao intervalo (Withrow, 2004)

$$0 \leq \psi \leq 1.$$

Considerado o modelo hiperbólico de perda de rendimento apresentado por Cousens (1985b) tem-se

$$P_{rsh} = \frac{aD_d}{1 + \left(\frac{a}{b}\right) D_d} \tag{2.83}$$

e

$$P_{rh} = \frac{aD_d(1-\epsilon_h)}{1+\left(\frac{a}{b}\right)D_d(1-\epsilon_h)} \tag{2.84}$$

onde ϵ_h é a eficácia do herbicida ($0 \leq \epsilon_h \leq 1$). O modelo (2.81) se torna

$$\left(\frac{aD_d}{1+\left(\frac{a}{b}\right)D_d}\right) - \left(\frac{aD_d(1-\epsilon_h)}{1+\left(\frac{a}{b}\right)D_d(1-\epsilon_h)}\right) \geq \psi \tag{2.85}$$

e resolvendo essa equação encontra-se a densidade de plantas daninhas que o uso de herbicidas com eficácia ϵ_h torna-se viável (Withrow, 2004)

$$D_{d,N_{de}} = \frac{-\left[ab(2-\epsilon_h)\psi - ab^2\epsilon_h\right] \stackrel{+}{-} \sqrt{\left[ab(2-\epsilon_h)\psi - ab^2\epsilon_h\right]^2 - 4a^2b^2\psi^2(1-\epsilon_h)}}{2a^2\psi(1-\epsilon_h)} \tag{2.86}$$

onde o sinal $\pm$ indica que existem duas soluções para a equação e assim a viabilidade econômica precisa ser analisada. Existe uma densidade mínima e uma densidade máxima para a viabilidade de controle. A máxima densidade para o nível de dano econômico descreve o ponto que a densidade de plantas se torna tão grande que as perdas de rendimento após usar herbicidas são muito altas.

A utilização do nível de dano econômico no manejo de plantas daninhas avalia a população de tal forma que as medidas de controle sejam implementadas somente quando as infestações superarem esse nível (Rizzardi et al., 2003d).

A estimativa para a densidade do nível de dano econômico proposto por Lindquist e Kropff (1996) é dado por

$$D_{d,N_{de}} = \frac{C_a}{R_0 P\left(\frac{a}{100}\right)\epsilon_h} \tag{2.87}$$

onde P é o preço da cultura por quilo, a é a porcentagem de perda de rendimento da cultura por unidade de planta daninha quando sua densidade se aproxima de zero (parâmetro do modelo hiperbólico de perda de rendimento em função da densidade), C_a, R_0 e ϵ_h já foram definidos.

O aumento no custo de controle aumenta o nível de dano econômico e o aumento do parâmetro a diminui o nível de dano econômico, o que pode ser

notado nos procedimentos de obtenção do nível de dano econômico (2.87).

Marra e Carlson (1983) desenvolveram um modelo para determinar a densidade de plantas daninhas para o nível de dano econômico de várias espécies daninhas dado por

$$D_{d,N_{de}} = \frac{C_{ah} + C_h}{P_r P \epsilon_h} \tag{2.88}$$

onde C_{ah} é o custo de uma aplicação de herbicida por hectare incluindo os custos com o trabalho e maquinários, C_h é o custo da dosagem recomendada por hectare, P_r é a perda de rendimento ($Kgha^{-1}$), P é o preço de cotação futuro por quilograma para o mês da colheita e ϵ_h é a eficiência do herbicida. Foi desenvolvido também, outro modelo para determinar o nível de dano econômico incluindo as incertezas diárias no modelo (Marra e Carlson, 1983).

Uma limitação para o uso do nível de dano econômico como critério de tomada de decisão de manejo, refere-se às sementes produzidas por plantas não controladas, que ocorrem quando as densidades ainda não atingiram o nível de dano econômico, e assim, comprometem a tomada de decisão para o controle de daninhas com base nesse critério. Nesse sentido, as informações do número de sementes no banco é particularmente importante, pois, se houver um aumento no número de sementes é porque o controle não foi eficiente (a longo prazo) e, contraditoriamente, se ocorrer uma redução no número de sementes no banco.

Sartorato et al. (1996) para implementarem o manejo de plantas daninhas, utilizaram a estimativa do nível de dano econômico conjuntamente com o modelo hiperbólico para a produção de sementes como uma função da densidade de plantas daninhas, dada por

$$S = \frac{aD_d}{1 + (\frac{a}{b})D_d} \tag{2.89}$$

S é o número de sementes de plantas daninhas.

Estimação da Produção de Sementes por Plantas Daninhas

Os sistemas de auxílio à tomada de decisão utilizam além da estimativa da perda de rendimento da cultura, informações do banco de sementes para estimar a população de daninhas, e táticas recomendadas de controle destas (Buhler et al., 1997).

As plantas daninhas produzem sementes que são adicionadas ao banco de sementes do solo, aumentando assim a possibilidade de um aumento nas infestações futuras (Swinton e King, 1994). Portanto, é importante que o controle de plantas daninhas seja eficaz a ponto de reduzir o número de sementes no solo. Segundo Buhler et al. (1997), as características do banco de sementes influenciam tanto as populações de plantas daninhas que estão no campo quanto o sucesso de manejo destas.

A densidade populacional afeta os fatores ecológicos, tais como a taxa de mortalidade, taxa de produtividade (número de sementes produzidas por plantas) e o rendimento. O aumento inicial na densidade das espécies de plantas resultam em uma alta mortalidade e baixa taxa de crescimento, menor fecundidade e um decréscimo na produção de sementes. Isso ocorre por causa do aumento na competição de recursos tais como a luz, a água e outros nutrientes (Sakai, 2001).

Segundo Canner et al. (2002), as observações empíricas e as relações teóricas entre as curvas de perda de rendimento e de produção de sementes conduz a hipótese que pode haver uma forte relação entre as formas destas duas curvas. Assim, os parâmetros dos modelos de reprodução de plantas daninhas podem ser estimados de dados de perda de rendimento na cultura, que são mais fáceis de serem quantificados devido a uma maior simplicidade dos experimentos. O valor do parâmetro a de (2.18), pode ser utilizado no modelo hiperbólico que descreve a produção de sementes das plantas daninhas em função da densidade (parâmetro a de (2.89)).

2.3 Discussão

Os modelos matemáticos para perda de rendimento presentes na literatura são lineares e não lineares. Dentre os não lineares destacam-se os modelos quadráticos, cúbicos, sigmóides e hiperbólicos, sendo que os modelos quadráticos e cúbicos são polinomiais e o modelos sigmóides e hiperbólicos são modelos de regressão não linear.

Em vista da importância do significado biológico para o ajuste do modelo, pode-se considerar apenas os modelos lineares, sigmóides e hiperbólicos. Cada um desses modelos descrevem a perda de rendimento e o que ocorreu na competição entre as populações de plantas. A escolha do melhor modelo a ser ajustado depende do conjunto de dados disponível.

A estimativa de perda de rendimento tem sido usada na literatura para a escolha da melhor decisão de manejo, estimar o período crítico de controle, nível de dano econômico e a produção de sementes por plantas daninhas. A estimação dos parâmetros dos modelos de perda de rendimento pode ser feita usando regressão linear e não linear. No Apêndice A, o critério de mínimos quadrados para a regressão linear e não linear são descritos.

Capítulo 3

Delineamento dos Experimentos

Os experimentos na cultura de milho (*Zea mays*) foram conduzidos em campo, na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, Minas Gerais. Nesta seção são apresentados detalhes sobre a área experimental e a condução do experimento.

O milho é uma cultivar (BRS1030) do tipo híbrido simples, cultivado em uma área de 38 hectares, numa área com pivô central em sistema de plantio direto onde o solo não é revolvido após a colheita nem antes do próximo plantio. A foto aérea do pivô experimental pode ser vista na Figura 3.1. A data do plantio ocorreu de 16 a 20 de novembro de 2004 e, concomitantemente, foi realizada uma adubação do solo com $22,56Kg\ ha^{-1}$ de nitrogênio (N), $78,96Kg\ ha^{-1}$ de fósforo (P), $45,12Kg\ ha^{-1}$ de potássio (K) e $0,564Kg\ ha^{-1}$ de Zinco.

Figura 3.1: Foto aérea do pivô experimental - Sete Lagoas, MG.

A cultura é dividida em 41 parcelas experimentais distando cem metros uma das outras em cada direção (leste-oeste e norte-sul). Cada parcela experimental possui forma retangular, medindo $12m^2$, sendo $4m$ de comprimento e $3m$ de largura, com 5 linhas de cultura equiespaçadas $0,7m$, com $0,1m$ nas bordas superior e inferior. Foi aplicado herbicida em locais no pivô fora das parcelas descritas acima. Nestes locais foram tomadas parcelas testemunhas de 10 metros de comprimento e $4,2$ metros de largura, contendo seis linhas de cultura equiespaçadas $0,7$ metros, com $0,35$ metros nas bordaduras inferior e superior, totalizando 42 metros quadrados de área ao lado de cada uma das 41 parcelas experimentais. Durante a aplicação de herbicidas no pivô, estas parcelas foram cobertas com lona, como pode ser visto pela Figura 3.2, para que estas não sofressem a ação do herbicida. As plantas daninhas presentes nestas parcelas não foram semeadas, ou seja, são resultantes do banco de sementes presentes na área. O tratamento com herbicidas foi realizado em aplicação pré-emergente (antes do desenvolvimento da cultura) e pós-emergente (depois do desenvolvimento da cultura). A aplicação pré-emergente ocorreu logo após o plantio com dessecantes glifosato ($2,4Kg\ ha^{-1}$). A aplicação pós-emergente foi realizada nos dias 13 e 14 de dezembro de 2004 com nicosulfuron ($0,04Kg\ ha^{-1}$) e atrazine ($1Kg\ ha^{-1}$). Foi realizada também, a aplicação de inseticidas (0,6 litros por hectare de lannat) nos dias 20 e 21 de dezembro de 2004.

Figura 3.2: Cobertura de uma parcela para que esta não sofra a ação do herbicida aplicado.

A Figura 3.3 ilustra a distribuição das 41 parcelas experimentais distribuídas

pelo campo. A localização das parcelas foram georreferenciadas e as latitudes e longitudes estão na Tabela 3.1. A colheita do milho foi realizada para apenas trinta e oito das quarenta e uma parcelas experimentais devido a realização de outro experimento que impediu o acesso às parcelas 20, 21 e 22.

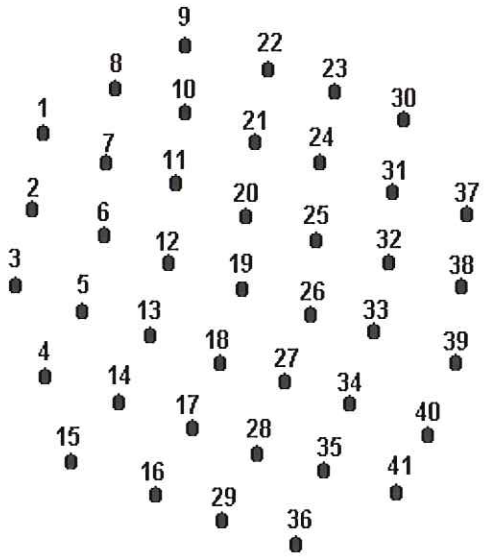

Figura 3.3: Distribuição das 41 parcelas experimentais pelo pivô.

3.1 Coleta dos Dados

Nos dias 27 e 29 de janeiro de 2005 foram coletadas alturas e diâmetros dos colmos de plantas da cultura de milho para as parcelas experimentais e testemunhas. Os dados foram coletados aleatoriamente no interior das três linhas centrais da cultivar.

Nos dias 17, 18 e 21 de março de 2005 foram coletados os seguintes dados nas 41 parcelas experimentais:

1. densidade de plantas daninhas utilizando um quadro de madeira de $0.5m$ por $0.5m$, que pode ser visualizado na Figura 3.4, colocado aleatoriamente com quatro repetições dentro das 3 linhas centrais de cultura de cada par-

Tabela 3.1: Localização das 41 parcelas experimentais obtida por uso do GPS.

Parcela	Medição-1	Medição-2
	Latitude	Longitude
1	7847799,150527330	586113,183360760
2	7847699,507785420	586102,576266328
3	7847603,578693840	586079,937293408
4	7847482,296959680	586116,142588431
5	7847569,800179510	586164,722345541
6	7847664,369617390	586193,469462528
7	7847763,926956360	586199,481159328
8	7847861,868771190	586217,761244919
9	7847915,455012520	586307,567213339
10	7847827,864351200	586306,260200605
11	7847729,871446530	586288,984638006
12	7847629,514008580	586285,905269271
13	7847535,441921870	586252,984363802
14	7847447,907384560	586205,262212223
15	7847362,027529300	586154,325912283
16	7847314,824556160	586264,092403908
17	7847405,767333180	586305,593598989
18	7847496,496173760	586347,987195187
19	7847594,136311340	586379,346729417
20	7847690,670699420	586385,187343689
21	7847789,391521810	586397,666600316
22	7847888,893831950	586411,204152397
23	7847856,185804420	586506,164299675
24	7847758,342737180	586489,551649208
25	7847659,404892700	586480,838280201
26	7847559,887688720	586474,020191494
27	7847466,156139020	586439,268677153
28	7847375,789716790	586398,297727061
29	7847284,956884380	586356,797614576
30	7847252,029211630	586449,352225306
31	7847342,351492240	586490,664494191
32	7847432,450361440	586532,731257396
33	7847526,027757400	586566,888490205
34	7847625,269161990	586577,850413405
35	7847724,816411810	586583,047039596
36	7847823,112854450	586600,296722088
37	7847690,517466590	586679,640844428
38	7847590,910805100	586676,177704551
39	7847492,272715350	586660,743470989
40	7847398,758615010	586626,814183498
41	7847314,545019120	586588,354804653

cela. Dentro deste, foram coletadas e contadas todas as espécies de plantas daninhas;

2. biomassa das espécies coletadas nos quadros em cada parcela e separadas em embalagens para posteriormente serem obtidas a matéria seca de cada espécie;

3. cobertura foliar total da parcela e sua porcentagem em folha larga e folha estreita, obtidas pela análise visual de especialistas;

4. amostras de plantas daninhas que continham sementes para obtenção da produção de sementes para medir a produção de sementes (chuva de sementes);

5. quatro amostras de solo dentro de cada parcela, entre as 3 linhas centrais de cultura, para que seja levantado o banco de sementes de plantas daninhas, e quatro amostras fora da parcela, uma em cada direção (leste, oeste, norte e sul), chamadas testemunhas, para que o banco de sementes dentro da parcela, onde não houve aplicação de herbicida, seja comparado com o banco de sementes fora da parcela, onde houve a ação do herbicida. O instrumento de coleta de solo é denominado trado, e pode ser visto na Figura 3.5.

Figura 3.4: Quadro utilizado em campo para coletar amostras de plantas daninhas.

A obtenção da biomassa (matéria seca da parte aérea das plantas daninhas por metro quadrado) baseou-se na coleta das plantas em campo, separação por

Figura 3.5: Instrumento para realizar a coleta de solo: trado.

espécies e secagem realizada em estufa a temperatura de 105 graus, durante três dias, até que a matéria seca permanecesse constante, ou seja, toda a água foi extraída das plantas.

No dia 4 de abril de 2005 o milho em trinta e oito parcelas experimentais foi colhido manualmente. Foram coletadas espigas de dez plantas em cada parcela. Os grãos foram separados e pesados. Com a massa dos grãos obtida para dez plantas foi estimada a massa em cada parcela. No dia 8 de abril de 2005 foi feita a colheita do milho para todas as plantas nas trinta e oito parcelas testemunhas. Da mesma forma que nas outras parcelas os grãos foram separados e pesados e os rendimentos foram obtidos pela massa calculada. Os valores das massas dos grãos são ajustados para a umidade de 13% e as unidades foram convertidas de gm^{-2} para $kgha^{-1}$.

Uma vez que o rendimento foi calculado a partir de uma estimativa das massas dos grãos para as parcelas experimentais ao invés da massa propriamente dita, como foi feita nas parcelas testemunhas, foi adotada uma depreciação da massa dos grãos nas parcelas experimentais com base em uma análise da cobertura foliar e da densidade das plantas daninhas em cada parcela.

Os valores de perda de rendimento foram obtidos com o cálculo da perda de rendimento relativa dada por

$$P_{RR_i} = \frac{R_0 - R_i}{R_0}, \quad i = 1, \ldots, 38 \tag{3.1}$$

onde R_0 é o máximo rendimento das parcelas testemunhas, e R_i é o rendimento de cada parcela experimental.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Dados Obtidos

As espécies de plantas daninhas encontradas nas 41 parcelas experimentais são classificadas pelo tipo de folha, larga e estreita, e podem ser identificadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Espécies de plantas daninhas encontradas nas parcelas experimentais do pivô.

Folha Larga	**Folha Estreita**
caruru branco (*Amaranthus hybridus*)	timbête (*Cenchrus echinatus L.*)
picão preto (*Bidens pilosa*)	sorgo selvagem (*Sorghum arundinaceum*)
trapoeraba (*Commelina benghalensis*)	braquiária (*Brachiaria decumbens*)
mentrasto (*Ageratum conyzoides*)	capim colchão (*Digitaria ciliaris*)
erva de touro (*Tridax procumbens*)	capim guiné (*Panicum maximum*)
erva de santa luzia (*Euphorbia hirta L.*)	capim marmelada (*Brachiaria plantaginea*)
erva quente (*Spermacoce latifolia*)	pé de galinha (*Eleusine indica*)
poaia (*Richardia brasiliensis*)	tiririca (*Cyperus rotundus*)
botão de ouro (*Melampodium perfoliatum*)	
leiteiro (*Euphorbia heterophylla*)	

A contagem do número de espécies de plantas daninhas encontradas em cada quadro, realizada em campo, fornece o valor da densidade de plantas por $0,25m^2$, que é a área do quadro. Estes dados foram agrupados em número de espécies de plantas encontradas em cada parcela, obtendo-se a densidade de plantas por espécie, ou seja, o número de espécies por metro quadrado encontrado em cada

parcela e podem ser observados nas Tabelas B.1, B.2, B.3 e B.4. Detalhes das espécies encontradas no campo experimental estão no Apêndice D.

As biomassas das espécies de plantas daninhas encontradas em cada uma das 41 parcelas experimentais podem ser identificadas nas Tabelas B.5, B.6, B.7 e B.8. As biomassas totais, considerando todas as espécies encontradas em cada parcela, podem ser identificadas na Tabela B.9.

Os dados de cobertura vegetal, porcentagem de ocupação do solo por espécies daninhas de folhas estreitas e folhas largas, obtidos pela análise visual de especialistas, são exibidos na Tabela B.10.

As densidades de sementes produzidas por espécies em cada parcela estão exibidas nas Tabelas B.11 e B.12.

As amostras de alturas das plantas da cultivar de milho para os locais sem tratamento herbicida estão exibidas na Tabela B.13 e para os locais com tratamento herbicida estão exibidas na Tabela B.14. Foram feitas duas e cinco repetições para cada parcela nos locais sem e com tratamento herbicida, respectivamente.

As amostras das medidas dos diâmetros dos colmos das plantas da cultivar de milho para os locais sem tratamento herbicida estão exibidos na Tabela B.15. Foram feitas duas repetições para cada parcela e para os locais com tratamento herbicida estão exibidos na Tabela B.16. Foram feitas duas e cinco repetições para cada parcela nos locais sem e com tratamento herbicida, respectivamente.

Os dados amostrais da colheita do milho para as 38 parcelas experimentais que não sofreram e sofreram tratamentos com herbicidas, como as massas dos grãos e as umidades são exibidos nas Tabelas B.17 e B.18, respectivamente.

Os valores das perdas de rendimento por parcela estão na Tabela B.19.

No dia 18 de janeiro de 2005 foi feita uma análise visual da cultivar, comparando áreas que sofreram e áreas que não sofreram tratamentos com herbicidas. As áreas sem tratamentos com herbicidas continham plantas com pigmentos amarelos em sua coloração. Este é um dos efeitos que demonstram que as plantas daninhas interferiram no desenvolvimento da cultivar.

4.2 Plantas Daninhas na Área Experimental

Pode-se observar a porcentagem de ocorrência de cada planta daninha coletada nas quarenta e uma parcelas pelo gráfico da Figura 4.1. O mentrasto (folha larga) e o capim colchão (folha estreita) foram as plantas que apresentaram maior número de indivíduos nas parcelas percorridas, resultando cerca de 25% e 22% de ocupação, respectivamente.

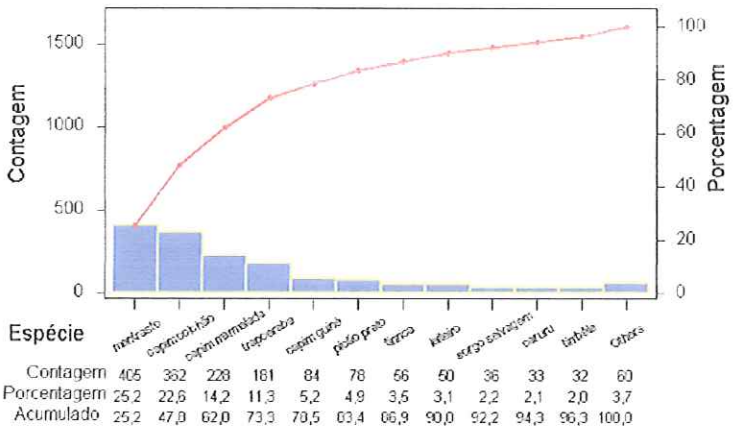

Figura 4.1: Contagem de espécies de plantas daninhas nas parcelas.

As parcelas que se localizam na periferia da plantação apresentam maior número de espécies de plantas daninhas, possivelmente por possuírem maior incidência de luz e por sofrerem mais influências externas das outras culturas existentes no campo. Este fato pode ser verificado pelo gráfico da Figura 4.2.

4.3 Análise dos Indicativos de Perda de Rendimento

Nesta seção são apresentadas a organização, resumo e análise exploratória dos dados de altura e diâmetro do colmo da planta da cultivar. A altura e o diâmetro do colmo da planta da cultivar estão associados à perda de rendimento, pois estes

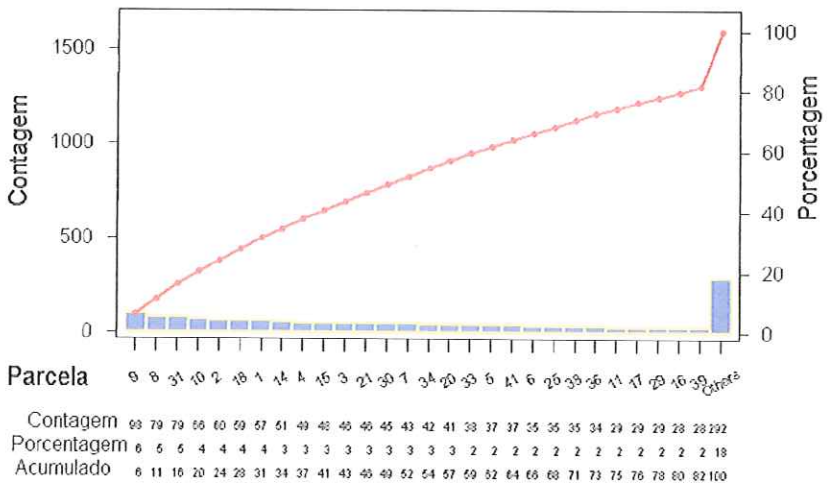

Figura 4.2: Número de plantas daninhas por parcela.

podem ser influenciados pelos efeitos da interferência de plantas daninhas. Para verificar se houve perda de rendimento, é feita uma análise nesses indicativos sob dois tratamentos para as plantas da cultivar: com e sem utilização de herbicidas, ou seja, no interior das 41 parcelas experimentais e em locais próximos onde ocorreram tratamentos com herbicidas. É feita uma análise exploratória dos dados e a partir desta é elaborada uma análise do comportamento desses indicativos para encontrar possíveis relações ou associações entre os conjuntos de valores sob diferentes tratamentos. Essas relações podem ser detectadas por meio de métodos gráficos e medidas numéricas. A análise gráfica deve ser feita para ter um conhecimento geral do conjunto de dados analisados, porém, para obter respostas precisas e um conhecimento específico do conjunto de dados é necessário elaborar uma análise numérica. Esta análise compreende o cálculo de médias, desvio padrão, variabilidade e teste de hipóteses para analisar a rejeição ou aceitação das hipótes assumidas sobre as variâncias ou as médias. A hipótese de normalidade dos dados será assumida nessa análise, pois pelo teorema do limite central quando o número de amostras é maior que 30, a distribuição dos valores tende a uma curva Gaussiana, ou seja, são normalmente distribuídas.

A análise do gráfico de caixa e do gráfico de médias sugerem que há uma igualdade ou diferença entre as médias para os diferentes tratamentos. Para assumir uma dessas hipóteses o teste-F para analisar a homocedasticidade ou heterocedasticidade e posteriormente o teste-t para analisar a igualdade ou não das médias devem ser feitos. Alguns conceitos estatísticos utilizados são dados no Apêndice C.

4.3.1 Análise dos Dados dos Diâmetros dos Colmos das Plantas da Cultivar

Uma das características de uma cultivar de milho saudável é ter boa resistência à estratificação e ao quebramento do colmo. É feita a análise dos diâmetros dos colmos das cultivares de milho para áreas que sofreram e que não sofreram tratamentos com herbicidas. O objetivo da análise é avaliar se houve alterações nas espessuras dos diâmetros dos colmos das plantas da cultivar de milho para os dois tratamentos.

A análise gráfica da igualdade de médias e presença de valores atípicos é feita pela observação da Figura 4.3.

A normalidade das amostras de diâmetro do colmo para áreas que sofreram e que não sofreram tratamentos com herbicidas pode ser assumida, pois como comentado anteriormente, para experimentos com um número de amostras grande ($n \geq 30$) o teorema do limite central garante a normalidade dos dados. As médias dos diâmetros dos colmos para áreas com e sem tratamento com herbicidas são $\mu_t = 27,03854cm$ e $\mu_{st} = 22,3522cm$, respectivamente, o que sugere que há diferenças entre as médias. O mesmo diagnóstico é dado para os desvios padrão para áreas com e sem tratamento com herbicidas são $2,780046$ e $4,615707$, respectivamente. O gráfico de médias e o gráfico de caixa mostram que há diferença nas médias dos diâmetros dos colmos sob os dois tratamentos distintos, ou seja, há diferenças de médias para áreas com tratamento e sem tratamento com herbicidas. O teste-F, para analisar se as variâncias são iguais ou distintas, fornece

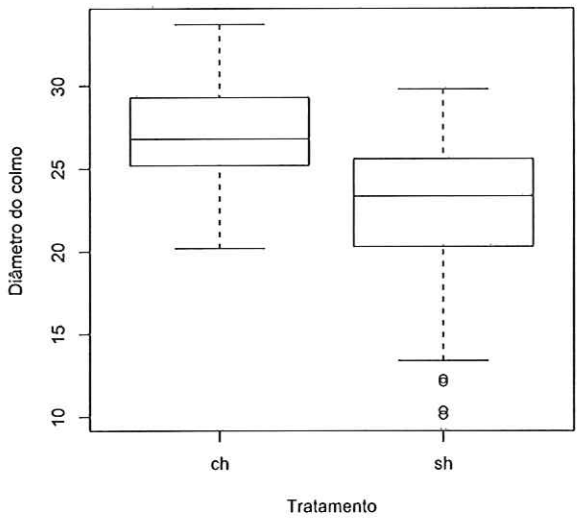

Figura 4.3: Gráfico de caixa dos diâmetros dos colmos das plantas do milho sob diferentes tratamentos: tratamento com utilização de hercidas (ch) e tratamento sem utilização de herbicidas (sh).

p-valor= $7,277e-09$ indicando a rejeição da hipótese nula, ou seja, as variâncias são distintas (heterocedasticidade). Dessa forma, considerando heterocedasticidade, o teste-t realizado para igualdade de médias fornece p-valor= $8,412e-14$ indicando a rejeição da hipótese nula, ou seja, pode-se concluir que as espessuras médias dos diâmetros dos colmos das plantas diferem significativamente (nível de significância $\alpha = 0,05$) para as plantas da cultivar que sofreram e que não sofreram tratamentos com herbicidas, sendo que a espessura das plantas que sofreram tratamentos com herbicidas é maior. Porém, a presença de valores anômalos pode influenciar no diagnóstico. Assim, os testes são refeitos para o conjunto de dados com remoção dos valores anômalos. A partir da observação da Figura 4.4 e das análises refeitas para o conjunto de dados com remoção dos valores anômalos, é possível concluir que os pontos retirados são valores anômalos, pois mesmo após a retirada destes pontos, o teste-F fornece p-valor= $0,0004449$ e o teste-t com heterocedasticidade fornece p-valor= $2,244e-13$ e pode-se concluir que as médias dos valores podem ser consideradas distintas, sendo que as médias dos diâmetros

dos colmos são $\mu_t = 27,03854cm$ e $\mu_{st} = 23,04545cm$.

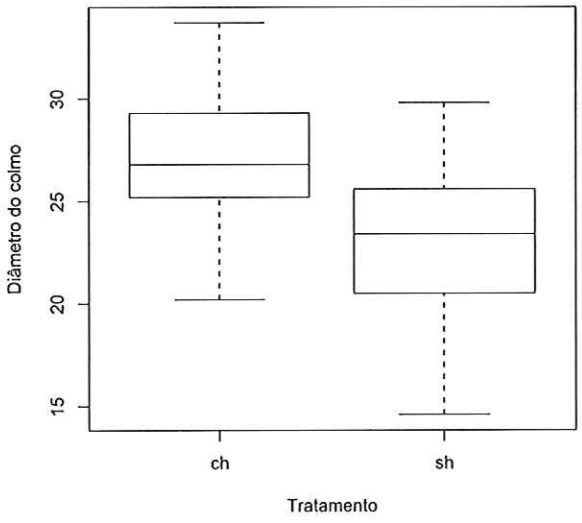

Figura 4.4: Gráfico de caixa dos diâmetro dos colmos das plantas do milho sob diferentes tratamentos com remoção de valores atípicos.

4.3.2 Análise dos Dados de Alturas da Cultivar de Milho

O objetivo da análise dos dados de alturas da cultivar é avaliar se estas sofreram alterações quando submetidas a diferentes tratamentos. A análise gráfica da igualdade de médias e presença de valores anômalos é feita pela observação da Figura 4.5. As médias das alturas para os locais com tratamento e sem tratamento herbicidas são $1,847073m$ e $1,927561m$, respectivamente. Para assumir que as médias são diferentes, são necessárias análises numéricas. O teste-F, para analisar se as variâncias são iguais ou distintas, fornece p-valor= $0,2974$ indicando a aceitação da hipótese nula, ou seja, as variâncias são iguais (homocedasticidade). Dessa forma, considerando homocedasticidade, o teste-t realizado para igualdade de médias fornece p-valor= $0,002504$ indicando a rejeição da hipótese nula, ou seja, pode-se concluir que as médias das alturas das plantas são distintas. Como há presença de valores atípicos, que é confirmado pela Figura 4.5, as análise são

refeitas com a remoção destes.

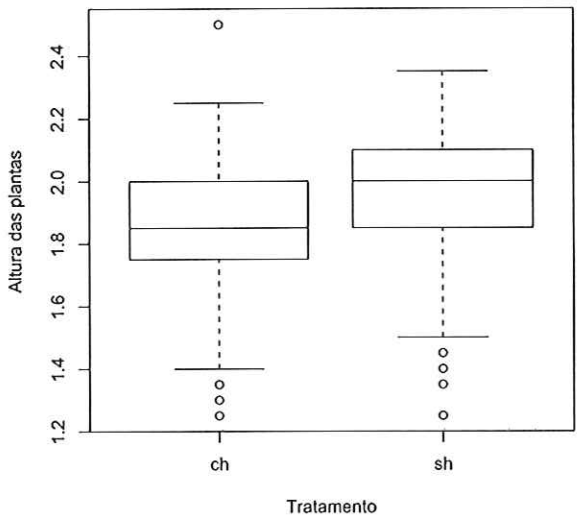

Figura 4.5: Gráficos de caixas das alturas das plantas do milho sob diferentes tratamentos: com utilização de herbicidas (ch) e sem utilização de herbicidas (sh).

Com a remoção dos possíveis valores discrepantes as conclusões são as mesmas, pois mesmo após a retirada destes pontos, o teste-F fornece p-valor= $0,8262$ e o teste-t com homocedasticidade fornece p-valor= $1,792e-05$ indicando que as médias dos valores das alturas são distintas. Dessa forma, pode-se concluir que as médias das alturas se diferem para o nível de significanci $\alpha = 0,05$ para as plantas da cultivar sob diferentes tratamentos (com e sem utilização de herbicidas), sendo que a altura média das plantas que não sofreram tratamentos com herbicidas é maior. Este fato está relacionado com o efeito da inteferência das plantas daninhas, pois as plantas da cultivar tendem a aumentar o seu tamanho a procura de luz.

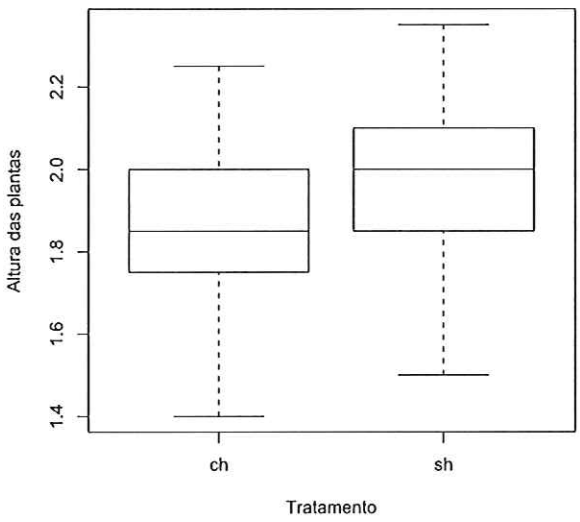

Figura 4.6: Gráficos de caixas das alturas das plantas do milho sob diferentes tratamentos com remoção dos valores atípicos.

4.4 Análises de Associações

As análises de correlação são feitas para indicar se os valores das amostras em questão possuem um grau de associação linear, ou seja, se os valores das amostras crescem ou decrescem seguindo uma relação linear. Nesta análise as amostras estão na mesma unidade de variação. Para isto, a diferença entre o valor de cada amostra e a média amostral é dividida pelo desvio padrão amostral. O teste, feito com auxílio do aplicativo R, utilizado para a verificação da associação entre os valores das amostras é o teste de correlacão de Pearson. Detalhes deste teste são dados no Apêndice C.

4.4.1 Correlação entre a Densidade e a Biomassa de Plantas Daninhas

A correlação entre a densidade e a biomassa das plantas daninhas pode ser analisada em duas situações. Na situação 1 consideram-se as densidades destas plantas

para as distintas espécies presentes em cada parcela experimental. Na situação 2 consideram-se os somatórios das densidades e biomassas de espécies distintas em cada uma das 41 parcelas experimentais. As Figuras 4.7 e 4.8 são gráficos de dispersão de valores para a densidade e a biomassa de plantas daninhas nas duas situações descritas, respectivamente.

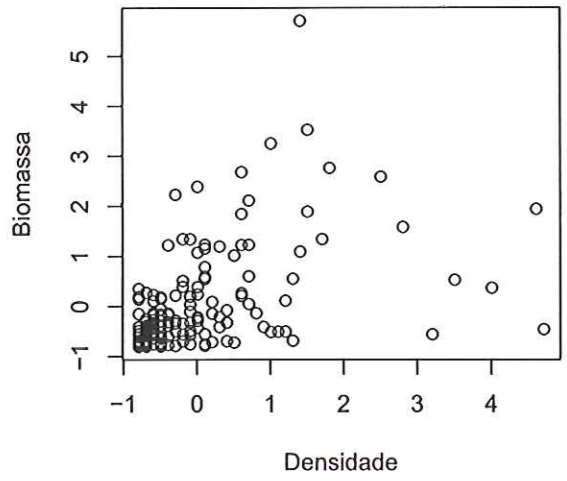

Figura 4.7: Gráfico de dispersão dos valores da densidade e biomassa das plantas daninhas por espécie encontradas em cada parcela experimental (Situação 1).

Os resultados das análises de correlação para a primeira e segunda situação descritas são encontrados na Tabela 4.2. Para um nível de significância $\alpha = 5\%$,

Tabela 4.2: Resultados obtidos com o aplicativo R para a análise de correlação entre a densidade e a biomassa de plantas daninhas.

	Situação 1	Situação 2
p-valor	$1,224e-10$	$0,08173$
t-valor	$6,8824$	$1,7908$
correlação	$0,4756471$	$0,2860038$
intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$)	$[0,3477453; 0,5861694]$	$[-0,03706875; 0,55494792]$

os resultados exibidos na Tabela 4.2 para a situação 1 indicam que o p-valor é inferior a $0,05$ o que ocasiona a rejeição da hipótese nula do teste, ou seja, os

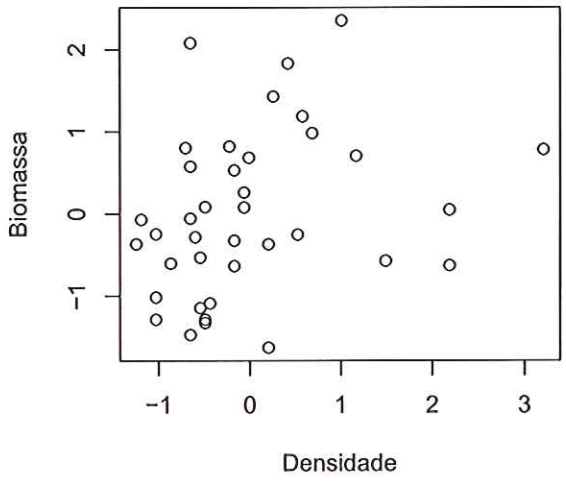

Figura 4.8: Gráfico de dispersão dos valores dos somatórios da densidade e da biomassa das plantas daninhas em cada parcela experimental (Situação 2).

conjuntos de dados analisados possuem correlação. Para a situação 2 o p-valor é superior a $0,05$ o que ocasiona a aceitação da hipótese nula, ou seja, os conjuntos de dados analisados não possuem correlação.

É feita também a análise de correlação da densidade e biomassa para cada espécie daninha e os valores do coeficiente de correlação estão exibidos na Figura 4.9. Quando são consideradas a densidade e biomassa para cada espécie daninha o coeficiente de correlação é maior, o que indica que há um maior grau de associação entre estas. O fato do grau de associação entre esses valores ser menor quando é considerada a mistura das espécies, pode ser devido às diferentes biomassas próprias de cada espécie.

Espécie	Gráfico de dispersão	Coeficiente de correlação
botão de ouro		r ≅ 0,88
braquiária		r ≅ 0,72
caruru		r ≅ 0,73
capim colchão		r ≅ 0,88
capim guiné		r ≅ 0,73
capim marmelada		r ≅ 0,84
erva-quente		r ≅ 1
erva-de-santa-luzia		r ≅ 0,91
erva-de-touro		r ≅ 1
leiteiro		r ≅ 0,74
mentrasto		r ≅ 0,84
pé-de-galinha		r ≅ 0,99
poaia		r ≅ 1
picão-preto		r ≅ 0,98
sorgo selvagem		r ≅ 0,82
timbête		r ≅ 0,91
tiririca		r ≅ 1
trapoeraba		r ≅ 0,85

Figura 4.9: Análise de correlação entre densidade e biomassa para cada espécie daninha.

4.4.2 Correlação entre Cobertura Foliar e Produção de Sementes

A cobertura foliar representa a porcentagem de área ocupada pela projeção vertical da ocupação das plantas daninhas. A Figura 4.10 mostra a dispersão da cobertura foliar e produção de sementes.

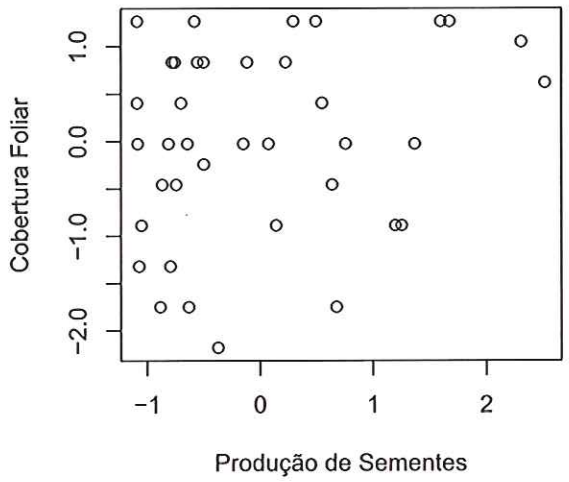

Figura 4.10: Gráfico de dispersão da produção de sementes e cobertura foliar de plantas daninhas.

O teste de correlação de Pearson para a produção de sementes e cobertura foliar forneceu o p-valor$= 0,1719$, o que indica indica que não existe correlação entre as observações de cobertura do solo e produção de sementes.

4.4.3 Correlação entre Densidade e Produção de Sementes

O gráfico de dispersão das observações de densidade de plantas daninhas e produção de sementes podem ser verificados pela análise do gráfico na Figura 4.11.

O teste de correlação de Pearson forneceu o p-valor$= 0,506$, o que indica que não existe correlação entre a densidade de plantas e a produção de sementes.

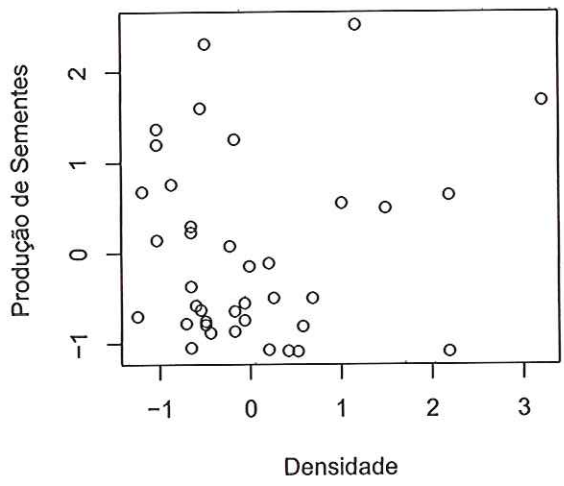

Figura 4.11: Gráfico de dispersão da produção de sementes e cobertura foliar de plantas daninhas.

4.4.4 Correlação entre Biomassa e Produção de Sementes

O gráfico de dispersão de valores na Figura 4.12 não mostra uma correlação visível entre os dados de biomassa e produção de sementes, o que é confirmado pelo teste de correlação de Pearson o qual forneceu um p-valor=0, 9308.

4.5 Variáveis para o Ajuste de Modelo

O ajuste dos modelos requer a seleção das variáveis resposta e preditora. As variáveis elegidas para o ajuste do modelo que descreve as perdas de rendimento na cultivar de milho (BRS1030) são a densidade (número de plantas por metro quadrado), biomassa (matéria seca da parte aérea da planta por metro quadrado) e as perdas de rendimento da cultivar.

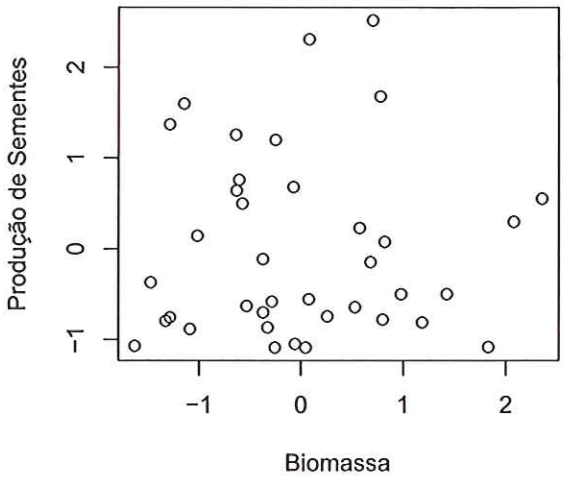

Figura 4.12: Gráfico de dispersão dos valores de densidade e produção de sementes.

4.5.1 Análises das Variáveis Independentes do Modelo

As variáveis independentes dos modelos para perdas de rendimento a serem ajustados são a densidade e a biomassa de plantas daninhas presentes em 38 das 41 parcelas experimentais. Como comentado, há 18 espécies de plantas daninhas encontradas na área experimental. A densidade e a biomassa total de cada espécie daninha está na Tabela 4.3.

O capim colchão, capim marmelada, mentrasto e trapoeraba são as espécies de maiores densidades. Detalhes dos dados de densidade por espécie podem ser observados na Figura 4.13.

A braquiária, capim colchão, capim guiné, capim marmelada, sorgo selvagem, timbête e trapoeraba são as espécies de maiores biomassas. Detalhes dos dados de biomassa por espécie podem ser observados na Figura 4.14.

As densidades totais de plantas daninhas em cada uma das 38 parcelas (parcelas 1 a 19 e 23 a 41) podem ser visualizadas na Figura 4.15, de modo que as parce-

Tabela 4.3: Densidade e biomassa total por espécie.

Espécie	Densidade (plantasm^{-2})	Biomassa(gm^{-2})
botão-de-ouro (bo)	8	1,2
braquiária (br)	27	123,33
caruru (ca)	33	41,61
capim colchão (cc)	336	810,06
capim guiné (cg)	84	366,31
capim marmelada (cm)	203	1075,25
erva-quente (eq)	6	8,56
erva-de-santa-luzia (esl)	8	16,25
erva-de-touro (et)	2	6,42
leiteiro (le)	35	51,83
mentrasto (m)	316	147,63
pé-de-galinha (pg)	3	4,6
poaia (po)	1	0,06
picão-preto (pp)	78	104,63
sorgo selvagem (ss)	36	195,72
trapoeraba (tp)	180	548
timbête (tb)	38	121,57
tiririca (ti)	56	9,51

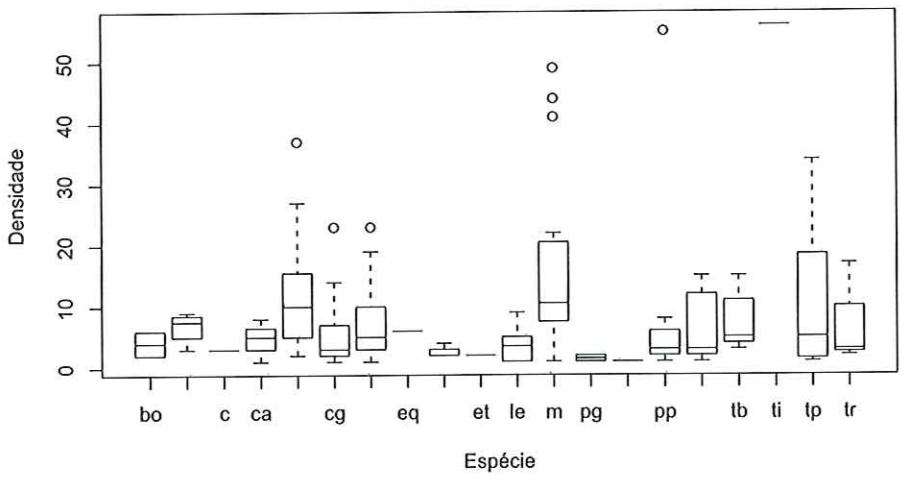

Figura 4.13: Densidades e espécies de plantas daninhas.

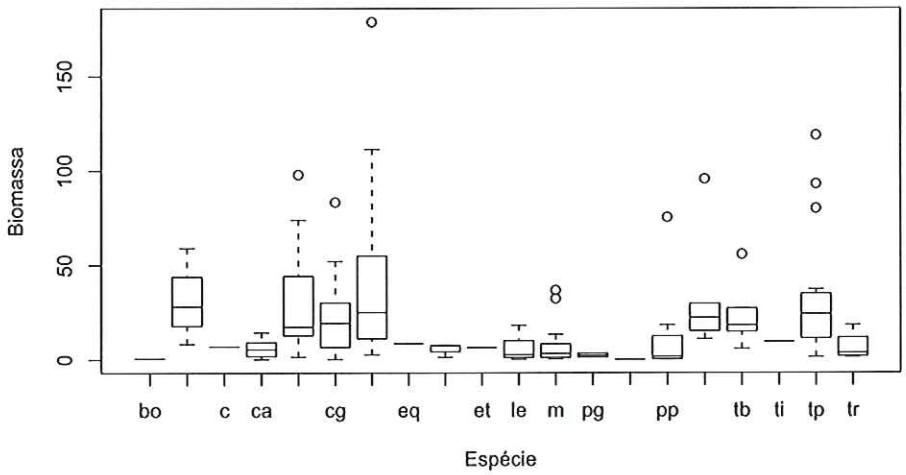

Figura 4.14: Biomassa e espécies de plantas daninhas.

las 31, 30, 5 e 14 possuem as maiores densidades médias com valores 39, 5; 21; 18, 5 e 17, respectivamente. As biomassas totais de plantas daninhas em cada uma das 38 parcelas (parcelas 1 a 19 e 23 a 41) podem ser visualizadas na Figura 4.16. As parcelas 13 e 12 apresentam a maior biomassa média com valores de 69, 6 e 63, 55, respectivamente. A parcela 19 apresenta a menor densidade média (4, 33) e a parcela 30 apresenta a menor biomassa média (3, 635). As médias de densidade e biomassa de plantas daninhas podem ser melhor visualizadas nos gráficos de médias nas Figuras 4.17 e 4.18. Os gráficos de caixas apresentados nas Figuras 4.17 e 4.18 correpondem às parcelas 1, 10 a 19, 2, 23 a 29, 3,30 a 39, 4, 40, 41, 5 a 10, respectivamente.

Nos modelos de regressão as variáveis independentes são consideradas livre de erros.

4.5.2 Análises da Variável Dependente do Modelo

A perda de rendimento é a variável dependente do modelo e é normalmente distribuída, pois como comentado anteriormente, a normalidade é garantida pelo teorema do limite central. A média de perda de rendimento por parcela é 0, 3644822, a perda mínima é 0, 015987736 ocorrida na parcela 34 e a perda má-

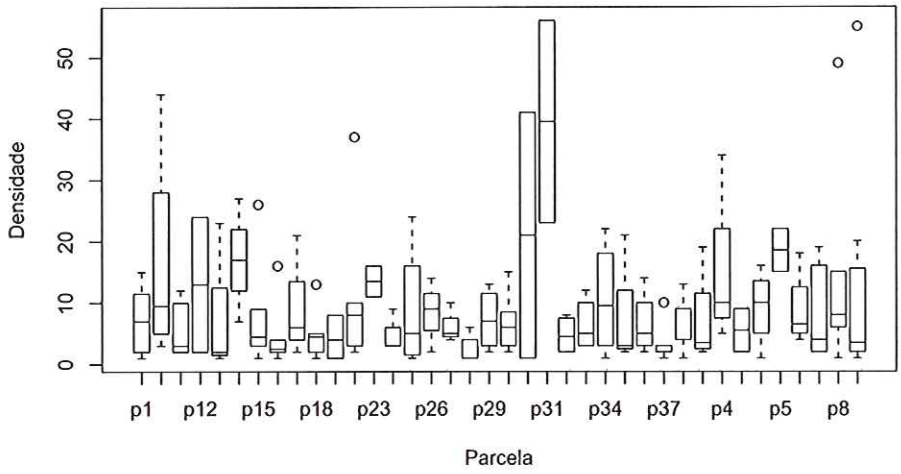

Figura 4.15: Densidade de plantas daninhas nas 38 parcelas experimentais.

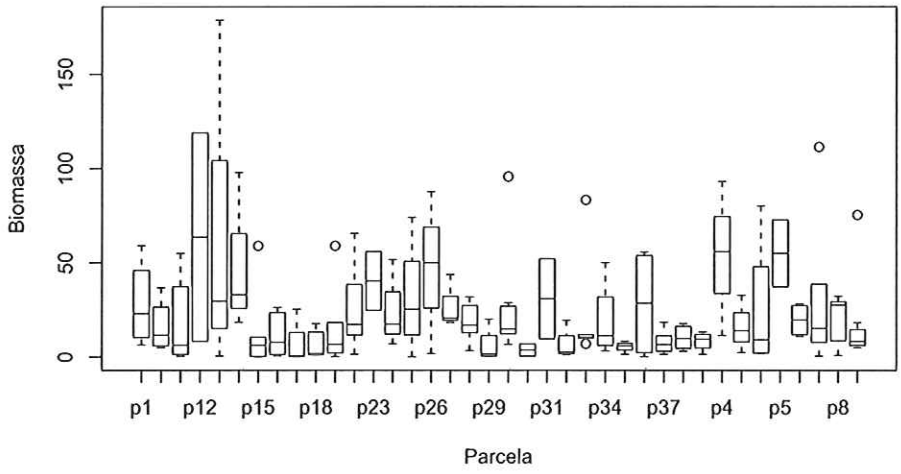

Figura 4.16: Biomassa de plantas daninhas nas 38 parcelas experimentais.

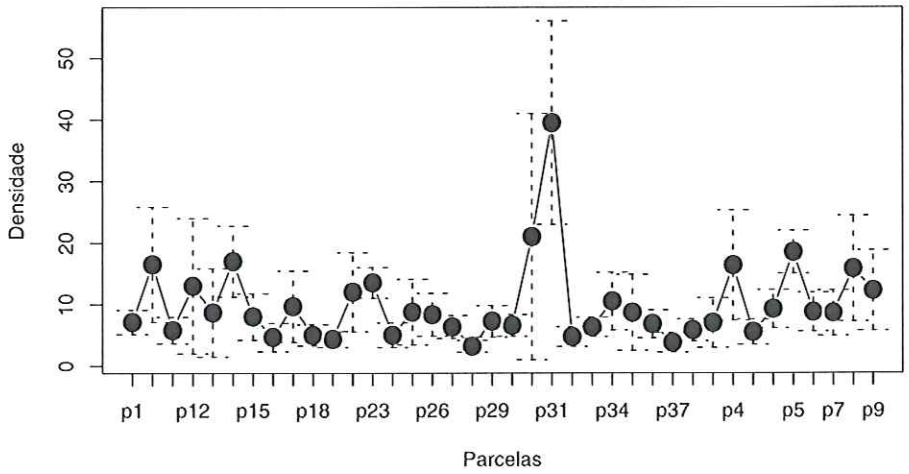

Figura 4.17: Gráfico de médias de densidades de plantas daninhas por parcela.

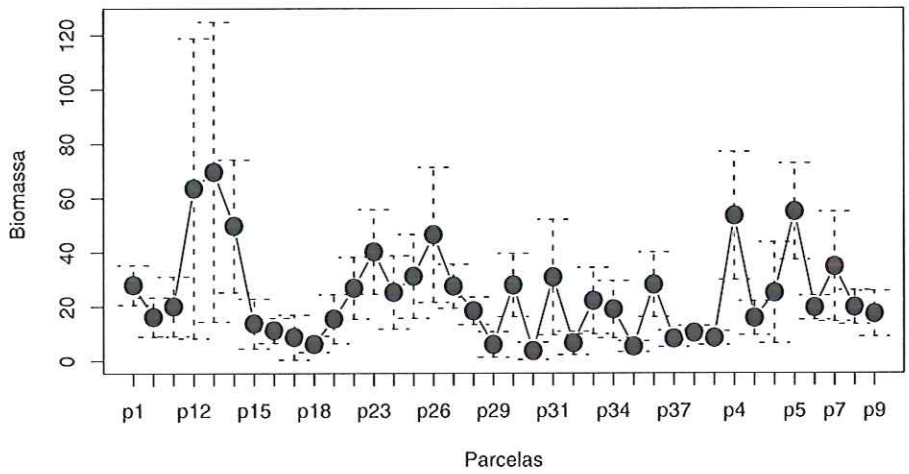

Figura 4.18: Gráfico de médias de biomassas de plantas daninhas por parcela.

xima 0,611156053 ocorrida na parcela 9.

Um resumo dos valores das variáveis escolhidas para a escolha do modelo a ser ajustado está na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resumo dos valores das variáveis.

variável	densidade	biomassa	perda
mínimo	7,27	15	0,01599
1^o quantil	61,92	26	0,30980
mediana	87,19	34,5	0,36493
média	95,85	38,16	0,36448
3^o quantil	133,83	45,25	0,424924
máximo	233,71	98	0,61116

4.6 Ajuste dos modelos

Os modelos ajustados nesta seção são lineares, hiperbólicos e sigmóides, pois estes descrevem situações que podem ocorrer biologicamente.

Os modelos lineares ajustados são de regressão linear e linear afim, dados respectivamente por

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \tag{4.1}$$

e

$$Y_i = \beta_1 x_i + \epsilon_i \tag{4.2}$$

onde Y_i é a perda de rendimento, x_i são os valores da variável independente (densidade ou biomassa de plantas daninhas), ϵ_i são os erros aleatórios do modelo β_0 e β_1 são parâmetros do modelo. Os modelos hiperbólicos com um e dois parâmetros, respectivamente, são dados por

$$Y_i = \frac{\theta_1 x_i}{1 + \theta_1 x_i} + \epsilon_i \tag{4.3}$$

e

$$Y_i = \frac{\theta_1 x_i}{1 + \left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right) x_i} + \epsilon_i \tag{4.4}$$

onde θ_1e θ_2 são parâmetros do modelo e Y_i, x_i e ϵ_i já foram definidos.

Os modelos sigmóides com um, dois e três parâmetros, respectivamente, são dados por

$$Y_i = 1 - \left(exp(-x_i^{\theta_1})\right) + \epsilon_i, \tag{4.5}$$

$$Y_i = 1 - exp\left(-\theta_1 x^{\theta_2}\right) + \epsilon_i \tag{4.6}$$

e

$$Y_i = 1 - \frac{\theta_1}{[1 + exp(\theta_2 \theta_3 x_i)]} + \epsilon_i \tag{4.7}$$

onde θ_1, θ_2 e θ_3 são parâmetros do modelo e Y_i, x_i e ϵ_i já foram definidos.

Inicialmente os dados de perdas de rendimento são ajustados em função da densidade de plantas daninhas e, posteriormente, em função da biomassa de plantas daninhas. Os ajustes são feitos com auxílio do aplicativo estatístico R, utilizando o princípio de mínimos quadrados lineares e não lineares.

Para encontrar o modelo que descreva melhor as perdas de rendimento, ou seja, que melhor represente os dados, são feitos ajustes e análise dos modelos ajustados. Esta análise pode ser dividida em gráfica e numérica. A análise gráfica pode sugerir o modelo a ser adotado, a distribuição dos dados, a presença de valores discrepantes e a média dos valores amostrados. A análise numérica refere-se à significância dos parâmetros, análise de resíduos e verificação das análises gráficas.

A análise de resíduos contém a verificação das suposições que são impostas para os erros, ou seja, normalidade da distribuição, média zero e variância cons-

tante. Para verificar a normalidade dos resíduos faz-se o teste de Kolmogorov-Smirnov e as variâncias podem ser analisadas graficamente. A nulidade da média dos valores é garantida pelo método ds mínimos quadrados. Os resíduos analisados são os padronizados. Se os pontos pertencerem ao intervalo $[-2, 2]$ é uma boa indicação de que os resíduos estejam bem ajustados. A análise de variância é feita através da observação do gráfico dos resíduos versus valores ajustados. A situação ideal é que os pontos estejam distribuídos aleatoriamente em torno do valor zero, sem nenhuma observação muito discrepante. Alguns conceitos estatísticos utilizados nesta seção são dados no Apêndice C.

4.6.1 Modelos para Perdas de Rendimento e Densidade de Plantas Daninhas

O gráfico de dispersão de valores de perdas de rendimento e densidade de plantas daninhas na Figura 4.19 não sugere o modelo a ser adotado. Dessa forma, todos os modelos para perdas de rendimento são ajustados com o objetivo de encontrar o modelo que seja estatisticamente significante e é feita a análise dos resíduos deste.

O primeiro critério adotado, para a obtenção de um bom ajuste, foi escolher os modelos que possuem parâmetros significativos ao nível de 5% (os quais apresentam p-valor$< 0,05$) e resíduos que obedeçam as suposições impostas para estes. As Figuras 4.20 e 4.21 são os gráficos de caixas dos dados de densidade de plantas daninhas e perda de rendimento, respectivamente. Estes sugerem que há valores atípicos e a presença destes podem influenciar indevidamente a análise dos modelos de regressão, o que pode ser um sinal de que o modelo falha em captar determinadas características importantes dos dados. Assim, os ajustes são refeitos com a remoção dos valores atípicos.

A conclusão sobre a significância dos parâmetros não é a mesma com a remoção dos valores discrepantes, o que indica que podem ser observações importantes. Como os valores de densidade estão concentrados no intervalo $[20, 60]$ os poucos

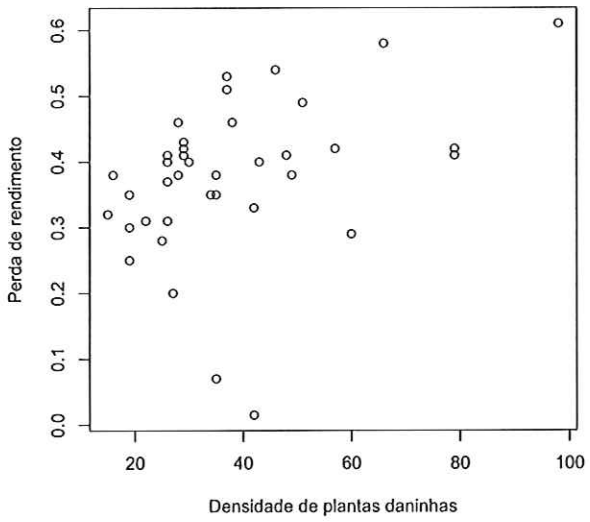

Figura 4.19: Gráfico de dispersão dos valores de perda de rendimento e densidade de plantas daninhas.

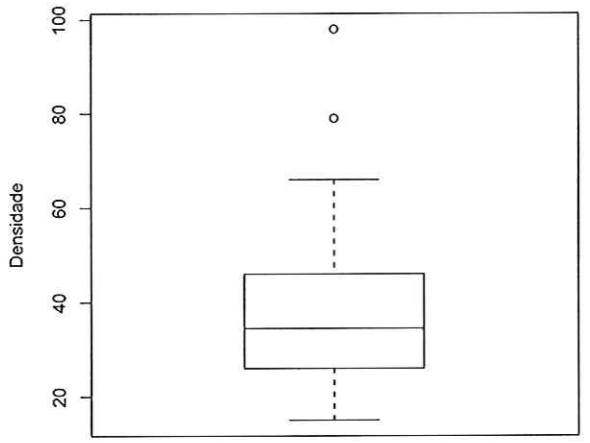

Figura 4.20: Gráfico de caixa para os valores de densidade de plantas daninhas.

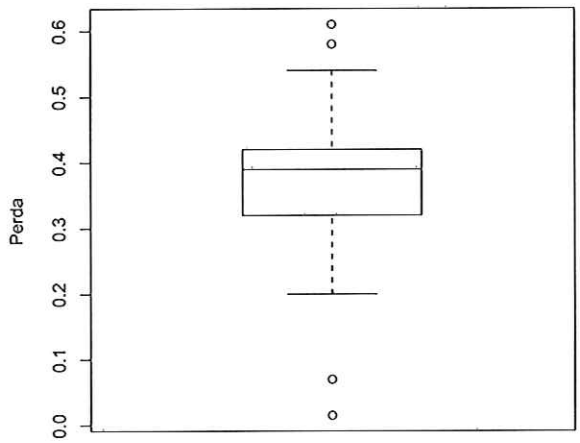

Figura 4.21: Gráfico de caixas para os valores de perdas de rendimento.

valores maiores são diagnosticados como valores discrepantes, mas na realidade podem ser pontos importantes para o ajuste do modelo. Já os dados de perda de rendimento podem ser diagnosticados como valores discrepantes. Dessa forma, os testes são refeitos com a remoção destes valores para os dados de perda de rendimento e os resultados obtidos com o ajuste são exibidos nas Tabelas 4.5 e 4.6 onde as iniciais M, E, t, p, s_e, s, S e g_l indicam o modelo considerado, o valor estimado do(s) parâmetro(s), t-valor, p-valor, erro padrão da estimativa do parâmetro, soma dos quadrados dos resíduos e graus de liberdade dos resíduos $(n-p)$.

O critério de decisão do teste para analisar a significância dos parâmetros dos modelos baseado no p-valor, para um nível de significância $\alpha = 5\%$, indica que, se p-valor$< 0,05$, a hipótese nula deve ser rejeitada, ou seja, aceita-se a hipótese alternativa de significância dos parâmetros. A análise de variância dos resíduos dos modelos (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) e (4.6) é feita pela análise dos gráficos dos erros padronizados versus os valores ajustados nas Figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27. O comportamento aleatório dos resíduos em torno

Tabela 4.5: Resultados dos ajustes dos modelos para perdas de rendimento em função da densidade de plantas daninhas somente com remoção dos valores atípicos de perdas de rendimento.

M	(4.1)	(4.2)	(4.3)	(4.4)
E	$\beta_0 = 0,2865282$	$\beta_1 = 0,00911$	$\theta_1 = 0,019132$	$\theta_1 = 0,03529$
	$\beta_1 = 0,0030772$			$\theta_2 = 0,61534$
t	11,367	16,05	16,83	4,855
	5,196			10,134
p	$3,97e{-}13$	$2e{-}16$	$2e{-}16$	$2,65e{-}05$
	$9,57e{-}06$			$8,29e{-}12$
s_e	0,0252074	0,0005676	0,001137	0,00727
	0,0005923			0,06072
s	0,06713	0,145	0,08197	0,06835
S	0,153214	0,7354424	0,235158	0,1588298
g_l	34	35	35	34

Tabela 4.6: Continuação da Tabela 4.5.

M	(4.5)	(4.6)
E	$\theta_1 = -0,18031$	$\theta_1 = 0,1174254$
		$\theta_2 = 0,4169841$
t	$-11,08$	3,42098
		5,194094
p	$5,36e{-}13$	$< 2e{-}13$
		0,0016
s_e	0,01627	0,0343319
		0,082804
s	0,1073	0,10671
S	0,402989	0,444653
g_l	35	34

do zero pode ser verificado para os modelos (4.4) e (4.6) nas Figuras 4.25 e 4.27, respectivamente.

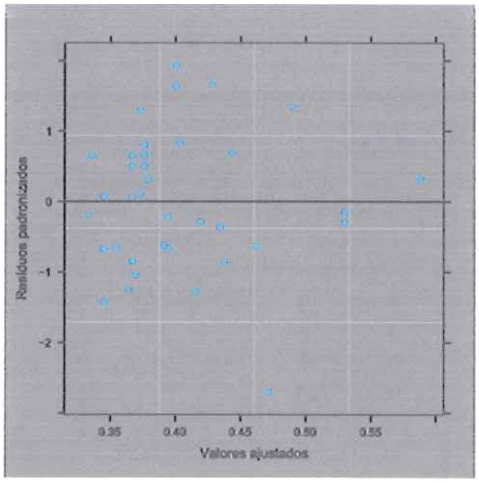

Figura 4.22: Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.1) para a densidade de plantas daninhas.

Os resultados da análise gráfica e numérica dos resíduos padronizados para os modelos (4.4) e (4.6) estão exibidas nas Figuras 4.28, 4.29 e na Tabela 4.7. Os testes de Kolmogorov-Smirnov e teste-t fornecem um p-valor$> 0,05$ e indicam a normalidade e nulidade da média dos resíduos padronizados para os modelos (4.4) e (4.6), os quais já eram garantidos pelo teorema do limite central e pelo critério dos mínimos quadrados, respectivamente.

Tabela 4.7: Resultados da análise de resíduos dos modelos (4.4) e (4.6).

Teste estatístico	(4.4)	(4.6)
Kolmogorov-Smirnov	p-valor$= 0,9263$	p-valor$= 0,9875$
teste-t ($\alpha = 0,05$)	p-valor$= 0,979$	p-valor$= 0,9944$

Os intervalos de confiança para os parâmetros θ_1 e θ_2 do modelo hiperbólico são $[0,0255859; 0,08378125]$ e $[0,4788393; 0,75514789]$, respectivamente. Os intervalos de confiança para os parâmetros θ_1 e θ_2 do modelo sigmóide são $[0,007229913; 0,21184]$ e $[0,2487057; 0,5852625]$, respectivamente. O gráfico dos

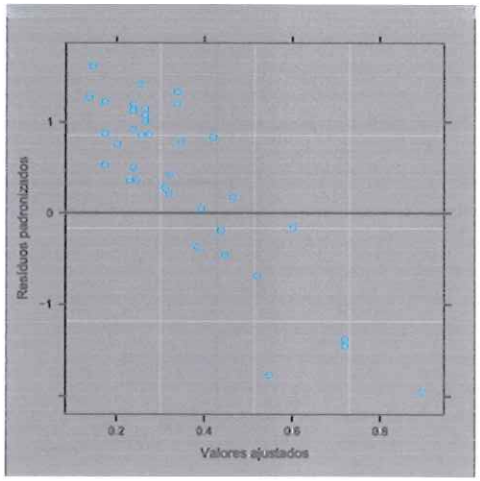

Figura 4.23: Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.2) para a densidade de plantas daninhas.

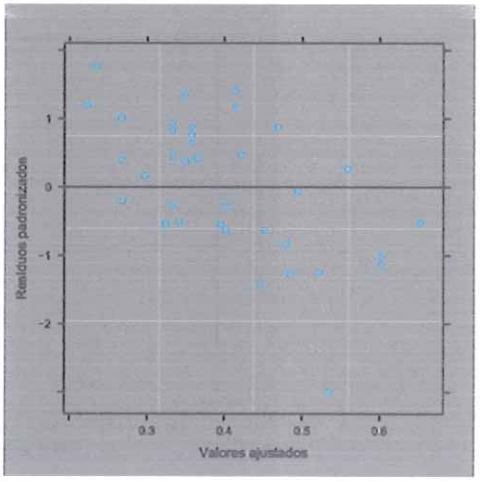

Figura 4.24: Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.3) para a densidade de plantas daninhas.

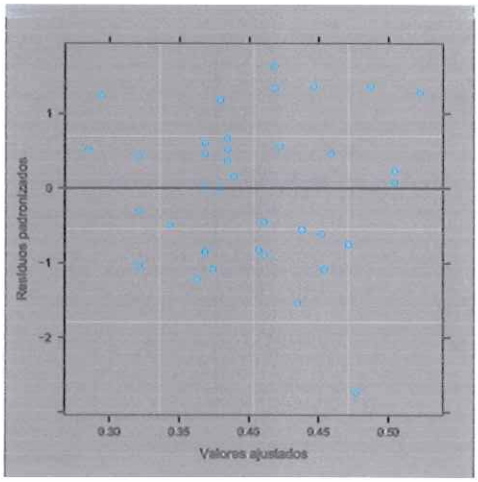

Figura 4.25: Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.4) para a densidade de plantas daninhas.

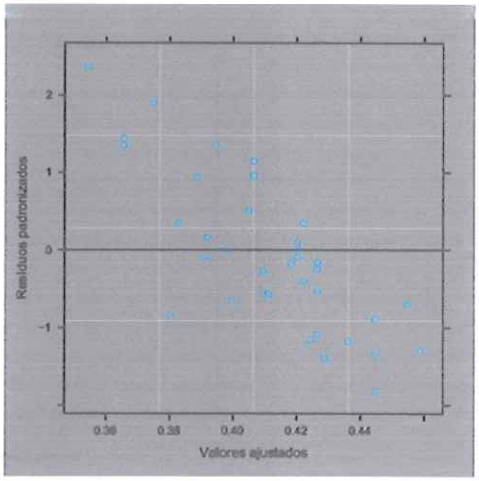

Figura 4.26: Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.5) para a densidade de plantas daninhas.

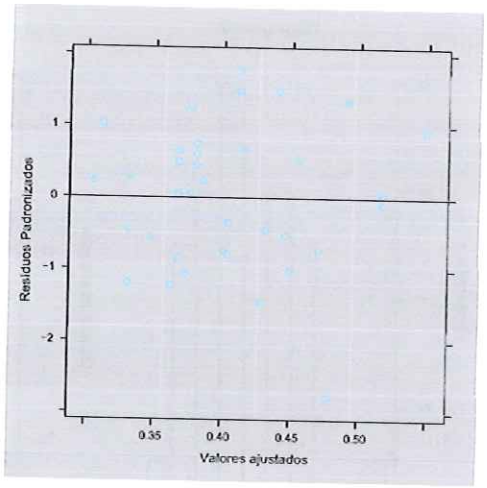

Figura 4.27: Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo (4.6) para a densidade de plantas daninhas.

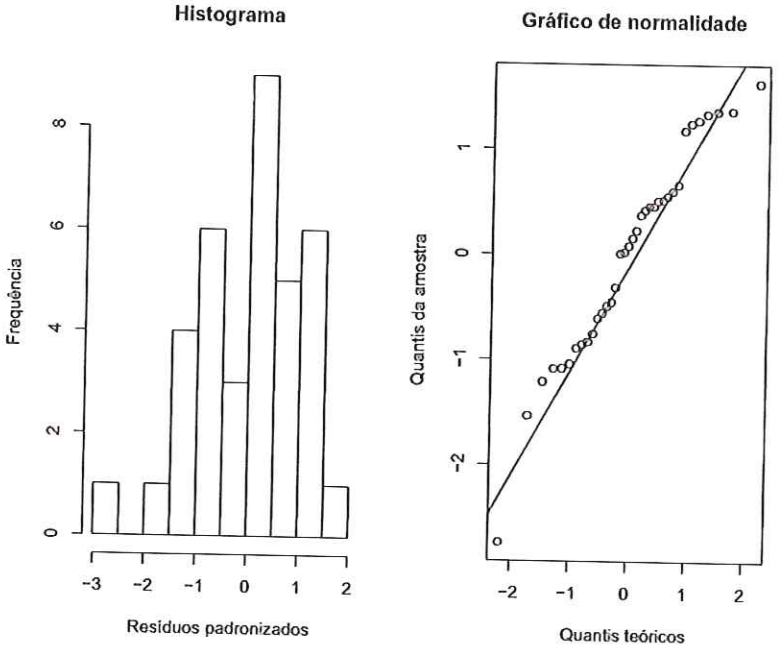

Figura 4.28: Histograma e gráfico de normalidade dos resíduos padronizados do modelo (4.4).

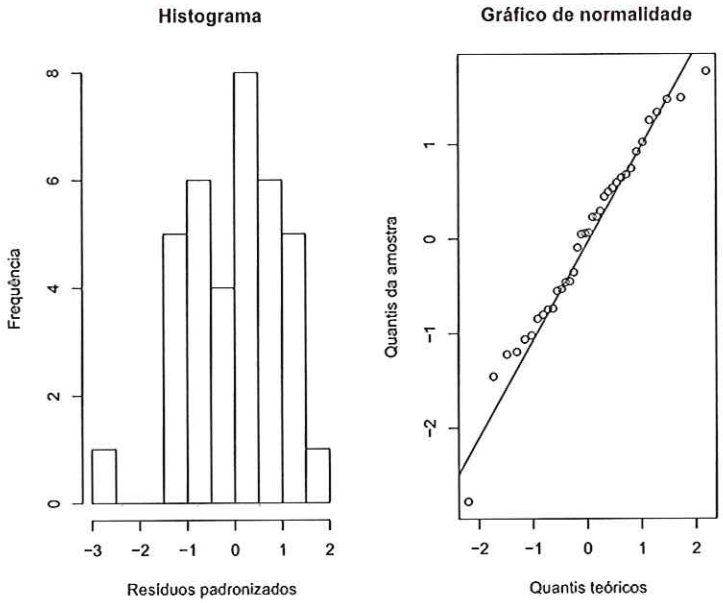

Figura 4.29: Histograma e gráfico de normalidade dos resíduos padronizados do modelo (4.6).

valores das amostras e das respostas do modelo (4.4) e (4.6) estão nas Figuras 4.30 e 4.31, respectivamente.

Os modelos sigmóides e hiperbólicos ajustados apresentaram um bom ajuste estatístico aos dados como pode ser observado nas Tabelas 4.5 e 4.6. A vantagem do ajuste do modelo hiperbólico é por este apresentar uma menor soma dos quadrados dos resíduos e devido ao fato do intervalo de confiança para o parâmetro θ_1 em (4.6) ser relativamente grande.

4.6.2 Modelos para Perdas de Rendimento e Biomassa de Plantas Daninhas

O gráfico de dispersão de valores de perdas de rendimento e biomassa de plantas daninhas na Figura 4.32 parece não sugerir o modelo a ser adotado. Os modelos para perdas de rendimento foram ajustados com o objetivo de encontrar o modelo mais explicativo. Devido a alta variabilidade dos dados de biomassa de plantas

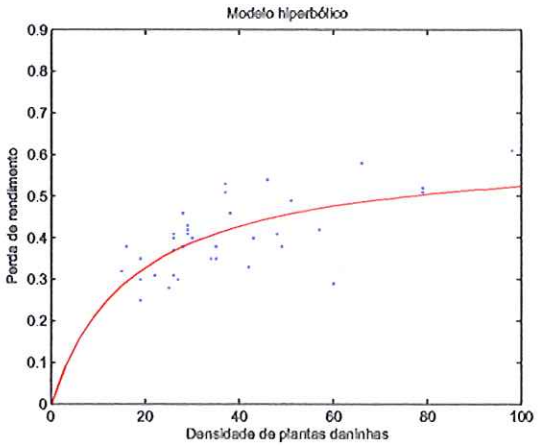

Figura 4.30: Modelo hiperbólico para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas e valores observados.

daninhas, não foi possível encontrar um ajuste adequado para descrever as perdas de rendimento em função desta variável.

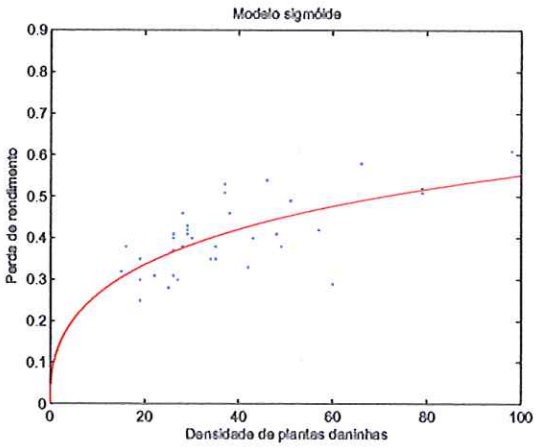

Figura 4.31: Modelo sigmóide para estimativa de perda de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas e valores observados.

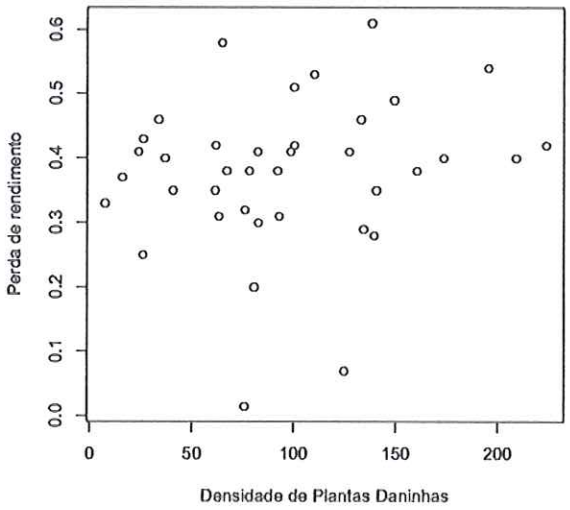

Figura 4.32: Gráfico de dispersão dos valores de perda de rendimento e biomassa de plantas daninhas.

Capítulo 5

Conclusões

Análises da influência competitiva entre plantas daninhas e cultura podem prover informações úteis para o desenvolvimento de estratégias de controle dessas plantas invasoras. Diferentes variações nas características e entradas de um sistema podem ser analisadas através do comportamento das respostas dos modelos matemáticos e de análises estatísticas.

Os modelos matemáticos para perda de rendimento foram desenvolvidos para descrever e estimar os efeitos das plantas daninhas na cultura. Na literatura, estes modelos são lineares e não lineares. Os não lineares possuem formas quadrática, cúbica, sigmóide e hiperbólica, sendo que os modelos quadráticos e cúbicos são modelos não lineares polinomiais e os modelos sigmóides e hiperbólicos são modelos de regressão não linear. Dependendo do conjunto de dados amostrais uma das formas citadas pode representar melhor o que ocorre biologicamente e se ajustar melhor matematicamente aos dados.

A forma linear para o modelo matemático de perda de rendimento sugere que as perdas aumentam com o nível de infestação. Se o modelo possuir um coeficiente angular inferior ao coeficiente angular da reta representada pela bissetriz do primeiro quadrante as perdas de rendimento são inferiores se forem comparadas com coeficientes angulares superiores ao da reta bissetriz. Os modelos lineares para perda de rendimento são mais adequados para representar situações de baixo

nível de infestação por plantas daninhas, pois com o aumento da densidade, as plantas começam a se sobrepor . Devido à competição intra-específica as perdas de rendimento tendem a se estabilizar. Assim, no início da interferência entre as plantas daninhas e da cultura a competição interespecífica por água e nutrientes acarreta reduções crescentes nas perdas de rendimento. Em um certo ponto desta interferência, as plantas começam a competir por luz e espaço e desta forma inicia-se a competição intra-específica e a forma do modelo para perda de rendimento não deve ser mais a forma linear. Por outro lado, a forma hiperbólica para descrever a perda de rendimento reflete o efeito da competição intra-específica com o aumento do nível de infestação (Cousens, 1985b). Biologicamente o modelo hiperbólico representa o aumento das perdas de rendimento com o aumento inicial do nível de infestação e a conseqüente competição interespecífica (no início da interferência a forma hiperbólica se aproxima de uma forma linear) e com o aumento do nível de infestação e conseqüente competição intra-específica as perdas de rendimento tendem a se estabilizar.

Em Chemale e Fleck (1982), a mesma análise biológica dada em Cousens (1985b) é feita, entretanto o modelo matemático quadrático para perdas de rendimento não descreve a estabilização das perdas, sugerindo que no ponto de inflexão do modelo (2.8) as perdas de rendimento tendem a uma redução quando o nível de infestação aumenta. Assim, o modelo (2.8) apesar de apresentar um bom ajuste matemático aos dados segundo Chemale e Fleck (1982), as repostas do modelo não refletem a interpretação biológica comentada acima.

O modelo cúbico (2.5) para estimar as perdas de rendimento sugere que no início da interferência, a perda aproxima-se da forma linear, possuindo dois pontos de inflexão. Esse modelo sugere que em altas densidades de plantas daninhas as perdas de rendimento tendem a aumentar novamente (segundo ponto de inflexão da curva).

O modelo sigmóide (2.46), parte da suposição que em baixas densidades de plantas daninhas, as perdas de rendimento não são significativas. Esse modelo pode ser mais adequado quando as espécies de plantas daninhas infestantes são

menos competitivas ou para situações onde haja boas condições ambientais em baixos níveis de infestação. Esta característica biológica é representada no modelo sigmóide que possui um ponto de inflexão (que representa o limite inferior) e a estabilização para as perdas de rendimento (que representa um limite superior). Segundo Ngouajio et al. (1999), os modelos hiperbólicos descrevem um rendimento assintótico para altos níveis de infestações de plantas daninhas, o que pode resultar em uma superestimação do impacto das plantas daninhas, indicando assim, baixo nível de controle. O modelo sigmóide descreve dois rendimentos assintóticos.

A forma para o modelo matemático de perda de rendimento mais freqüente na literatura tem sido a hiperbólica, pois do ponto de vista biológico, as espécies daninhas geralmente apresentam elevado grau de competitividade, englobando assim, a maioria das espécies infestantes. Outro fato é que nem sempre as condições ambientais são propícias, ocorrendo estresse por déficit hídrico, quantidade limitada de nutrientes do solo, espaço e luz limitados, o que pode tornar o modelo hiperbólico mais abrangente.

Embora os modelos para perdas de rendimento presentes na literatura apresentem bons ajustes matemáticos aos dados experimentais, a interpretação biológica é importante para decidir se o modelo é adequado ou não para representar uma situação real. O modelo quadrático é inadequado, pois biologicamente este modelo sugere que o aumento na densidade de plantas provoca uma redução nas perdas de rendimento. No modelo cúbico, no início da competição entre plantas, as perdas de rendimento aumentam quase linearmente, posteriormente atingem um patamar, como no modelo hiperbólico, para em seguida começarem a aumentar novamente sem que ocorra a estabilização dessas em altas densidades de plantas. Sendo assim, apenas os modelos lineares, sigmóides e hiperbólicos refletem situações que podem ocorrer biologicamente, sendo o último mais abrangente, como descrito anteriormente.

Utilizando os modelos matemáticos presentes na literatura foi feito neste trabalho o ajuste destes para descrever o comportamento das perdas de rendimento

da cultivar de milho BRS1030 acarretada pela infestação de dezoito espécies daninhas.

Os modelos para perdas de rendimento e densidade de plantas daninhas ajustados com parâmetros significativos considerando as hipóteses sobre os erros foram os modelos linear, hiperbólico e sigmóide. As características que favorecem a escolha dos modelos linear e hiperbólico estão associadas à menor soma de quadrados de resíduos e menor intervalo de confiança obtidos para os parâmetros em relação ao modelo sigmóide e, ao ponto de inflexão deste último modelo estar associado a valores da variável independente que não pertencem ao conjunto de observações. Considerando o fato de que o modelo hiperbólico e sigmóide diferem principalmente no início da interferência entre as plantas e que não havia observações de baixos valores de densidade ou biomassa pode-se concluir que tanto os modelos linear e hiperbólico quanto o modelo sigmóide se ajusta aos dados do experimento utilizados. Dessa forma, pode-se concluir que os modelos linear, hiperbólico e sigmóide são bons representantes das perdas de rendimento na cultura no intervalo de densidade explorado neste trabalho.

Devido à alta variabilidade dos dados de biomassa de plantas daninhas, não foi possível encontrar um ajuste adequado para descrever as perdas de rendimento em função desta variável. Assim, conclui-se que a variável densidade descreveu melhor a perda de rendimento.

Os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados somente serão válidos para a cultivar de milho BRS1030 quando as condições de solo, manejo, espécies infestantes, entre outras, forem semelhantes ao do experimento realizado. Detalhes sobre as condições ambientais durante o período em que foi conduzido o experimento estão no Apêndice E.

No experimento conduzido para a realização deste trabalho, as plantas daninhas geraram do banco de sementes existentes no solo. As parcelas experimentais na periferia do pivô e na parte superior do pivô, como na Figura 3.3, apresentam maior diversidade de espécies, onde as parcelas 9, 8, 31, 10, 2 e 1 possuem 6%, 5%, 5% , 4%, 4% e 4%, respectivamente, das espécies infestantes. O mentrasto,

capim colchão, capim marmelada e trapoeraba representam 25%, 23%, 14% e 11% , da ocupação da área experimental, respectivamente.

No experimento não houve controle do crescimento das plantas, assim não foi possível obter baixos valores de densidade e biomassa, ou seja, valores que representassem o início da interferência entre as plantas e as consequentes perdas de rendimento para estes. Para obter valores em baixas densidade de plantas é necessário ter um controle do experimento, pois em campo nem sempre há locais com baixas densidades de plantas daninhas.

Observou-se que a espessura do diâmetro do colmo da cultivar está associada à perdas de colheita e produtividade. Uma das características do milho BRS1030 é a boa resistência ao acamamento e ao quebramento do colmo. Neste trabalho conclui-se que a interferência de plantas daninhas na cultivar do milho BRS1030, para a área onde o experimento foi conduzido, acarretou redução de aproximadamente 17% na espessura das plantas da cultivar. A altura da cultivar também foi influenciada por plantas daninhas, sendo que as plantas que não sofreram tratamentos com herbicidas são aproximadamente $4,5\%$ maiores do que as plantas que sofreram tratamentos com herbicidas.

As análises de correlação entre densidade e biomassa de plantas daninhas indicaram que estas estão associadas quando são considerados valores para cada espécie nas parcelas e indicaram que não há associação entre as densidades e biomassas de plantas daninhas se for considerado o somatório destas em cada parcela experimental. A cobertura foliar, densidade e biomassa não são correlacionadas com a produção de sementes por plantas daninhas.

5.1 Propostas de Continuidade

Propõe-se como continuidade deste trabalho ajustar modelos matemáticos para a cultura do milho com experimentos controlados, de forma que seja possível descrever o comportamento das perdas de rendimento no início da influência competitiva entre as populações de plantas e determinar as espécies que mais

influenciaram nas perdas de rendimento. Propõe-se, também, analisar como o banco de sementes, de amostras coletadas durante a realização deste experimento, influencia nas perdas de rendimento para o próximo plantio. Finalmente, propõe-se considerar o ajuste de modelos matemáticos às perdas de rendimento sob o enfoque da estatística Bayesiana.

Apêndice A

Estimação dos Parâmetros dos Modelos de Regressão

Obter uma técnica adequada para a estimação dos parâmetros dos modelos reveste-se de grande importância, pois a não disponibilidade de parâmetros confiáveis conduz à obtenção de resultados pouco realistas e até mesmo inúteis. No processo de estimação dos parâmetros dos modelos, procura-se ajustar os dados experimentais a um modelo com um ou mais parâmetros de modo que a discrepância entre o modelo e os dados experimentais seja a mínima possível. A seguir, o critério dos mínimos quadrados para a regressão linear e não linear são apresentados.

A.1 Regressão Linear

Nos modelos lineares, o problema de estimação dos parâmetros resume-se no problema de resolver um sistema de equações lineares com relação a parâmetros desconhecidos. Existe uma solução única e, portanto, obtém-se uma forma analítica de estimação dos parâmetros. Esta solução é a mesma para qualquer modelo e qualquer conjunto de dados.

A regressão linear é subdividida em simples e múltipla. A regressão linear

EESC-USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

simples apresenta apenas uma variável independente e a regressão linear múltipla apresenta mais de uma variável independente (Draper e Smith, 1981).

Um modelo de regressão linear múltipla é representado por

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + ... + \beta_p x_{ip} + \epsilon_i \tag{A.1}$$

onde $Y_i, i = 1, 2, ..., n$ representa a variável dependente, $x_{i1}, ..., x_{ip}$ são variáveis independentes, β é o vetor de parâmetros, ϵ_i é o erro ou resíduo do modelo descrito por um processo estocástico e os subscritos n e p representam, respectivamente, o número de amostras e o número de parâmetros do modelo.

As suposições feitas sobre o modelo são

- $\epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$,
- ϵ_i são não correlacionados e independentes,
- $Var(y_i) = Var(\epsilon_i) = \sigma^2$.

O erro de estimação, ou resíduo, pode ser calculado por

$$\epsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - \left[\beta_0 + \sum_{j=1}^{p} \beta_j x_{ij}\right]. \tag{A.2}$$

Para encontrar uma estimativa para os parâmetros do modelo utilizando o critério dos mínimos quadrados, deve-se encontrar um valor de β que minimize a função da soma dos quadrados dos erros denotada $S(\beta)$ dada por

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^{n} \left[Y_i - \left(\beta_0 + \sum_{j=1}^{p} \beta_j x_{ij}\right)\right]^2. \tag{A.3}$$

A partir da função a ser minimizada (A.3), é preciso derivar e igualar a zero, obtendo assim as equações normais, com a finalidade de encontrar a solução mínima. Em notação matricial, tem-se o modelo de regressão linear

$$Y = X\beta + \epsilon \tag{A.4}$$

$$\text{onde } Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}_{n\times 1}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix}_{(p+1)\times 1}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}_{n\times(p+1)},$$

$$\text{e } \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}_{n\times 1}.$$

Assim,

$$\begin{aligned} S(\beta) &= \sum_{i=1}^{n} \epsilon_i^2 = [Y - X\beta]'[Y - X\beta] \\ &= Y'Y - Y'X\beta - \beta'X'Y + \beta'X'X\beta \\ &= Y'Y - 2\beta'X'Y + \beta'X'X\beta. \end{aligned} \tag{A.5}$$

Derivando (A.5) em relação a β e igualando a zero obtém-se as equações normais

$$\frac{\partial S(\beta)}{\partial \beta} = -2X'Y + 2(X'X)\beta' = 0 \tag{A.6}$$

$$\text{onde } \hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_p \end{bmatrix}_{n\times 1}. \text{ Assim}$$

$$(X'X)\beta' = X'Y. \tag{A.7}$$

Para $X'X$ inversível, o estimador de β, denotado por $\hat{\beta}$, é dado por

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y. \tag{A.8}$$

Algumas das propriedades dos estimadores de mínimos quadrados, dadas as suposições feitas anteriormente sobre os modelos, são

- o estimador de mínimos quadrados é não enviesado, ou seja, $E[\hat{\beta}] = \beta$,

- a variância do erro denotada σ^2 é constante.

Uma estimativa para σ^2 é dada por

$$s^2 = \frac{S(\beta)}{n-p}. \tag{A.9}$$

onde n representa o número de observações e p o número de parâmetros do modelo.

O caso mais simples de regressão é quando tem-se duas variáveis (uma independente e outra dependente) e a relação entre estas pode ser representada por uma linha reta, que é a regressão linear simples.

Os valores Y_i observados para um mesmo conjunto de valores de x_i selecionados dependem da amostra. O modelo de regressão linear simples com $p = 1$ é obtido a partir de (A.1)

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \tag{A.10}$$

com $x_i := x_{i,1}$.

Os valores de β_0 e β_1 na regressão linear simples podem ser obtidos com o método dos mínimos quadrados diferenciando-se (A.3) em relação β_0 e β_1. Para proceder à minimização há que igualar a derivada da soma dos quadrados dos erros para (A.10) a zero

$$\frac{\partial S(\beta)}{\partial \beta_0} = 0$$

e

$$\frac{\partial S(\beta)}{\partial \beta_1} = 0$$

o que resulta em

$$\hat{\beta_1}^* = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \tag{A.11}$$

e

$$\hat{\beta_0}^* = \frac{1}{n}\left(\sum Y_i - \hat{\beta}_2 - \sum x_i\right) = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}. \tag{A.12}$$

onde $\bar{x}$ é a média de x e $\bar{Y}$ é a média de Y, ou seja

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i,$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y_i.$$

Outra forma de representar (A.12) é

$$\hat{\beta_1}^* = \frac{\sum x_i Y_i - \frac{\sum x_i \sum Y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}. \tag{A.13}$$

O modelo ajustado pode ser representado por

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0^* + \hat{\beta}_1^* x. \tag{A.14}$$

Para modelos lineares, utiliza-se o coeficiente de determinação para avaliar o quanto a regressão feita explica as relações entre os conjuntos de dados. O coeficiente de determinação é dado por

$$R^2 = \frac{SQR}{SQY} = \frac{SQY - SQE}{SQY} = 1 - \left(\frac{SQE}{SQY}\right) \tag{A.15}$$

onde SQE é a soma dos quadrados dos erros ($SQE = \sum(\hat{Y} - Y_i)^2$) e SQR é a soma dos quadrados dos erros de regressão ($SQR = \sum(\hat{Y} - \bar{Y}_i)^2$) e $0 < R^2 < 1$, de modo que a proximidade do um indica que o ajuste é bom. O coeficiente de determinação ajustado é dado por

$$R^2_{aj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p}\right)(1 - R^2) \tag{A.16}$$

Se as suposições sobre os erros são satisfeitas, deve-se calcular os intervalos de confiança para os parâmetros e outro para a resposta estimada em um certo ponto x_0.

A.1.1 Intervalos de Confiança

O intervalo de confiança para β_0 e β_1 do modelo (A.10) são dados respectivamente por (Draper e Smith, 1981)

$$\hat{\beta}_0^* \pm t_{(\frac{\alpha}{2},n-2)} se(\beta_0) \tag{A.17}$$

e

$$\hat{\beta}_1^* \pm t_{(\frac{\alpha}{2},n-2)} se(\beta_1) \tag{A.18}$$

onde t pode ser encontrado na tabela da distribuição t, $n-2$ são graus de liberdade, $se(\beta_0)$ e $se(\beta_1)$ são erros padrões dados por

$$se(\beta_0) = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n\sum(x_i - \bar{x})^2}} \tag{A.19}$$

e

$$se(\beta_1) = \frac{s}{\sqrt{(x_i - \bar{x})^2}} \tag{A.20}$$

com s sendo a estimativa da variância do erro, x_i representa os valores observados e $\bar{x}$ representa a média do conjunto de valores.

O intervalo de confiança para Y do modelo (A.10) em um certo ponto x_0, ou seja, Y_0, é dado por

$$\hat{Y}_0 \pm t_{\frac{\alpha}{2}(n-2)} se(\hat{Y}) \tag{A.21}$$

onde t já definido e $se(\hat{Y})$ dado por

$$s\left\{\frac{1}{n} + \frac{(x_0\bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}\right\}. \tag{A.22}$$

A.2 Regressão Não Linear

Um modelo de regressão é dito não linear, se é não linear nos seus parâmetros. Isto implica que que as derivadas da função com respeito aos parâmetros envolvem pelo menos um dos parâmetros. O modelo de regressão não linear com p parâmetros

geralmente é apresentado por

$$Y_i = f(x_i, \theta) + \epsilon_i \tag{A.23}$$

onde θ é o vetor de parâmetros pertencente a um subconjunto de $\Re^p$, $f(x_i, \theta)$ é uma função com não linearidades nos parâmetros, Y_i é a variável dependente do modelo x_i é a variável independente do modelo e ϵ_i representa o erro descrito por um processo estocástico.

Nos modelos não lineares, diferentemente dos modelos lineares, o critério dos mínimos quadrados deve ser utilizado com respeito aos parâmetros de regressão não linear para a obtenção de suas estimativas. Assim, nem sempre é possível encontrar formas analíticas para os estimadores de mínimos quadrados, e portanto, a solução das equações normais usualmente requer a utilização de métodos numéricos. A diferença entre o estimador de mínimos quadrados da regressão linear para a regressão não linear é que o estimador dos parâmetros apesar de ser não enviesado, normalmente distribuído e de variância mínima, estes estimadores encontram estas propriedades somente assintoticamente, que é quando o tamanho da amostra tende ao infinito.

O estimador de mínimos quadrados $\widehat{\theta}$ de θ é obtido com valores de θ que minimiza a seguinte soma de quadrados dos resíduos, dada por

$$S(\theta) = \sum [Y_i - f(x_i, \theta)]^2 . \tag{A.24}$$

Para encontrar os valores dos parâmetros de forma a minimizar os erros é preciso derivar (A.24) em relação a $\theta = (\theta_1, ..., \theta_p)$ (p é o número de parâmetros do modelo) para obter as equações normais

$$\frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta} = 0. \tag{A.25}$$

Os métodos numéricos devem ser utilizados para a obtenção da solução das equações normais. Isto tipicamente envolve o uso de um programa computacional,

pois os cálculos podem ser muito extensos (Draper e Smith, 1998).

A.2.1 Métodos Numéricos

Método de Newton-Raphson

Seja $f(\varphi) = S(\varphi)$ uma função descrevendo a soma dos quadrados dos erros em termos dos parâmetros, sendo representados em forma vetorial como

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{bmatrix}.$$

Os ajustes dos parâmetros φ podem ser representados pelo vetor

$$\Delta\varphi = \begin{bmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \Delta\varphi_2 \\ \vdots \\ \Delta\varphi_n \end{bmatrix}.$$

O método de Newton-Raphson é iniciado a partir de uma solução inicial φ_0, que deve ser escolhido de forma a representar uma boa solução inicial. Uma escolha inadequada pode alterar substancialmente o tempo de convergência do método iterativo, ou mesmo levar à divergência. Supõe-se $f(\varphi) \in C^2$, ou seja, a função deve ser duas vezes continuamente diferenciável.

As derivadas parciais de primeira ordem formam o vetor do gradiente, denotado g e é

$$g = \left[\frac{\partial f}{\partial \varphi}\right] \tag{A.26}$$

onde f é uma função, $f : \Re^n \rightarrow \Re^m$ e p é o número de parâmetros e n o número de observações.

As derivadas parciais de segunda ordem, por sua vez, formam a matriz Hessiana H, dada por

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial^2 \varphi_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_1 \varphi_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_1 \varphi_p} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_2 \varphi_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial^2 \varphi_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_2 \varphi_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_p \varphi_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_p \varphi_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial^2 \varphi_p^2} \end{bmatrix}.$$

O método de Newton-Raphson utiliza aproximações da expansão em série de Taylor até a segunda ordem para obter os valores dos parâmetos que minimizem $f(\varphi) = S(\varphi)$. Expandindo a função $f(\varphi)$ em Taylor tem-se

$$f(\varphi + \Delta\varphi) = f(\varphi) + g^T \Delta\varphi + \frac{1}{2}\Delta\varphi^T H \Delta\varphi + ... \tag{A.27}$$

e truncando até os termos de segunda ordem, tem-se:

$$f(\varphi + \Delta\varphi) \approx f(\varphi) + g^T \Delta\varphi + \frac{1}{2}\Delta\varphi^T H \Delta\varphi. \tag{A.28}$$

Expandindo (A.28) tem-se

$$f(\varphi + \Delta\varphi) \approx f(\varphi) + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f(\varphi)}{\partial \varphi_i}\Delta\varphi_i + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \Delta \frac{\partial^2 f(\varphi)\Delta\varphi_j}{\partial \varphi_i \varphi_j}. \tag{A.29}$$

Diferenciando (A.29) com respeito aos parâmetros φ e igualando a zero tem-se

$$\frac{\partial f(\varphi)}{\partial \varphi_1} + \sum_{i=1}^{n} \Delta\varphi_i \frac{\partial^2 f(\varphi)}{\partial \varphi_i \partial \varphi_j} = 0. \tag{A.30}$$

Em forma matricial, (A.30) pode ser escrita como

$$g + H\Delta\varphi = 0. \tag{A.31}$$

Isto conduz à seguinte equação iterativa do método de Newton-Raphson

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k - H_k^{-1} g_k. \tag{A.32}$$

A solução de (A.31) é atualizada de acordo com (A.32) até a sua convergência.

Este método possui convergência quadrática local (Ruggiero e Lopes, 1988) e por isto, se a aproximação inicial do processo não estiver próxima do valor desejado, existe a possibilidade da iteração não convergir ou que esta convirja para outra solução.

Como visto anteriormente, o método dos mínimos quadrados envolve derivação da equação $S(\beta)$ em relação aos parâmetros. Assim, obtidas as equações normais, o método é utilizado para encontrar valores dos parâmetros que minimizem a função de mínimos quadrados. A quantidade de equações normais irá depender do número de parâmetros dos modelos. O algoritmo de Newton-Rapshon é apresentado a seguir.

Algoritmo A.2.1 *Algoritmo de Newton-Rapshon*

1. *selecionar valores iniciais dos parâmetros* $\varphi^{(0)}$ *e um critério de término* ϵ. *Calcular* g_0 *e* H_0. *Se* $\|\varphi_{k+1} - \varphi_k\| \leq \epsilon$, *então terminar o algoritmo. Senão fazer* $k = 0$ *e ir para o passo seguinte.*

2. *calcular* $\varphi_{k+1} = \varphi_k - H_k^{-1} g_k$. *Se* $\|\varphi_{k+1} - \varphi_k\| \leq \epsilon$ *então terminar o algoritmo; senão, calcular* g_{k+1} *e* H_{k+1}, *fazendo* $k = k + 1$ *e voltar ao passo 1.*

O método de Newton-Rapshon possui a desvantagem de ter que obter as derivadas de segunda ordem. Ainda, a convergência do método fica comprometida se a escolha inicial dos valores dos parâmetros ($\varphi^{(0)}$) não estiverem próximos da solução.

Método de Gauss-Newton

O Método de Gauss-Newton, também conhecido com método da linearização (Draper e Smith, 1998), pode ser considerado como um caso especial do método

de Newton-Raphson, onde os termos de segunda ordem da matriz Hessiana são desconsiderados. Este método usa uma expansão em série de Taylor para aproximar o modelo de regressão não linear com termos lineares e, então, utiliza o método de mínimos quadrados ordinário para estimar os parâmetros. Iterações desses passos geralmente conduzem a uma solução para o problema de regressão não linear. Este método inicia dando-se valores iniciais aos parâmetros que podem ser obtidos de estudos anteriores, conhecimentos teóricos ou por uma grade de valores que minimize a soma dos quadrados dos erros. O processo é repetido até que a convergência seja obtida, ou seja, até que o erro seja pequeno a ponto de não acarretar alterações significativas nos parâmetros.

Considere que a função a ser minimizada é a soma dos quadrados dos erros $S(\varphi)$ dada em (A.24). Derivando (A.24) em relação aos parâmetros φ tem-se

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi_i} = \sum_{k=1}^{n} 2F_k(\varphi)\frac{\partial f_i(\varphi)}{\partial \varphi_i}. \tag{A.33}$$

Assim, tem-se

$$g = 2A^T F \tag{A.34}$$

onde $A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial \varphi_1} \\ \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial \varphi_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_p} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_p} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial \varphi_p} \end{bmatrix}$ e $F = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \varphi_1} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \varphi_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial \varphi_p} \end{bmatrix}$. Derivando novamente $\frac{\partial f_k}{\partial \varphi_i}$, tem-se

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_i \partial \varphi_j} = 2\sum_{k=1}^{n} \frac{\partial F_k(\varphi)}{\partial \varphi_i}\frac{\partial F_k(\varphi)}{\varphi_j} + 2\sum_{k=1}^{n} F_k(\varphi)\frac{\partial^2 F_k(\varphi)}{\partial \varphi_i \varphi_j}. \tag{A.35}$$

Desprezando os termos de ordem superior tem-se

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_i \partial \varphi_j} \approx 2\sum_{k=1}^{n} \frac{\partial F_k(\varphi)}{\partial \varphi_i}\frac{\partial F_k(\varphi)}{\varphi_j}. \tag{A.36}$$

A equação (A.36) fornece uma aproximação da matriz Hessiana como segue

$$H \approx 2A^T A \tag{A.37}$$

onde A^T representa a matriz Jacobiana.

Substituindo (A.34) e (A.37) em (A.32) tem-se

$$A\Delta\varphi = -F. \tag{A.38}$$

A equação (A.38) é válida quando o número de equações n é igual ao número de parâmetros p. Para os casos em que $n > p$, se A^TA for inversível, (A.38) pode ser escrita como

$$u = \Delta\varphi = -[A^TA]^{-1}A^TF. \tag{A.39}$$

A correção nos valores de φ a cada iteração k é então realizada fazendo

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + u_k. \tag{A.40}$$

O algoritmo de Gauss-Newton é apresentado a seguir.

Algoritmo A.2.2 *Algoritmo de Gauss-Newton*

1. *selecionar valores iniciais aos parâmetros $\varphi^{(0)}$ e um critério de término ϵ. Calcular u_0 . Se $\|\varphi_{k+1} - \varphi_k\| \leq \epsilon$, então terminar o algoritmo. Senão fazer $k = 0$ e ir para o passo seguinte.*

2. *calcular $\varphi_{k+1} = \varphi_k + u_k$. Se $\|\varphi_{k+1} - \varphi_k\| \leq \epsilon$ então terminar o algoritmo; senão, calcular u_{k+1}, fazendo $k = k + 1$ e voltar ao passo 1.*

A vantagem do método de Gauss-Newton é a convergência quadrática local em problemas com resíduos nulos e convergência local rápida em problemas com não linearidades e resíduos razoavelmente pequenos. A desvantagem é a convergência linear local lenta em problemas não lineares com resíduos grandes. Outro problema refere-se à inversão da matriz A^TA pois, pode aparecer problemas de singularidade.

Método de Levenberg-Marquardt

O método de Levenberg-Marquardt procura resolver o problema de singularidade da matriz A^TA. É essencial adotar uma estratégia alternativa quando ocorre este tipo de problema. Este método modifica a matriz que deve ser invertida de forma a evitar o problema, acrescentando o termo μI ($\mu > 0$ e I é a matriz identidade), resultando em

$$(A^TA + \mu I)_k u_k = -(A^T)_k F_k. \tag{A.41}$$

Esta modificação altera apenas os componentes a_{ii} da diagonal principal de A^TA, resultando em componentes modificados a'_{ii} de forma que $a'_{ii} = a_{ii}(1 + \mu)$.

A escolha do valor do parâmetro μ está associada com o traço da matriz A^TA

$$\mu = \|t_r(A'A)\|. \tag{A.42}$$

Algoritmo A.2.3 *Algoritmo de Levenberg-Marquardt*

1. *selecionar valores iniciais aos parâmetros $\varphi^{(0)}$ e um critério de término ϵ. Calcular u_0 . Se $\|\varphi_{k+1} - \varphi_k\| \leq \epsilon$, então terminar o algoritmo. Senão fazer $k = 0$ e ir para o passo seguinte.*

2. *calcular $\varphi_{k+1} = \varphi_k + u_k$. Se $\|\varphi_{k+1} - \varphi_k\| \leq \epsilon$ então terminar o algoritmo; senão, calcular u_{k+1}, fazendo $k = k + 1$ e volta ao passo 1.*

A maioria dos algoritmos que são utilizados para a estimação dos parâmetros são aproximações do método clássico de Newton-Raphson. Não existe um procedimento iterativo que seja superior a todos os outros para todos os problemas, o que existe são certas classes de algoritmos que são, em geral, mais eficientes para determinados tipos de problemas.

Como no caso da regressão linear, após estimar os parâmetros dos modelos, testar sua significância, analisar se os resíduos atende as suposições impostas

é preciso fazer o intervalo de confiança para os parâmetros e para estimação realizada.

A.2.2 Intervalos de Confiança

Os intervalos de confiança para os modelos não lineares são assintóticos. Intervalos de confiança para funções não lineares de θ, $f(\theta)$, podem ser construídos utilizando a teoria assintótica e a expansão linear em série de Taylor de $f(\theta)$

$$f(\hat{\theta}) \approx f(\theta) + f'(\hat{\theta} - \theta) \tag{A.43}$$

onde $f' = \left(\frac{\partial f}{\partial \theta_1}, \frac{\partial f}{\partial \theta_2}, ..., \frac{\partial f}{\partial \theta_p}\right)$. Um intervalo de confiança com nível de significância α aproximado para $f(\theta)$ é dado por (Favoretti, 1995)

$$f(\hat{\theta}) \approx t_{\frac{\alpha}{2}(n-p)} s((f'(\hat{\theta}))C^{-1}f(\hat{\theta}))^{\frac{1}{2}} \tag{A.44}$$

onde $s = \frac{(Y-f(\hat{\theta}))^2}{n-p}$ é um estimador não enviesado de σ, e $C = \left[\left(\frac{\partial f_i(\theta)}{\partial \theta_j}\right)\right]' \left[\left(\frac{\partial f_i(\theta)}{\partial \theta_j}\right)\right]$ com $j = 1, 2, ..., p$.

O intervalo de confiança para $\theta = (\theta_0, \theta_1, ..., \theta_{p-1})$ é dado por (Favoretti, 1995)

$$\hat{\theta}_j \pm t_{\frac{\alpha}{2}(n-p)} s\sqrt{c_{jj}} \tag{A.45}$$

onde c_{jj} é o j-ésimo elemento da matriz dada por C^{-1}, t e s já foram definidos.

Utilizando resultados da teoria assintótica, o intervalo de confiança aproximado para Y_0 é dado por (Favoretti, 1995)

$$\hat{Y_0} \pm t_{\frac{\alpha}{2}(n-p)} s\left[1 + f_0' C^{-1} f_0\right] \tag{A.46}$$

onde $f_0' = \left(\frac{\partial f(x_0;\theta)}{\partial \theta_1}, \frac{\partial f(x_0;\theta)}{\partial \theta_2}, \ldots \frac{\partial f(x_0;\theta)}{\partial \theta_p}\right)$, t, s e C já foram definidos.

A.2.3 Linearização dos Modelos de Perda de Rendimento

Os modelos para perdas de rendimento não lineares podem ser linearizados. A linearização de um modelo pode facilitar a obtenção das estimativas dos parâmetros. Para Gomez e Gomez (1984), usar a técnica de linearização para os modelos não lineares é importante por ser uma técnica simples e por ser possível aplicar as técnicas de regressão linear. As tranformações nos parâmetros dos modelos apenas transformam os parâmetros, mas as transformações dos dados acarretam a transformação dos erros, o que afeta a suposição que é feita sobre estes. As suposições feitas, portanto, podem não ser apropriadas para os erros transformados. Porém, mesmo que as estimativas obtidas não forneçam bons ajustes para os dados é possível utilizar estas como valores iniciais dos métodos utilizados de regressão não linear, e assim, obter bons valores iniciais para os parâmetros. É possível linearizar os modelos utilizando mudanças de variáveis ou utilizando a expansão em série de Taylor (Gomez e Gomez, 1984).

Exemplos de Linearização dos Modelos Hiperbólicos de Perda de Rendimento

A linearização dos modelos hiperbólicos é feita utilizando a técnica descrita em Gomez e Gomez (1984) (mudança de variáveis) de transformação recíproca e a técnica descrita em Draper e Smith (1998) (expansão em série de Taylor).

Considere o modelo hiperbólico de perda de rendimento em termos da densidade ou da biomassa de plantas daninhas como em (2.18). Invertendo os termos, obtém-se (Gomez e Gomez, 1984)

$$\frac{1}{Pr} = \frac{1 + (\frac{a}{b})\xi_1}{a\xi_1} \tag{A.47}$$

o que resulta em

$$\frac{1}{Pr} = \frac{1}{a}\frac{1}{\xi_1} + \frac{1}{b}. \tag{A.48}$$

Fazendo mudanças de variáveis $\frac{1}{Pr} = Y$, $\frac{1}{b} = \beta_0$, $\frac{1}{a} = \beta_1$ e $\frac{1}{\xi_1} = x$, obtém-se o

modelo linearizado

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x. \tag{A.49}$$

Considere agora o modelo de perda de rendimento em termos de variável foliar relativa de daninhas (área, cobertura e volume) como em (2.34). Invertendo os termos, obtém-se

$$\frac{1}{Pr} = \frac{1 + (q-1)\xi_2}{q\xi_2} \tag{A.50}$$

o que resulta em

$$\frac{1}{Pr} = \frac{1}{q}\frac{1}{\xi_2} + 1 - \frac{1}{q}. \tag{A.51}$$

Fazendo mudanças de variáveis $\frac{1}{Pr} = Y$, $\frac{1}{q} = \beta_1$ e $\frac{1}{\xi_2} = x$ obtém-se o modelo linearizado

$$Y = \beta_1 x - \beta_1 \Rightarrow Y = \beta_1(x-1) + 1. \tag{A.52}$$

Substituindo $(x-1)$ por $V = -(x-1)$ (para obter respostas positivas) obtém-se

$$Y = \beta_1 V + 1. \tag{A.53}$$

Considere agora o modelo de perda de rendimento como em (2.36). Invertendo os termos, obtém-se

$$\frac{1}{Pr} = \frac{1 + (\frac{q}{m} - 1)\xi_2}{q\xi_2} \tag{A.54}$$

o que resulta em

$$\frac{1}{Pr} = \frac{1}{q}\frac{1}{\xi_2} + \frac{1}{m} - \frac{1}{q}. \tag{A.55}$$

Fazendo mudanças de variáveis $\frac{1}{Pr} = Y$, $\frac{1}{q} = \beta_1$, $\frac{1}{m} = \beta_0$ e $\frac{1}{\xi_2} = x$, obtém-se o modelo

$$Y = \beta_1 x - \beta_1 + \beta_0 \tag{A.56}$$

que pode ser escrito como

$$Y = \beta_1(x - 1) + \beta_0. \tag{A.57}$$

Substituindo $(x - 1)$ por $V = -(x - 1)$ tem-se finalmente o modelo linearizado

$$Y = \beta_0 + \beta_1 V. \tag{A.58}$$

Agora, linearizando os modelos descritos acima utilizando a série de Taylor de primeira ordem, em torno dos valores iniciais β_0, obtém-se

$$P_r(\xi_u, \beta) = P_r(\xi_u, \beta_0) + \sum_{i=1}^{p} \left[\frac{\partial P_r(\xi_u, \beta)}{\partial \beta_i}\right]_{\beta=\beta_0} (\beta_i - \beta_{i0}) \tag{A.59}$$

onde $u = 1, 2$, $\beta_{i0}, i = 1, 2, ..., p$ representa os valores iniciais de $\beta_1, \beta_2, ..., \beta_p$ e $\beta_0 = (\beta_{10}, \beta_{20}, ..., \beta_{p0})'$.

Apêndice B

Tabelas dos Dados Coletados no Campo Experimental

Tabela B.1: Densidade de plantas por m^2 por espécies em cada parcela.

Parcela	Densidade	Espécie
1	7	braquiária
1	15	capim colchão
1	7	capim marmelada
1	15	timbête
1	2	erva de touro
1	8	mentrasto
1	2	erva de santa luzia
1	1	sorgo selvagem
2	37	capim colchão
2	10	capim marmelada
2	3	capim guiné
2	2	trapoeraba
2	8	caruru
3	6	caruru
3	3	timbête
3	15	sorgo selvagem
3	2	capim colchão
3	9	braquiária
3	8	picão preto
3	3	capim marmelada
4	34	trapoeraba
4	5	caruru
4	10	capim marmelada
5	15	capim marmelada
5	22	trapoeraba
6	4	sorgo selvagem
6	18	capim marmelada
6	6	trapoeraba
6	7	capim colchão
7	19	capim marmelada
7	16	capimcolchão
7	2	sorgo selvagem
7	4	erva de santa luzia
7	2	mentrasto
8	8	braquiária
8	15	capim colchão
8	49	mentrasto
8	6	erva quente
8	1	leiteiro
9	55	picão preto
9	4	capim colchão
9	1	capim guiné
9	11	timbête
9	20	mentrasto
9	1	trapoeraba
9	3	capim marmelada
9	3	braquiária
10	44	mentrasto
10	12	capim colchão
10	7	caruru
10	3	trapoeraba

Tabela B.2: Densidade de plantas por m^2 por espécies em cada parcela (continuação).

Parcela	Densidade	Espécie
11	10	capim colchão
11	12	capim marmelada
11	2	mentrasto
11	3	trapoeraba
11	2	capim guiné
12	24	trapoeraba
12	2	capim marmelada
13	23	capim marmelada
13	2	sorgo selvagem
13	1	mentrasto
14	17	trapoeraba
14	7	capim marmelada
14	27	capim colchão
15	26	capim colchão
15	9	leiteiro
15	1	poaia
15	3	capim marmelada
15	5	timbête
15	4	mentrasto
16	16	capim colchão
16	3	capim marmelada
16	1	trapoeraba
16	2	botão de ouro
16	4	leiteiro
16	2	capim pé de galinha
17	21	trapoeraba
17	6	botão de ouro
17	2	caruru
18	13	capim colchão
18	1	capim pé de galinha
18	5	capim marmelada
18	5	leiteiro
18	4	caruru
18	2	trapoeraba
19	8	capim marmelada
19	3	capim colchão
19	1	capim guiné
19	8	mantrasto
19	5	leiteiro
19	1	trapoeraba
20	14	capim colchão
20	21	mentrasto
20	4	capim marmeldada
20	2	leiteiro
21	13	leiteiro
21	9	capim colchão
21	22	mentrasto
21	2	timbête
22	23	capim marmelada
22	2	poaia
22	1	capim colchão
23	16	capim colchão
23	11	capim guiné

Tabela B.3: Densidade de plantas por m^2 por espécies em cada parcela (continuação).

Parcela	Densidade	Espécie
24	3	capim colchão
24	3	capim guiné
24	9	capim marmelada
25	24	capim colchão
25	8	trapoeraba
25	2	picão preto
25	1	capim marmelada
26	14	capim colchão
26	9	capim marmelada
26	2	picão preto
27	5	capim colchão
27	10	capim marmelada
27	4	capim guiné
28	6	capim colchão
28	4	capim marmelada
28	1	capim guiné
28	1	leiteiro
28	4	timbête
29	13	capim colchão
29	4	picão preto
29	10	mentrasto
29	2	capim marmelada
30	41	mantrasto
30	1	picão preto
31	23	capim guiné
31	56	tiririca
32	8	capim guiné
32	2	trapoeraba
32	7	mantrasto
32	2	erva de santa luzia
33	4	capim marmelada
33	10	mentrasto
33	12	sorgo selvagem
33	3	leiteiro
33	3	capim colchão
33	6	capim guiné
34	22	mentrasto
34	5	capim colchão
34	14	capim guiné
34	1	capim marmelada
35	21	mentrasto
35	2	capim guiné
35	3	picão preto
36	10	capim colchão
36	2	leiteiro
36	5	capim marmelada
36	3	capim guiné
36	14	mantrasto
37	2	capim marmelada
37	10	mentrasto
37	3	picão preto
37	1	trapoeraba
37	3	capim colchão

Tabela B.4: Densidade de plantas por m^2 por espécies em cada parcela (continuação).

Parcela	Densidade	Espécie
38	4	capim marmelada
38	4	trapoeraba
38	4	leiteiro
38	13	mentrasto
38	9	capim colchão
38	1	caruru
39	19	mentrasto
39	2	capim marmelada
39	4	capim colchão
39	3	trapoeraba
40	9	capim colchão
40	2	capim marmelada
40	9	trapoeraba
40	2	capim guiné
41	16	trapoeraba
41	9	capim colchão
41	11	mentrasto
41	1	leiteiro

Tabela B.5: Biomassa de plantas por m^2 para cada espécie daninha por parcela.

Parcela	Biomassa	Espécie
1	58,96	braquiária
1	27,85	capim colchão
1	36,13	capim marmelada
1	55,72	timbête
1	6,42	erva de touro
1	13,36	mentrasto
1	7,24	erva de santa luzia
1	18,03	sorgo selvagem
2	65,48	capim colchão
2	38,41	capim marmelada
2	17,19	capim guiné
2	11,57	trapoeraba
2	1,48	caruru
3	14,42	caruru
3	14,78	timbête
3	95,65	sorgo selvagem
3	10,12	capim colchão
3	28,7	braquiária
3	6,62	picão preto
3	25,04	capim marmelada
4	93,05	trapoeraba
4	11,39	caruru
4	55,89	capim marmelada
5	72,73	capim marmelada
5	37,22	trapoeraba
6	26,4	sorgo selvagem
6	10,86	capim marmelada
6	28,11	trapoeraba
6	12,76	capim colchão
7	111,34	capim marmelada
7	38,59	capimcolchão
7	15,18	sorgo selvagem
7	7,78	erva de santa luzia
7	0,51	mentrasto
8	27,48	braquiária
8	29,32	capim colchão
8	32,22	mentrasto
8	8,56	erva quente
8	0,83	leiteiro
9	75,34	picão preto
9	5,3	capim colchão
9	7,02	capim guiné
9	18,19	timbête
9	8,29	mentrasto
9	10,89	trapoeraba
9	4,97	capim marmelada
9	8,19	braquiária
10	36,63	mentrasto
10	16,25	capim colchão
10	6,82	caruru
10	4,95	trapoeraba

Tabela B.6: Biomassa de plantas por m^2 para cada espécie daninha por parcela (continuação).

Parcela	Biomassa	Espécie
11	37,27	capim colchão
11	54,95	capim marmelada
11	0,54	mentrasto
11	1,35	trapoeraba
11	6,22	capim guiné
12	118,84	trapoeraba
12	8,27	capim marmelada
13	178,76	capim marmelada
13	29,58	sorgo selvagem
13	0,5	mentrasto
14	18,34	trapoeraba
14	32,95	capim marmelada
14	97,87	capim colchão
15	58,87	capim colchão
15	10,48	leiteiro
15	0,06	poaia
15	6,64	capim marmelada
15	5,71	timbête
15	0,3	mentrasto
16	23,42	capim colchão
16	12,05	capim marmelada
16	26,13	trapoeraba
16	0,61	botão de ouro
16	1,33	leiteiro
16	3,32	capim pé de galinha
17	25,24	trapoeraba
17	0,59	botão de ouro
17	0,15	caruru
18	13,21	capim colchão
18	1,22	capim pé de galinha
18	17,61	capim marmelada
18	1,06	leiteiro
18	2,13	caruru
18	1,45	trapoeraba
19	58,85	capim marmelada
19	4,61	capim colchão
19	0,22	capim guiné
19	8,74	mantrasto
19	18,16	leiteiro
19	2,13	trapoeraba
20	48,98	capim colchão
20	2,11	mentrasto
20	12,56	capim marmeldada
20	0,8	leiteiro
21	4,8	leiteiro
21	14,62	capim colchão
21	2,93	mentrasto
21	0,48	timbête
22	168,91	capim marmelada
22	0,03	poaia
22	13,82	capim colchão
23	55,81	capim colchão
23	24,6	capim guiné

Tabela B.7: Biomassa de plantas por m^2 para cada espécie daninha por parcela (continuação).

Parcela	Biomassa	Espécie
24	6,91	capim colchão
24	17,29	capim guiné
24	51,9	capim marmelada
25	73,98	capim colchão
25	23,1	trapoeraba
25	0,14	picão preto
25	27,41	capim marmelada
26	49,92	capim colchão
26	87,68	capim marmelada
26	1,8	picão preto
27	18,26	capim colchão
27	43,62	capim marmelada
27	20,55	capim guiné
28	12,83	capim colchão
28	16,83	capim marmelada
28	31,76	capim guiné
28	3,36	leiteiro
28	27,17	timbête
29	19,99	capim colchão
29	0,4	picão preto
29	0,67	mentrasto
29	2,67	capim marmelada
30	6,8	mantrasto
30	0,47	picão preto
31	52,07	capim guiné
31	9,51	tiririca
32	19,33	capim guiné
32	2,33	trapoeraba
32	3,05	mantrasto
32	1,23	erva de santa luzia
33	11,84	capim marmelada
33	6,92	mentrasto
33	10,88	sorgo selvagem
33	9,96	leiteiro
33	10,02	capim colchão
33	83,31	capim guiné
34	3,29	mentrasto
34	13,57	capim colchão
34	50,01	capim guiné
34	8,83	capim marmelada
35	8,33	mentrasto
35	5,91	capim guiné
35	1,51	picão preto
36	53,81	capim colchão
36	0,24	leiteiro
36	55,65	capim marmelada
36	28,46	capim guiné
36	2,29	mantrasto
37	11,2	capim marmelada
37	1,47	mentrasto
37	18,35	picão preto
37	3,08	trapoeraba
37	6,52	capim colchão

Tabela B.8: Biomassa de plantas por m^2 para cada espécie daninha por parcela (continuação).

Parcela	Biomassa	Espécie
38	17,71	capim marmelada
38	14,21	trapoeraba
38	4,61	leiteiro
38	3,08	mentrasto
38	16,25	capim colchão
38	5,42	caruru
39	8,08	mentrasto
39	10,8	capim marmelada
39	1,44	capim colchão
39	13,22	trapoeraba
40	14,17	capim colchão
40	13,69	capim marmelada
40	32,72	trapoeraba
40	2,37	capim guiné
41	80,07	trapoeraba
41	15,66	capim colchão
41	2,56	mentrasto
41	1,8	leiteiro

Tabela B.9: Biomassa de plantas daninhas.

Parcela	Biomassa total
1	223,71
2	134,13
3	195,33
4	160,33
5	109,95
6	78,13
7	173,4
8	98,41
9	138,19
10	64,65
11	100,33
12	127,11
13	208,84
14	149,16
15	82,06
16	66,92
17	25,98
18	36,68
19	92,71
20	64,45
21	22,83
22	182,76
23	80,41
24	75,79
25	124,63
26	139,4
27	82,43
28	91,95
29	23,73
30	7,27
31	61,58
32	25,94
33	132,93
34	75,7
35	15,75
36	140,45
37	40,62
38	61,28
39	33,54
40	62,95
41	100,09

Tabela B.10: Cobertura vegetal

Parcela	Cobertura vegetal (%)	Folha larga (%)	Folha estreita (Gramínea) (%)
1	70	80	20
2	75	85	15
3	60	70	30
4	60	95	5
5	50	30	70
6	50	30	70
7	55	5	95
8	90	80	20
9	90	70	30
10	90	60	40
11	85	90	10
12	80	95	5
13	90	90	10
14	80	70	30
15	70	10	90
16	20	80	20
17	80	90	10
18	20	80	20
19	40	90	10
20	40	80	20
21	20	80	20
22	95	0	100
23	90	10	90
24	70	20	80
25	60	30	70
26	80	40	60
27	40	10	90
28	20	10	90
29	30	20	80
30	30	80	20
31	50	20	80
32	60	20	80
33	60	30	70
34	80	80	20
35	10	80	20
36	60	80	20
37	40	60	40
38	40	20	80
39	90	20	80
40	60	85	15
41	80	80	20

Tabela B.11: Densidade de sementes por espécies de plantas daninhas e densidade total de sementes em cada parcela. Espécie 1: trapoeraba, 2: mentrasto, 3: capim colchão, 4: brachiaria, 5: marmelada, 6: leiteiro, 7: picão preto, 8: sorgo, 9: caruru, 10: capim guiné, 11: santa luzia.

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1					215			352	89		198
2			146	379					188	1197	
3									3		
4				103	44						
5					115	68					
6					66			43			
7					76						237
8											
9					134	61	405		38	735	
10			115				23	209	452	41	
11			119		400	12				1269	
12					138	64			496		
13							232	469			
14						14		298			
15											
16						16			227		
17			135			28			14		
18						3			106		
19						21					
20					37	5					
21			41			12	21				
22			138		328						
23			269								
24			160		46						
25			103				85			41	
26			95		23			46			
27			123		46	18		27		998	
28			156		17					759	
29			73		41	21					
30											
31						19				897	
32			228			103				819	153
33				79		231		189			
34										517	
35		369				12					
36						16				331	169
37					23	12	295				
38		994	205		43						
39						39	239	53	54	1039	
40			96			52			715		
41	13		238				25				

Tabela B.12: 12: capim pé de galinha, 13: serralha, 14: timbete, 15: cordão de frade e Total de sementes (continuação).

P	12	13	14	15	Total
1			15		869
2					1910
3					3
4					147
5					183
6			9		118
7					313
8					0
9	93				1466
10					840
11					1800
12					698
13			33		734
14					312
15					0
16					243
17					177
18					109
19					21
20					42
21				132	206
22			17		483
23					269
24					206
25			7		236
26					164
27					1212
28			5		937
29			21		156
30			10		10
31					916
32					1303
33					499
34					517
35					381
36	101				617
37		198	125		653
38					1242
39					1424
40	116				979
41			7		283

Tabela B.13: Medição das alturas das plantas que não sofreram tratamento com herbicidas.

Parcela	Medição-1	Medição-2
1	1,55	1,35
2	1,25	1,60
3	1,50	1,50
4	2,10	1,95
5	1,95	1,85
6	1,55	1,95
7	1,76	1,85
8	1,80	2,00
9	1,40	1,50
10	2,10	2,00
11	2,00	2,10
12	1,85	2,00
13	2,05	2,05
14	2,10	1,85
15	1,80	1,90
16	2,15	2,20
17	1,90	2,05
18	1,45	2,10
19	1,75	1,95
20	2,15	2,15
21	2,35	2,15
22	1,90	1,85
23	2,10	1,95
24	1,95	2,20
25	2,00	2,05
26	1,70	2,10
27	1,75	2,05
28	2,05	1,80
29	1,95	2,00
30	2,00	2,10
31	2,00	2,05
32	2,15	2,05
33	1,85	1,95
34	2,05	2,10
35	2,10	2,10
36	2,05	1,70
37	2,00	2,15
38	1,85	2,05
39	1,90	1,95
40	2,10	2,05
41	1,80	2,00

Tabela B.14: Medição das alturas das plantas que sofreram tratamento com herbicidas.

Parcela	Medição-1	Medição -2	Medição-3	Medição-4	Medição-5
1	1,40	1,40	1,40	1,35	1,40
2	1,60	1,50	1,80	1,75	1,70
3	1,70	1,65	1,60	1,80	1,80
4	1,75	1,70	1,75	1,75	1,70
5	1,55	1,60	1,40	1,65	1,50
6	1,55	1,70	1,60	1,80	1,75
7	1,70	1,95	1,55	1,90	1,80
8	1,85	1,50	1,75	1,80	1,95
9	1,85	1,75	1,70	1,80	1,90
10	1,70	1,75	1,75	1,70	1,80
11	1,60	1,90	1,85	1,90	1,70
12	1,75	1,70	1,65	1,85	1,80
13	1,85	1,90	1,85	1,90	1,85
14	1,75	1,60	1,80	1,75	1,80
15	1,65	1,75	1,75	1,60	1,90
16	1,80	1,70	1,75	1,75	1,70
17	1,80	1,30	1,65	1,75	1,95
18	1,85	1,80	1,75	2,00	1,85
19	1,85	1,80	1,80	1,90	1,65
20	2,05	2,10	2,05	2,00	2,20
21	1,80	2,25	2,20	2,25	2,25
22	1,55	1,25	1,85	1,95	1,90
23	2,00	2,00	2,05	1,95	1,90
24	1,95	1,85	1,85	1,95	2,50
25	1,80	1,65	1,70	2,00	1,90
26	1,85	1,85	1,95	1,95	2,00
27	1,70	1,80	1,70	1,60	1,70
28	2,10	2,05	2,10	2,10	2,10
29	2,00	1,85	1,85	1,80	1,85
30	2,15	2,10	2,00	2,10	2,15
31	1,80	1,90	1,85	2,00	2,00
32	1,50	1,80	1,85	1,90	1,95
33	1,95	1,95	2,00	1,85	1,75
34	1,95	1,95	1,95	2,10	1,90
35	2,10	2,05	2,00	2,00	1,95
36	2,15	2,05	2,00	2,10	2,10
37	1,85	1,90	2,00	2,15	2,00
38	2,05	2,15	1,65	1,80	1,90
39	1,90	1,80	1,75	1,95	1,95
40	1,70	2,05	2,15	2,00	2,15
41	2,05	2,15	2,00	2,00	2,15

Tabela B.15: Medição dos diâmetros dos colmos das plantas que não sofreram tratamento com herbicidas.

Parcela	Medição-1	Medição-2
1	12,3	12,1
2	20,2	23,4
3	20,4	20,5
4	13,4	21,2
5	23,4	14,7
6	10,1	20,7
7	15,4	16,3
8	23,4	23,7
9	10,4	14,6
10	23,4	23,4
11	22,2	17,3
12	16,3	16,3
13	20,6	22,4
14	23,7	24,3
15	20,1	22,5
16	25,3	23,7
17	25,1	27,8
18	17,3	27,6
19	17,3	29,8
20	20,5	27,8
21	23,3	23,7
22	22,2	27,3
23	20,6	19,6
24	21,5	27,6
25	23,2	25,1
26	19,6	28,7
27	20,3	20,8
28	29,3	23,7
29	20,5	26,9
30	25,4	25,7
31	27,3	25,6
32	25,6	26,9
33	18,4	27,6
34	28,3	25,4
35	23,2	29,5
36	29,3	25,9
37	17,3	25,1
38	26,6	20,6
39	25,4	25,6
40	21,5	24,7
41	20,5	26,6

Tabela B.16: Medição dos diâmetros dos colmos das plantas que sofreram tratamento com herbicidas.

Parcela	Medição-1	Medição-2	Medição-3	Medição-4	Medição-5
1	28,6	24,7	25,6	24,7	25,9
2	29,8	20,5	24,7	29,3	28,6
3	23,4	27,7	27,3	28,8	30,5
4	28,6	30,5	27,6	33,4	29,8
5	25,4	27,6	23,2	30,8	24,7
6	24,7	25,9	23,2	33,2	29,3
7	25,4	33,10	25,4	28,9	27,6
8	30,8	28,3	30,8	25,7	27,5
9	25,9	27,4	23,7	27,3	24,4
10	33,2	27,6	23,2	29,3	24,4
11	30,5	28,6	32,7	27,8	27,6
12	25,4	23,2	24,5	28,3	26,6
13	23,7	25,6	31,5	27,6	30,8
14	31,5	25,7	27,3	25,4	30,5
15	27,3	25,4	26,6	29,8	32,2
16	23,3	26,6	25,4	24,4	25,9
17	25,4	29,3	23,6	27,6	27,3
18	23,3	24,4	25,4	30,6	24,7
19	26,6	30,5	26,1	24,4	20,5
20	26,6	23,2	29,3	28,8	32,4
21	30,5	28,6	27,6	23,2	25,6
22	26,1	26,1	25,1	25,1	27,3
23	29,3	27,4	20,2	30,7	26,6
24	27,8	27,4	25,4	26,8	27,4
25	27,7	28,8	25,4	25,9	26,9
26	24,2	25,6	30,8	26,6	27,9
27	30,6	29,4	26,4	25,4	23,7
28	29,3	24,7	27,6	25,4	23,9
29	27,1	30,8	26,6	27,4	26,1
30	26,3	26,1	24,7	29,3	25,4
31	23,6	23,7	28,8	24,7	24,8
32	30,3	30,1	29,8	32,8	29,8
33	27,7	26,4	23,7	30,7	24,7
34	29,3	26,7	26,9	24,7	25,9
35	33,7	30,5	30,6	28,6	30,8
36	28,2	22,4	22,6	22,5	26,4
37	28,8	29,6	23,3	29,4	25,9
38	23,4	23,2	25,4	24,6	28,3
39	26,6	26,7	30,4	29,6	30,8
40	20,4	25,6	26,6	27,9	29,7
41	20,4	25,2	25,7	23,7	28,3

Tabela B.17: Rendimento de grãos das parcelas que não sofreram tratamento com herbicidas.

Parcela	Grãos ($g.12m^{-2}$)	Umidade	Grãos ($kg.ha^{-1}$) ($u = 13\%$)
1	13600	29	3048,275862
2	15640	27,2	3737,5
3	10500	28,3	2411,660777
4	14760	29,4	3263,265306
5	12160	31,8	2485,534591
6	14910	29,6	3274,155405
7	15400	31,6	3167,721519
8	12540	22,4	3638,839286
9	11660	36,8	2059,51087
10	11470	33,9	2199,262537
11	14625	34,2	2779,605263
12	15120	31,4	3129,936306
13	11970	32,2	2416,304348
14	13975	33,4	2719,685629
15	16200	33,8	3115,384615
16	15120	29,8	3297,986577
17	15444	33,3	3014,594595
18	15400	31,7	3157,728707
19	16560	29,4	3661,22449
23	15405	23,7	4225
24	13680	24,8	3585,483871
25	18565	24,6	4905,386179
26	14490	24,9	3782,53012
27	12460	21,9	3698,173516
28	11960	23,5	3308,085106
29	12070	22,7	3456,167401
30	14080	25,8	3547,286822
31	13275	24,1	3580,394191
32	16330	24,9	4262,851406
33	16750	25,4	4286,417323
34	17640	22	5211,818182
35	16320	25,8	4111,627907
36	13340	25,1	3454,581673
37	12264	23,1	3450,909091
38	11520	21,9	3419,178082
39	11025	25,3	2832,509881
40	14555	26	3638,75
41	9660	24,4	2573,360656

Tabela B.18: Rendimento de grãos das parcelas que sofreram tratamento com herbicidas.

Parcela	Grãos ($g.40m^{-2}$)	Umidade	Grãos ($kg.ha^{-1}$) ($u = 13\%$)
1	5981,308411	25,6	759,3457944
2	6810,747664	26,5	835,2803738
3	6196,261682	26	774,5327103
4	5831,775701	26	728,9719626
5	5983,17757	26,4	736,5654206
6	6656,542056	25,9	835,2803738
7	6005,607477	25,2	774,5327103
8	6231,308411	25,4	797,3130841
9	5416,82243	25,2	698,5981308
10	6913,551402	26,9	835,2803738
11	5864,485981	25,1	759,3457944
12	6339,252336	26,6	774,5327103
13	5911,214953	25,3	759,3457944
14	6871,962617	25,8	865,6542056
15	5887,850467	25,2	759,3457944
16	5517,757009	24,6	728,9719626
17	5674,766355	25,3	728,9719626
18	6124,766355	25,7	774,5327103
19	6787,850467	26,9	820,0934579
23	5957,943925	25,5	759,3457944
24	6168,224299	24	835,2803738
25	5747,663551	24,6	759,3457944
26	6953,271028	24,8	911,2149533
27	6322,429907	24,6	835,2803738
28	6064,719626	25,7	766,9392523
29	6672,897196	25,5	850,4672897
30	6697,429907	24,5	888,4345794
31	6568,224299	25,1	850,4672897
32	6409,345794	25,4	820,0934579
33	6340,186916	25,6	804,9065421
34	5468,691589	24,9	713,7850467
35	6642,757009	24,3	888,4345794
36	6414,485981	25,9	804,9065421
37	6570,560748	25,8	827,6869159
38	5046,728972	24	683,411215
39	7214,018692	24,9	941,588785
40	6897,196262	24,6	911,2149533
41	7272,196262	24,9	949,182243

Tabela B.19: Perda de rendimento.

Parcela	Perda de rendimento
1	0,42
2	0,29
3	0,54
4	0,38
5	0,53
6	0,38
7	0,40
8	0,51
9	0,61
10	0,58
11	0,42
12	0,41
13	0,4
14	0,49
15	0,41
16	0,38
17	0,43
18	0,43
19	0,31
23	0,30
24	0,32
25	0,28
26	0,30
27	0,32
28	0,28
29	0,30
30	0,33
31	0,52
32	0,25
33	0,34
34	0,46
35	0,37
36	0,35
37	0,35
38	0,35
39	0,46
40	0,31
41	0,51

Apêndice C

Conceitos Estatísticos

C.1 Distribuição Normal

A variação natural de qualquer medida é aleatória. Embora as distribuições possam assumir uma variedade de formas, muitas variáveis observadas possuem uma distribuição de frequências que é, aproximadamente, como a da distribuição Normal.

A distribuição de frequências é a aproximação da distribuição de probabilidades. Uma das formas mais tradicionais de modelar a distribuição de probabilidade dos dados corresponde à distribuição normal ou gaussiana. A forma da distribuição normal é simétrica em torno da média e com formato de sino. A função densidade de probabilidade de x é dada por

$$f(x) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{C.1}$$

onde os estimadores de μ e σ para de n amostras, representados por $\overline{x}$ e s, respectivamente, são dados por

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_n}{n} \tag{C.2}$$

e

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \overline{x})}{n-1}}. \tag{C.3}$$

Para verificar se as n amostras estão normalmente distribuídas utiliza-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (Draper e Smith, 1981).

C.2 Análise Exploratória de Dados

A análise exploratória está associada a

- análise de gráficos: histogramas, gráfico de caixa, gráfico de normalidade e de comparação de médias de valores;
- medida de posição: média aritmética;
- medidas de dispersão: variância e quantis.

Os histogramas fornecem uma idéia da forma da distribuição da variável sob consideração, por sua vez os gráficos de caixas fornecem uma idéia da posição, dispersão, assimetria, caudas e presença de valores atípicos ou anômalos. A posição central é dada pela mediana (q_2) e a dispersão pelo intervalo interquartil (d_q). As posições relativas de q_1, q_2 e q_3 fornecem uma noção da assimetria da distribuição. Para uma distribuição simétrica ou aproximadamente simétrica, deve-se ter:

1. $q_2 - x_1 \cong x_n - q_2$;
2. $q_2 - q_1 \cong q_3 - q_2$;
3. $q_1 - x_1 \cong x_n - q_3$;
4. as distâncias entre a mediana e q_1 e q_3 devem ser menores que as distâncias entre os extremos.

A análise gráfica consiste na elaboração de histogramas, gráficos de caixas, gráficos de dispersão, entre outros. Através da análise do histograma e do gráfico de normalidade é possível questionar a normalidade dos dados. Para assumir a normalidade dos dados o teste de Kolmogorv-Smirnov deve ser feito. A análise do gráfico de caixa e do gráfico de médias sugerem que há uma igualdade ou diferença entre as médias para os diferentes tratamentos. Para assumir uma dessas hipóteses, o teste-t para igualdade de médias deve ser feito. A verificação da homocedasticidade (igualdade de variâncias) ou heterocedasticidade (desigualdade de variâncias) é realizada através do teste-F. A análise numérica deve ser feita para validar ou rejeitar as hipóteses adotadas na análise gráfica dos dados.

C.3 Teste de Hipóteses

Uma hipótese estatística é uma formulação dos parâmetros de uma distribuição. As hipóteses do teste são do tipo

$$H_0 : \text{hipótese nula } (\mu_1 = \mu_2)$$
$$H_1 : \text{hipótese alternativa } (\mu_1 \neq \mu_2).$$

Utiliza-se o teste de hipóteses para especificar o conjunto de valores e através desse conjunto rejeita-se ou não H_0. Tal conjunto de valores é chamado de região crítica para o teste.

Quando o teste é usado podem ser gerados dois erros. Se H_0 é rejeitada quando $\mu_1 = \mu_2$ é obtido o erro do tipo I. Se H_0 não é rejeitada quando $\mu_1 \neq \mu_2$ é obtido o erro do tipo II.

As probabilidades desses dois erros são dadas por

$$\alpha = \text{P(erro do tipo I)=P(rejeitar } H_0/H_0 \text{ é verdadeiro)}$$
$$\beta = \text{(erro do tipo II)=P(não rejeitar } H_0/H_0 \text{ é falso).}$$

O poder do teste é dado pela função

$$1 - \beta = \text{P(rejeitar } H_0/H_0 \text{ é verdadeiro).}$$

p-valor

O p-valor é o menor nível de significância α, utilizado em testes de hipóteses, para obter a indicação da aceitação ou rejeição da hipótese nula H_0.

C.3.1 Teste de Correlação de Pearson

Dado um conjunto de pares de valores (x_i, Y_i), $i = 1, 2, ..., n$, o coeficiente de correlação, denotado r, é uma medida de associação linear entre os valores de x e de Y, dado por

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}} \tag{C.4}$$

com $-1 \leq r \leq 1$, sendo que a proximidade de zero indica a falta de associação entre os valores e a proximidade de $|1|$ indica forte associação entre os valores. A correlação positiva indica que os valores de x e Y crescem ou decrescem juntos. A correlação negativa indica que os valores de x crescem enquanto os valores de Y decrescem e vice-versa.

As hipóteses adotadas para verificar se há correlação entre os dados amostrais são

$$H_0 : r = 0,$$
$$H_1 : r \neq 1.$$

Para a aceitação de uma das hipóteses, deve ser feita a verificação do p-valor. Para um nível de significância $\alpha = 5\%$, se p-valor$> 0,05$, a hipótese nula H_0 é aceita, ou seja, não há associação entre os valores amostrais e, se p-valor$< 0,05$, a hipótese nula é rejeitada e a hipótese alternativa H_1 é aceita, o que indica que existe associação entre os valores amostrais.

C.3.2 Teste de Igualdade das Variâncias: Teste F

As hipóteses do teste-F (ou teste de Fisher) para verificar a igualdade de variâncias são

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$
$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2.$$

A estatística do teste é dada por

$$F_0 = \frac{s_1^2}{s_2^2} \sim F_{n_1-1,n_2-1}.$$

Dado o nível de significância α, os valores F_1 e F_2 são encontrados na tabela da distribuição de Fisher.

Para um nível de significância $\alpha = 5\%$ o critério de decisão baseado no p-valor é se p-valor$> 0,05$, a hipótese H_0 é aceita, ou seja, as variâncias são iguais e se p-valor$< 0,05$, a hipótese H_0 é rejeitada, ou seja, as variâncias são diferentes.

C.3.3 Teste de Igualdade de Médias: Teste-t

O teste-t é empregado quando duas médias são comparadas (ou média amostral com média amostral ou média amostral com um μ especificado). Através dessa comparação, rejeita-se ou não a hipótese de igualdade das médias. O teste-t pode ser feito para amostras com variâncias iguais (homocedásticas) ou variâncias diferentes (heterocedásticas). Neste teste, se as variâncias forem conhecidas, é necessário especificar se estas são iguais ou diferentes, o que pode ser feito utilizando o teste estatístico de Fisher.

Para utilizar o teste-t assume-se que o processo é estável e que os dados amostrais assumem uma distribuição normal.

C.3.4 Teste de Médias com Variâncias Conhecidas: Teste-Z

Caso 1: uma amostra

O teste-Z para uma amostra é utilizado quando pretende-se comparar a média com um valor μ_0 especificado. As hipóteses do teste são

$$H_0 : \mu = \mu_0,$$
$$H_1 : \mu \neq \mu_0$$

onde μ_1 é uma média amostral e μ_0 é uma média especificada. O teste estatístico é dado por

$$Z_0 = \frac{\overline{Y} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}.$$

O intervalo de confiança (com $100(1-\alpha)\%$ de confiança) é dado por

$$\overline{Y} - z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu_0 \leq \overline{Y} + z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Caso 2: duas amostras

O teste-Z para duas amostras é utilizado quando se pretende comparar duas médias. As hipóteses do teste são

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$
$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2.$$

O teste estatístico é dado por

$$Z_0 = \frac{\overline{Y_1} - \overline{Y_2}}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}.$$

O intervalo de confiança com $100(1-\alpha)\%$ de confiança) é dado por

$$\overline{Y_1} - \overline{Y_2} - z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \leq \mu_1 - \mu_2 \leq \overline{Y_1} - \overline{Y_2} + z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}.$$

Para um nível de significância $\alpha = 5\%$, o critério de decisão para o teste de médias com variâncias conhecidas, para uma ou duas amostras, baseado no p-valor é, se p-valor$< 0,05$ a hipótese nula H_0 é aceita, ou seja, as médias são iguais e se p-valor$> 0,05$ a hipótese nula H_0 é rejeitada, ou seja, as médias são diferentes.

C.3.5 Teste de Médias com Variâncias Desconhecidas

Teste-t para variâncias iguais ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2$):

As hipóteses do teste são dadas por

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$
$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

onde μ_1 e μ_2 são médias amostrais. O teste estatístico é dado por

$$t_0 = \frac{\overline{Y_1} - \overline{Y_2}}{sp\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

que segue distribuição t com $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade, onde $\overline{Y_1}$ e $\overline{Y_1}$ são médias amostrais, n_1 e n_2 são os tamanhos da amostra e s^2p é uma estimativa da variância $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ que pode ser calculada como

$$s^2p = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-2)s_2^2}{n_1+n_2-2}$$

onde s_1^2 e s_2^2 são duas estimativas de variâncias amostrais.

O intervalo de confiança (com $100(1-\alpha)\%$ de confiança) é dado por

$$\overline{Y_1} - \overline{Y_2} - t_{\frac{\alpha}{2},n_1+n_2-2}sp\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \leq Y_1 - Y_2 \leq \overline{Y_1} - \overline{Y_2} + t_{\frac{\alpha}{2},n_1+n_2-2}sp\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}.$$

Teste-t para variâncias diferentes ($\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$):

As hipóteses do teste são dadas por

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2,$$
$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2.$$

O teste estatístico é dado por

$$t_0 = \frac{\overline{Y_1} - \overline{Y_2}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

que segue distribuição t com v graus de liberdade dado por

$$v = \frac{(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2})^2}{\frac{(\frac{s_1^2}{n_1})^2}{n_1 - 1} + \frac{(\frac{s_2^2}{n_2})^2}{n_2 - 1}}.$$

Para um nível de significância $\alpha = 5\%$, o critério de decisão baseado no p-valor, para os casos com variâncias iguais ou diferentes, é se p-valor$< 0,05$ a hipótese nula H_0 é aceita, ou seja, as médias são iguais e se p-valor$> 0,05$ a hipótese nula H_0 é rejeitada, ou seja, as médias são diferentes.

C.3.6 Teste de Kolmogorov-Smirnov

Grande parte dos problemas encontrados na prática, são solucionados, primeiramente, considerando algumas suposições iniciais, tais como, assumir uma função de distribuição para os dados amostrados. Nesse sentido, surge a necessidade de certificar se essas suposições podem, realmente, ser assumidas. Em alguns casos, assumir a normalidade dos dados é o primeiro passo para simplificar sua análise. Para dar suporte a esta suposição, é considerado, dentre outros, o teste de Kolmogorov - Smirnov. O teste de Kolmogorov - Smirnov pode ser utilizado para avaliar as hipóteses:

H_0 : Os dados seguem uma distribuição normal,
H_1 : Os dados não seguem uma distribuição normal.

Este teste observa a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados, no caso a Normal, e a função de distribuição empírica dos dados. Como critério, esta diferença é comparada com um valor

crítico de tabela, para um dado nível de significância. A estatística utilizada para o teste é

$$D_n = sup_x \|F(x) - F_n(x)\|. \tag{C.5}$$

onde D_n corresponde à distância máxima vertical entre os gráficos de $F(x)$ e $F_n(x)$ sobre a amplitude dos possíveis valores de x, com $F(x)$ a função de distribuição acumulada assumida para os dados e $F_n(x)$ representa a função de distribuição acumulada empírica dos dados. Se $D_n >$ valor crítico encontrado na Tabela C.1, rejeita-se a hipótese de normalidade dos dados com $(1 - \alpha)100\%$ de confiança. Caso contrário a hipótese de normalidade não é rejeitada.

Tabela C.1: Valores críticos para a estatística do Teste de Kolmogorov-Smirnov (D_n).

	nível de significância (α)			
n	0,2	0,1	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,26	0,29	0,36
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,20	0,23	0,27
40	0,18	0,20	0,23	0,27
45	0,16	0,18	0,20	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23
valores maiores	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

Sejam $x_1, x_2, ..., x_n$ observações ordenadas de forma crescente da variável aleatória contínua X. A função de distribuição acumulada assumida para os dados é difinida por $F(x_i) = P(X \leq x_i)$ e a função de distribuição acumulada empírica é definida por uma função escada, dada pela fórmula:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} I_{(-\infty,x]} x_i,$$

onde I_A é a função indicadora, que é definida da seguinte forma:

$$I_A = \begin{cases} 1, & \text{se} \quad x \in A \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A função da distribuição empírica $F_n(x)$ corresponde à proporção de valores menores ou iguais a x.

Para um nível de significância $\alpha = 5\%$, o critério de decisão baseado no p-valor para o teste de Kolmogorov-Smirnov é, se p-valor$> 0,05$, a hipótese nula H_0 é aceita, ou seja, os dados seguem uma distribuição normal e, se p-valor$< 0,05$, a hipótese nula H_0 é rejeitada, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal.

C.3.7 Teste de Significância dos Parâmetros

Para verificar a significância de cada parâmetro do modelo é feito o teste cujas hipóteses são

$$H_0\colon\ \beta_j = 0,$$
$$H_1\colon\ \beta_j \neq 0$$

onde $j = 1, \ldots, p$.

A estatística do teste é dada por

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{se(\beta_j)}$$

onde $se(\beta_j) = s\sqrt{c_{jj}}$ e c_{jj} já foi definido anteriormente em (A.45). A regra de decisão para o teste estatístico é rejeitar H_0 com nível α de significância se $|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}(n-k-1)}$. O p-valor é dado por

$$2P\left[t_{\frac{\alpha}{2}(n-k-1)} > |t_0|\right]. \tag{C.6}$$

Para um nível de significância $\alpha = 5\%$, o critério de decisão baseado no p-valor para o teste de significância dos parâmetros é se p-valor$> 0,05$ a hipótese nula H_0 é aceita, ou seja, os parâmetros não são significativos e se p-valor$< 0,05$, a hipótese nula H_0 é rejeitada, ou seja, os parâmetros são significativos.

Se os parâmetros do modelo não são significativos, o modelo não explica adequadamente o fenômeno envolvido. Se o modelo possuir mais de um parâmetro e um deles for não significativo, deve-se fazer uma análise antes de concluir que o modelo não apresenta um bom ajuste. Pode ser que o ajuste seja razoavelmente bom, mas, possivelmente haja outro modelo que explique melhor o fenômeno envolvido.

Apêndice D

Espécies Daninhas Encontradas na Área Experimental

A seguir é feita a descrição das principais características das plantas daninhas encontradas na área experimental.

D.1 Espécies de Folhas Largas

D.1.1 Botão-de-Ouro (*Melampodium perfoliatum*)

O botão-de-ouro é encontrado predominantemente nas regiões de Minas Gerais e Goiás do Brasil. É uma planta anual, herbácea e com porte variando de 50 a 200 centímetros de altura. Propaga-se por sementes (Lorenzi, 2000). A Figura D.1 ilustra o botão de ouro.

D.1.2 Caruru (*Amaranthus hybridus*)

O caruru pode ser encontrado em todas as regiões brasileiras. É uma planta anual, muito ramificada e com porte variando de 50 a 100 centímetros de altura. Propaga-se por sementes e possui uma grande capacidade reprodutiva. Essa planta é hospedeira de nematóides e vírus (Lorenzi, 2000). A Figura D.2 ilustra

Figura D.1: Botão de ouro (*Melampodium perfoliatum*).

o caruru.

Figura D.2: Caruru branco (*Amaranthus hybridus*).

D.1.3 Erva-de-Santa Luzia (*Euphorbia hirta L.*)

A erva-de-santa luzia é uma planta amplamente distribuída pelo território brasileiro. É uma planta anual, pubescente e pouco ramificada com porte variando de 10 a 50 centímetros de altura. Propaga-se por sementes. É um hospedeiro de nematóides e fitopatógenos (Lorenzi, 2000). A Figura D.3 ilustra a erva-de-santa luzia.

Figura D.3: Erva-de-santa luzia (*Euphorbia hirta L.*).

D.1.4 Erva-de-Touro (*Tridax procumbens* L.)

A erva-de-touro pode ser encontrada principalmente na região Centro-Oeste do Brasil. É uma planta anual ou bianual, herbácea e com porte variando entre 20 e 50 centímetros de altura. Desenvolve-se rapidamente em lugares quentes. Propaga-se por sementes. A Figura D.4 ilustra a da erva-de-touro.

Figura D.4: Erva de touro (*Tridax procumbens*).

D.1.5 Erva-Quente (*Spermacoce latifolia*)

A erva-quente pode ser encontrada mais frequentemente no Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste brasileiro. É uma planta anual, herbácea e com porte variando entre 20 e 30 centímetros de comprimento. Apresenta preferência por solos ácidos.

Propaga-se por meio de sementes (Lorenzi, 2000). A Figura D.5 ilustra a erva-quente.

Figura D.5: Erva quente (*Spermacoce latifolia*).

D.1.6 Leiteiro (*Euphorbia heterophylla*)

O leiteiro pode ser encontrado em todo o território brasileiro. É uma planta anual, herbácea e com porte variando de 30 a 80 centímetros de comprimento. Propaga-se por sementes. Suas sementes germinam durante o verão, emergindo até 12 centímetros de profundidade e mantendo sua viabilidade germinativa por alguns anos (Lorenzi, 2000). A Figura D.6 ilustra o leiteiro.

Figura D.6: Leiteiro (*Euphorbia heterophylla*).

D.1.7 Mentrasto (*Ageratum conyzoides* L.)

O mentrasto pode ser encontrado em todas as regiões brasileiras. É uma planta anual, herbácea e com porte variando de 30 a 80 centímetros de altura. Propaga-se exclusivamente por sementes, sendo que uma única planta chega a produzir 40 mil sementes (Lorenzi, 2000). A Figura D.7 ilustra o mentrasto.

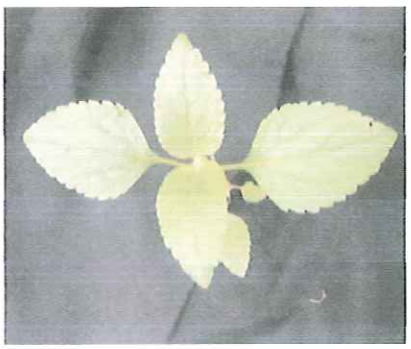

Figura D.7: Mentrasto (*Ageratum conyzoides*).

D.1.8 Picão-Preto (*Bidens pilosa* L.)

O picão-preto pode ser encontrado em todo território brasileiro. É uma planta anual, herbácea e com porte variando entre 20 e 150 centímetros. Propaga-se por sementes. Essa planta é hospedeira de fungos, nematóides e vírus. Muito prolífera e de ciclo curto, é capaz de produzir até três gerações por ano (Lorenzi, 2000). A Figura D.8 ilustra o picão-preto.

D.1.9 Poaia (*Richardia brasiliensis*)

A poaia pode ser mais frequentemente encontrada nas regiões brasileiras Sul e Centro-Oeste. É uma planta anual, herbácea, com porte variando entre 30 e 70 centímetros de comprimento. Propaga-se por meio de sementes (Lorenzi, 2000). A Figura D.9 ilustra a poaia.

Figura D.8: Picão preto (*Bidens pilosa*).

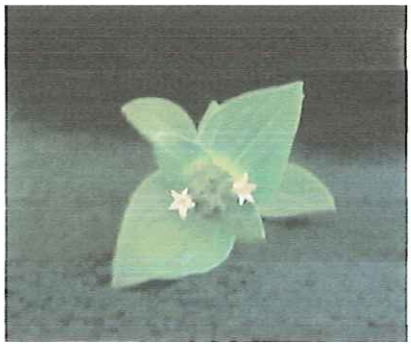

Figura D.9: Poaia (*Richardia brasiliensis*).

D.1.10 Trapoeraba (*Commelina benghalensis* L.)

A trapoeraba é comumente encontrada nas regiões tropicais e subtropicais, sendo que no Brasil é encontrada em quase todas as regiões. É uma planta perene e herbácea com porte variando de 30 a 70 centímetros de altura (Lorenzi, 2000). Apresenta preferência por solos férteis, com boa umidade e sombreados. Propaga-se por sementes aéreas e subterrâneas (formadas nos rizomas). A Figura D.10 ilustra a trapoeraba.

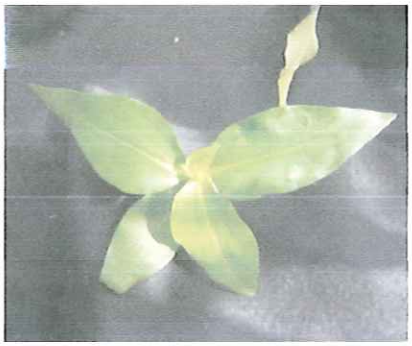

Figura D.10: Trapoeraba (*Commelina benghalensis*).

D.2 Espécies de Folhas Estreitas

D.2.1 Braquiária (*Brachiaria decumbens*)

A braquiária é comumente encontrada em São Paulo, Minas Gerais e Centro-Oeste. É uma planta perene com porte variando de 30 a 90 centímetros de altura. Propaga-se por sementes e através de rizomas (Lorenzi, 2000). A Figura D.11 ilustra a braquiária.

D.2.2 Capim-Colchão (*Digitaria ciliaris*)

O capim colchão é uma planta anual e subereta, de 40 a 80 centímetros de altura, propaga-se exclusivamente por sementes. É uma planta daninha medianamente

Figura D.11: Braquiária (*Brachiaria decumbens*).

frequente nas regiões mais tropicais do território brasileiro, onde infesta lavouras anuais e perenes, beira de estradas e terrenos baldios. Prefere solos férteis, formando infestações densas (Lorenzi, 2000). A Figura D.12 ilustra o capim-colchão.

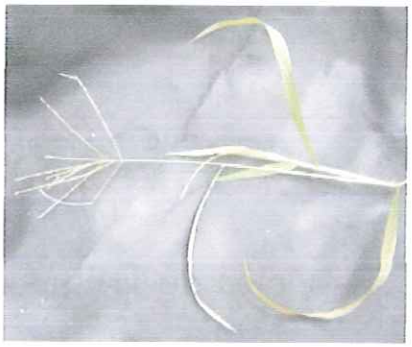

Figura D.12: Capim colchão (*Digitaria ciliaris*).

D.2.3 Capim-Guiné (*Panicum maximum*)

O capim-guiné pode ser encontrado em quase todo o território brasileiro, com excessão de regiões frias. É uma planta perene com porte variando de 100 a 200 centímetros de altura. Propaga-se por sementes (Lorenzi, 2000). A Figura D.13 ilustra o capim-guiné.

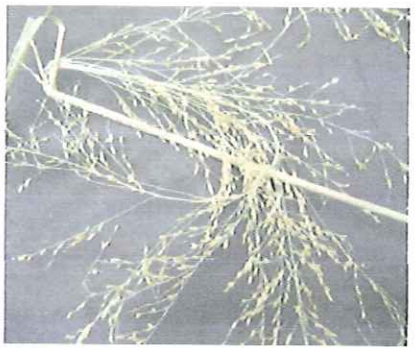

Figura D.13: Capim guiné (*Panicum maximum*).

D.2.4 Capim-Marmelada (*Brachiaria plantaginea*)

O capim marmelada pode ser encontrado mais frequentemente no Centro e Sul do país. É uma planta anual, herbácea e com porte variando de 50 a 80 centímetros de altura. Propaga-se por sementes (Lorenzi, 2000). A Figura D.14 ilustra o capim-marmelada.

Figura D.14: Capim marmelada (*Brachiaria plantaginea*).

D.2.5 Capim Pé-de-Galinha (*Eleusine indica*)

O pé-de-galinha pode ser encontrada em quase todas as regiões brasileiras, principalmente no norte. É uma planta anual, perene e com porte variando de 30 a 70 centímetros de altura. Propaga-se por sementes e é hospedeiro de agentes

patogênicos.

D.2.6 Sorgo Selvagem (*Sorghum arundinaceum*).

O sorgo selvagem é frequentemente encontrado em quase todo o território brasileiro. É uma planta anual, herbácea e com porte variando de 150 a 250 centímetros de altura. Propaga-se por sementes (Lorenzi, 2000). A Figura D.15 ilustra o sorgo selvagem.

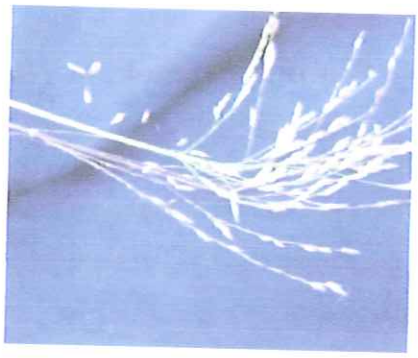

Figura D.15: Sorgo selvagem (*Sorghum arundinaceum*).

D.2.7 Timbête (*Cenchrus echinatus* L.)

O timbête pode ser encontrado em todo o território brasileiro. É uma planta anual, herbácea e com porte variando entre 20 e 60 centímetros de altura. Propaga-se por sementes (Lorenzi, 2000). A Figura D.16 ilustra o timbête.

D.2.8 Tiririca (*Cyperus rotundus*)

A tiririca pode ser encontrada em todo o território brasileiro. É uma planta perene, herbácea e com porte variando de 10 a 60 centímetros de altura. Propaga-se por meio de sementes e tubérculos (Lorenzi, 2000). A Figura D.17 ilustra a tiririca.

Figura D.16: Timbête (*Cenchrus echinatus L.*).

Figura D.17: Tiririca (*Cyperus rotundus*).

Apêndice E

Condições Climáticas

E.1 Novembro - 2004

Tabela E.1: Pressão.

Ano	Mês	Dia	Pressão 12h	Pressão 18h	Pressão 24h	Pressão Med
2004	NOV	1	930,2	926,8	929	928,7
2004	NOV	2	929,9	926,8	928	928,2
2004	NOV	3	929,6	926	927,4	927,7
2004	NOV	4	929,2	925,1	927,4	927,2
2004	NOV	5	928,3	925,6	928	927,3
2004	NOV	6	928,8	925,9	928,7	927,8
2004	NOV	7	929,9	927,6	929,9	929,1
2004	NOV	8	931,6	929,1	930,6	930,4
2004	NOV	9	932,3	927,9	929,5	929,9
2004	NOV	10	930,2	926,4	927	927,9
2004	NOV	11	926,2	921,2	922,4	923,3
2004	NOV	12	924,2	922,2	925,5	924,0
2004	NOV	13	927,2	924	926,3	925,8
2004	NOV	14	930,3	927,5	930	929,3
2004	NOV	15	930,2	927,2	929,6	929,0
2004	NOV	16	932	928,4	929,1	929,8
2004	NOV	17	929,4	926	928,3	927,9
2004	NOV	18	928,8	924,4	925,8	926,3
2004	NOV	19	926,8	923,5	925,8	925,4
2004	NOV	20	926,6	924	926,2	925,6
2004	NOV	21	928,6	926,3	928,7	927,9
2004	NOV	22	931,2	928,4	929,9	929,8
2004	NOV	23	931,9	929,2	931,4	930,8
2004	NOV	24	932,4	929	930,4	930,6
2004	NOV	25	931,2	926,8	927,8	928,6
2004	NOV	26	929,6	925	926	926,9
2004	NOV	27	926,6	923,4	925	925,0
2004	NOV	28	926,8	922,6	924,8	924,7
2004	NOV	29	925,1	921,4	923,9	923,5
2004	NOV	30	926	924,8	927,1	926,0

Tabela E.2: Temperatura.

TempAr 12h	TempAr 18h	TempAr 24h	Tmax	Tmin	Tmed
28,1	28,9	21,4	32,8	19,9	24,7
25,5	30,5	23,2	31,5	20,3	24,7
25,8	30,7	24	31,8	18,6	24,8
26,7	33	25,9	33,8	18,9	26,2
27,8	31,9	23,1	33,4	19,3	25,3
28,5	31,9	22,8	33,7	20,4	25,6
24,2	29	22,7	29,2	19,7	23,7
22,9	26,3	21	27,3	18,1	22,1
23,6	29,3	22,6	29,3	17,1	23,0
25,7	30,3	24,5	31,5	18	24,8
26,6	32,1	25,7	32,8	18,3	25,8
27,6	30,7	22,3	32,2	21,5	25,2
25,7	33,4	24,5	34,1	17,4	25,2
25,9	30,7	22,5	31,4	20,3	24,5
23,9	28,9	22,1	29,7	19,4	23,4
20,9	25,2	22,1	26,6	19,2	22,2
24,9	25,9	21,9	30	20,1	23,8
24,3	28,5	22,1	29,7	19,4	23,5
21,9	26,5	20,7	28,5	19,6	22,3
24,7	29,1	22,9	29,2	19,4	23,8
24,5	28,7	21,1	29,2	18,3	22,8
24,1	26,8	21,7	27,6	16,8	22,4
23,5	28,4	21,4	29,2	16,7	22,4
23,5	28,5	22,1	28,9	16,8	22,7
25,3	29,9	23,5	30,9	17,8	24,2
25,7	31,3	24,3	32,5	17,6	24,9
27,1	32,2	24,9	32,7	17,2	25,4
22,9	28,7	22	29,6	20,8	23,5
22,7	29	21,4	29,6	20,2	23,1
22	23,6	20,3	25,8	19,9	21,7

Tabela E.3: Vento.

UR 12h	UR 18h	UR 24h	UR (média)	Vento 12h	Vento 18h	Vento 24h	Vento (médio)
48	44	84	65,0	3,1	4,6	0,5	2,7
61	38	61	55,3	3,1	2,6	0,5	2,1
49	33	52	46,5	2,6	3,6	0,5	2,2
48	29	50	44,3	2,6	2,6	1	2,1
47	36	80	60,8	1	3,6	0,5	1,7
48	37	77	59,8	1,5	4,6	0,5	2,2
71	50	73	66,8	1	1	1	1,0
67	53	73	66,5	2,1	1,5	2,1	1,9
61	39	58	54,0	2,1	1,5	1	1,5
53	36	53	48,8	4,6	2,1	1	2,6
49	31	46	43,0	4,1	5,1	0,5	3,2
52	40	83	64,5	3,1	4,1	0,5	2,6
53	28	47	43,8	0,5	2,6	0,5	1,2
51	39	65	55,0	2,6	3,1	3,1	2,9
62	45	67	60,3	3,1	5,1	2,6	3,6
85	63	88	81,0	0,5	2,1	0	0,9
70	72	96	83,5	3,1	0,5	2,1	1,9
77	54	84	74,8	2,1	2,1	0,5	1,6
88	59	96	84,8	2,1	2,1	0	1,4
65	46	75	65,3	1	1	1,5	1,2
64	51	72	64,8	1	1	1,5	1,2
58	46	65	58,5	2,1	3,6	0	1,9
60	37	57	52,8	3,6	2,1	0,5	2,1
59	43	63	57,0	2,1	4,6	0,5	2,4
53	35	57	50,5	4,1	1,5	1	2,2
58	34	54	50,0	2,6	1	1,5	1,7
51	31	55	48,0	1,5	1,5	0	1,0
81	56	85	76,8	2,1	2,6	2,1	2,3
88	52	91	80,5	2,6	2,1	1	1,9
86	85	93	89,3	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabela E.4: Preciptação.

Precip	Evap	Insol
0	5,8	6,7
3,9	4,5	2,3
0	5,6	11,3
0	6,5	10,1
0	6,4	8,5
2,6	5,4	9,2
18,5	4,6	0,5
0	3,5	4,8
0	3,9	10,6
0	5,6	11,2
0	5,5	10,7
0	6,8	7,4
3,1	5,4	9,7
0	6,7	9,1
0	5,7	5,6
1,6	5,2	0,7
1,2	2	2,4
21,2	2	2,9
11,4	2	2,3
23,3	2	9,5
0	3,2	9,1
1,1	3,8	8,5
0	4,1	10,7
0	5,1	11,5
0	5	11,4
0	5,5	11,1
0	5,7	10,7
0,3	5,2	3,1
1,2	2,6	2
14,7	2	0,2

E.2 Dezembro - 2004

Tabela E.5: Pressão.

Ano	Mês	Dia	Pressão 12h	Pressão 18h	Pressão 24h	Pressão Med
2004	DEZ	1	928,8	927,2	929,1	928,4
2004	DEZ	2	930,4	929,6	931,1	930,4
2004	DEZ	3	931	928,8	930,3	930,0
2004	DEZ	4	932,3	929	930,4	930,6
2004	DEZ	5	930,7	925,9	929,2	928,6
2004	DEZ	6	928,3	924,6	927,2	926,7
2004	DEZ	7	928,3	924,2	927,2	926,6
2004	DEZ	8	928,6	925	926	926,5
2004	DEZ	9	929,1	924,3	925,5	926,3
2004	DEZ	10	926,2	922,2	925	924,5
2004	DEZ	11	925,2	923,2	925,1	924,5
2004	DEZ	12	926,7	925,1	927,1	926,3
2004	DEZ	13	929,4	926,4	927,9	927,9
2004	DEZ	14	929,6	926	929	928,2
2004	DEZ	15	930,6	927	928	928,5
2004	DEZ	16	929,2	925,8	927,5	927,5
2004	DEZ	17	928,4	925,9	927,5	927,3
2004	DEZ	18	928,4	925,4	928	927,3
2004	DEZ	19	929,6	927,5	928,8	928,6
2004	DEZ	20	929,5	925,9	927,1	927,5
2004	DEZ	21	928,2	924,4	927,1	926,6
2004	DEZ	22	928,2	925,1	925,6	926,3
2004	DEZ	23	926,4	923,9	925,9	925,4
2004	DEZ	24	926,4	925	926,6	926,0
2004	DEZ	25	928,6	926,4	928,3	927,8
2004	DEZ	26	929,2	925,4	927	927,2
2004	DEZ	27	928,2	924,7	926,4	926,4
2004	DEZ	28	927,4	924,4	929	926,9
2004	DEZ	29	930,7	928,4	930,6	929,9
2004	DEZ	30	931,4	928,7	929,1	929,7
2004	DEZ	31	930,4	928,7	929,4	929,5

Tabela E.6: Temperatura.

TempAr 12h	TempAr 18h	TempAr 24h	Tmax	Tmin	Tmed
22,1	22,7	20,1	24,8	18,7	21,2
79	84	79,8	2,1	1,5	1
22,5	26,1	21,1	26,3	17,7	21,7
25,3	30,2	23,1	30,6	17,7	24,0
27,7	32,3	22,7	33	19,6	25,1
27,1	30,1	21,5	30,6	19,4	24,0
26,1	31,3	22	31,6	19,6	24,3
22,6	28,1	23,3	29	18,7	23,4
19,9	28,5	22,7	29,3	19,4	22,8
21,2	28,2	20,9	28,3	18,1	21,9
21,3	23,8	21,3	24,7	19,2	21,6
20,7	20,1	18,3	22,8	19	19,8
20,9	27,6	22,9	28,4	17,4	22,5
26,1	28,3	21,5	30	20	23,8
24,3	27,8	22,3	28,1	19,3	23,3
24	28,5	20,3	29,1	19,4	22,6
25,1	21,9	21,7	28,6	17,4	22,9
26,5	30	21,7	30	19,3	23,8
24,1	25,5	22,4	25,9	20	23,0
23,7	22,1	21,3	25,4	19,9	22,3
21,9	28	20,1	28	19,2	21,9
20,1	23,3	20,3	24,6	17,9	20,6
20,1	24,1	20,7	24,6	18,3	20,9
21,1	24	20,7	24,2	18,3	21,0
21,6	28	22,3	28	17,6	22,4
26,5	31,9	23,1	32,6	18	24,7
25,5	30,9	23,3	31,4	20,7	24,8
26,3	31,2	20,7	32,2	17,6	23,5
24,1	29	22,7	29,3	18,7	23,5
23,4	27,5	22,3	28,2	20,4	23,3
26,4	21,9	20,3	29,6	19,4	23,2

Tabela E.7: Vento.

UR 12h	UR 18h	UR 24h	UR (média)	Vento 12h	Vento 18h	Vento 24h	Vento (médio)
78	77	82	79,8	2,6	2,6	1,5	2,2
72	79	84	79,8	2,1	1,5	1	1,5
71	60	79	72,3	5,1	4,1	2,6	3,9
64	42	69	61,0	2,1	2,1	1	1,7
59	38	77	62,8	0,5	0,5	0,5	0,5
58	44	91	71,0	0,5	2,6	0,5	1,2
70	44	77	67,0	2,6	2,1	7,2	4,0
84	59	71	71,3	2,1	1	0	1,0
96	55	86	80,8	0,5	0,5	0	0,3
86	58	90	81,0	0,5	2,1	0	0,9
92	80	87	86,5	2,1	1	0,5	1,2
95	94	97	95,8	1	1,5	0	0,8
85	53	83	76,0	0,5	1,5	0	0,7
68	58	82	72,5	2,6	1	0,5	1,4
66	53	79	69,3	2,1	1,5	0	1,2
72	49	88	74,3	2,1	3,1	0	1,7
68	82	88	81,5	1,5	1,5	0	1,0
64	47	88	71,8	1,5	1	0,5	1,0
74	67	89	79,8	2,1	1	0,5	1,2
81	94	95	91,3	1	1	0	0,7
87	57	95	83,5	0,5	1,5	0,5	0,8
89	81	94	89,5	1	1	1	1,0
95	76	97	91,3	0	1	1	0,7
94	77	96	90,8	0,5	4,1	0,5	1,7
86	55	84	77,3	0	1	1	0,7
66	43	76	65,3	1	1,5	1	1,2
71	47	75	67,0	1,5	2,6	0,5	1,5
68	44	94	75,0	0,5	0	1,5	0,7
72	55	80	71,8	1,5	1	0,5	1,0
89	63	90	83,0	1	1,5	0,5	1,0
65	73	86	77,5	1	1,5	0	0,8

Tabela E.8: Preciptação.

Precip	Evap	Insol
23,6	1,2	0,9
0,5	1,7	0
1,8	1,4	1,4
0	3,5	9,5
0	4	10,2
0	4,5	7,5
28,8	3,2	9,7
20,3	3,2	3,7
6,7	2,5	5,2
27,5	1,6	2,2
23,2	1,8	0,2
3,6	1,2	0
46,7	0,5	7,7
0	2,5	8,7
0,4	2,7	3,1
0	2,8	5,1
0	3	5,8
0,8	2	7,6
5,2	2,5	0,1
4	1,4	0,4
52,3	0,7	1,4
26,6	1,4	0,4
29,1	1,1	0
23,4	0,7	0,6
28,7	0,7	3,8
0	2	10,6
0	3,7	7,7
0	3,5	10,1
10,4	3,3	5,6
21,3	2,3	2,3
0	1,9	4,8

E.3 Janeiro - 2005

Tabela E.9: Pressão.

Ano	Mês	Dia	Pressão 12h	Pressão 18h	Pressão 24h	Pressão Med
2005	JAN	1	929,2	926	930	928,4
2005	JAN	2	931,1	929,9	930,6	930,5
2005	JAN	3	931,9	928,6	930,4	930,3
2005	JAN	4	930,3	926,6	928,7	928,5
2005	JAN	5	930,4	927	928,2	928,5
2005	JAN	6	929,8	927,6	928,6	928,7
2005	JAN	7	930,6	927,6	929,2	929,1
2005	JAN	8	928,8	927,5	927	927,8
2005	JAN	9	927,8	924,3	925,1	925,7
2005	JAN	10	928	924,6	925,1	925,9
2005	JAN	11	927,5	924,3	925,4	925,7
2005	JAN	12	926,6	923,4	925	925,0
2005	JAN	13	925,5	922,2	924	923,9
2005	JAN	14	925,2	922,2	923,9	923,8
2005	JAN	15	925,4	922,2	923,9	923,8
2005	JAN	16	925,1	921,2	922,6	923,0
2005	JAN	17	925,2	924,3	925,9	925,1
2005	JAN	18	925,8	925	926,4	925,7
2005	JAN	19	927,9	926,3	926,3	926,8
2005	JAN	20	927,9	925	925,8	926,2
2005	JAN	21	929,1	927,5	928,6	928,4
2005	JAN	22	930,8	927,4	929,9	929,4
2005	JAN	23	929,5	925,9	926,2	927,2
2005	JAN	24	928,3	924,8	925,1	926,1
2005	JAN	25	927	923,4	924,4	924,9
2005	JAN	26	927,2	924,8	927,9	926,6
2005	JAN	27	931,4	929,8	930	930,4
2005	JAN	28	931,2	927,4	927,9	928,8
2005	JAN	29	928,4	926,2	927,1	927,2
2005	JAN	30	927,1	925	926,8	926,3
2005	JAN	31	926,3	923,8	924,8	925,0

Tabela E.10: Temperatura.

TempAr 12h	TempAr 18h	TempAr 24h	Tmax	Tmin	Tmed
26,7	30,8	22,3	30,8	17,5	23,9
21,2	25,1	21,4	25,8	18,2	21,6
24	28,1	22,1	29	16,5	22,7
21,9	26,8	20,9	28	19,8	22,3
19,3	25,6	20,3	27,3	18,3	21,1
24,8	27,1	21,9	28	19,4	23,2
24,6	28,6	23,2	29,2	19,4	23,9
24,2	21,7	21,5	29,3	20,1	23,3
26,1	30,5	24,1	31	19,2	24,9
23,1	30,1	23	31,2	19,8	24,0
26,5	31,3	23,6	32	19,8	25,1
22,1	26,3	22,3	27,3	20,5	22,9
25,1	30,4	23,5	31,2	20,5	24,8
25,1	29,7	23,9	30	18,6	24,3
24,7	26,7	23,1	29,5	19,5	24,0
24,8	29,7	24,5	30,4	21,5	25,1
22,1	25,3	21,9	26	21,6	22,7
25,3	21,8	21,3	27,3	20,8	23,2
20,5	21,4	20,4	22,5	19,5	20,7
23,5	26,9	22,9	29	18,5	23,4
21,5	27,9	23,6	28,4	19,6	23,3
25,2	30,1	20,1	31,2	20,1	23,3
25,9	31,3	23,6	31,4	18,3	24,6
26,1	31	23,3	31,8	20,5	25,0
24,5	29,4	22,5	31,2	19,8	24,1
25,1	29,5	22,6	30,6	19,6	24,1
20	22,9	21,1	24,4	19,4	21,2
23,3	28	22	28,4	19,1	23,0
23	26,4	21,3	26,4	19,4	22,3
23,7	26,3	21,1	26,6	18,9	22,3
23,9	28,1	22,1	29,2	19,3	23,3

Tabela E.11: Vento.

UR 12h	UR 18h	UR 24h	UR (média)	Vento 12h	Vento 18h	Vento 24h	Vento (médio)
65	44	72	63,3	1	1	1	1,0
82	74	74	76,0	0,5	2,1	0,5	1,0
63	52	71	64,3	2,6	2,1	2,1	2,3
76	57	94	80,3	1,5	3,1	0,5	1,7
97	69	97	90,0	1,5	4,6	3,1	3,1
70	61	91	78,3	2,1	1	0	1,0
72	55	83	73,3	1	1	0,5	0,8
73	87	93	86,5	1	1,5	0	0,8
69	47	73	65,5	1	1	0,5	0,8
81	52	82	74,3	0,5	1	0	0,5
66	47	81	68,8	1,5	1,5	0	1,0
94	73	91	87,3	1,5	1,5	1,5	1,5
72	53	80	71,3	2,6	1,5	1,5	1,9
65	53	72	65,5	1,5	1,5	2,1	1,7
72	74	89	81,0	2,1	2,1	0	1,4
79	57	85	76,5	4,1	4,6	0,5	3,1
91	75	94	88,5	4,6	2,1	2,6	3,1
76	94	96	90,5	1,5	0	0	0,5
95	95	95	95,0	0,5	0,5	0	0,3
81	67	87	80,5	1	2,1	0	1,0
95	59	84	80,5	1	1,5	0,5	1,0
79	60	93	81,3	0,5	2,1	0	0,9
65	45	77	66,0	1	0,5	0,5	0,7
71	49	81	70,5	0	1	0	0,3
74	54	91	77,5	1	4,6	0,5	2,0
81	55	88	78,0	1	3,6	1,5	2,0
97	88	90	91,3	0	1,5	2,1	1,2
79	63	92	81,5	0,5	1,5	0	0,7
74	63	93	80,8	2,6	1,5	0,5	1,5
76	66	90	80,5	2,1	0,5	1	1,2
76	59	88	77,8	1,5	0,5	0	0,7

Tabela E.12: Preciptação.

Precip	Evap	Insol
0,7	2	8
3,4	2,9	1,2
0,8	2,4	9,9
0	3,7	2,3
44,6	2,3	2,4
42,2	1,2	2,9
7,7	1,7	4,4
3,6	2,4	2,4
24,6	1,7	11
5,3	3,9	7,1
0	3	8,7
10,7	3,5	0,2
1,8	1,4	7,3
0	2,7	10,5
0	3	6
1,3	2	7,1
0	2,9	0
5	1,8	1,2
27,3	0,6	0
6,4	0,6	2,9
19,8	1,8	0,7
0	1,2	5,6
11,9	2	11,4
0,4	3,5	8,7
0,6	2,9	8,4
6,4	2,7	5,7
26,1	2,3	0,1
15,6	0,6	3,7
8,4	1,8	0,3
0,7	1,8	1,6
5,4	1,6	4,8

E.4 Fevereiro - 2005

Tabela E.13: Pressão.

Ano	Mês	Dia	Pressão 12h	Pressão 18h	Pressão 24h	Pressão Med
2005	FEV	1	925,1	924,8	924,7	924,9
. 2005	FEV	2	928	927,1	928,2	927,8
2005	FEV	3	930,3	928,2	930,6	929,7
2005	FEV	4	932,4	929,2	930,6	930,7
2005	FEV	5	931,8	929,2	931,4	930,8
2005	FEV	6	931,5	928,7	929,8	930,0
2005	FEV	7	931,4	929	930	930,1
2005	FEV	8	931,4	929,5	930	930,3
2005	FEV	9	931,4	928,3	928,8	929,5
2005	FEV	10	928,6	925,4	925,8	926,6
2005	FEV	11	926,2	923,1	923,5	924,3
2005	FEV	12	924,4	921,5	923,2	923,0
2005	FEV	13	924,7	921,8	924,2	923,6
2005	FEV	14	925,1	922,3	922,6	923,3
2005	FEV	15	923,5	921,2	922,4	922,4
2005	FEV	16	925,9	923,2	925,1	924,7
2005	FEV	17	929	925,2	927,8	927,3
2005	FEV	18	930,2	927,1	929,2	928,8
2005	FEV	19	930	926,2	929	928,4
2005	FEV	20	928,3	925	925,9	926,4
2005	FEV	21	927,2	925	925,5	925,9
2005	FEV	22	927,8	925,5	927,1	926,8
2005	FEV	23	929,6	927,2	928,6	928,5
2005	FEV	24	931,5	927,5	928,6	929,2
2005	FEV	25	929,9	925,8	926,2	927,3
2005	FEV	26	928,4	924,8	926,2	926,5
2005	FEV	27	927,6	924,4	927,4	926,5
2005	FEV	28	929,2	926	926,7	927,3

Tabela E.14: Temperatura.

TempAr 12h	TempAr 18h	TempAr 24h	Tmax	Tmin	Tmed
22,1	20,1	18,3	24	19,6	20,5
. 19,5	22,9	21,3	24	17,2	20,7
25,5	27,7	20,9	28,9	18,5	22,9
26,2	30,6	21,5	31,7	18,2	23,8
24,7	30,6	21,3	30,7	19,7	23,5
22,2	27,5	22,1	27,8	18,6	22,6
21,1	26,9	19,7	27,2	15,3	20,6
22,1	26,1	18,5	26,8	15,7	20,3
22,3	25,7	18,7	26,2	15,7	20,3
21,9	27,3	16,8	27,4	15,8	19,7
24,1	28,9	23,4	30,8	14,9	23,3
23,5	29,6	22,3	30,5	18,7	23,5
23,7	31,8	21,3	31,9	19,6	23,6
23,8	30,9	20,8	31,4	18,7	23,1
25,5	30,7	22,5	32	18,1	24,1
25,7	29,3	23,4	31,4	19,6	24,7
26,3	31,9	22,3	32,5	20	24,7
26,1	28,7	23,7	29,9	20,1	24,7
20,7	27,7	20,9	28,4	20,1	22,2
23,9	28,9	22,5	30,2	17,1	23,2
23,8	28,8	21,3	30,3	18,6	23,1
24,5	29,8	20,8	31,2	17,5	23,0
24,4	30,7	21,3	32	16,6	23,1
26,9	32,7	23,9	33,2	18,2	25,2
27,3	26,1	23,4	31,6	19,1	25,0
21,3	29,9	23,5	30,8	19,2	23,7
25,7	31,1	21,9	31,6	19,8	24,2
22,5	29,7	24,1	30	20,2	24,2

Tabela E.15: Vento.

UR 12h	UR 18h	UR 24h	UR (média)	Vento 12h	Vento 18h	Vento 24h	Vento (médio)
80	96	95	91,5	1	2,1	0,5	1,2
95	81	91	89,5	0	1,5	0	0,5
71	61	90	78,0	2,1	0,5	0,5	1,0
63	34	71	59,8	2,1	0,5	0,5	1,0
73	48	90	75,3	1	1,5	2,1	1,5
80	58	72	70,5	1	0,5	0,5	0,7
60	51	75	65,3	1	1	0,5	0,8
64	44	70	62,0	1,5	1,5	1	1,3
59	47	77	65,0	3,1	1,5	0	1,5
67	42	76	65,3	2,1	3,1	0	1,7
61	41	68	59,5	1	1	1	1,0
77	51	82	73,0	3,6	2,6	0,5	2,2
83	42	87	74,8	0,5	1	1	0,8
77	35	76	66,0	1	1,5	0	0,8
64	41	72	62,3	2,6	1	0	1,2
66	58	71	66,5	0,5	0,5	0,5	0,5
70	44	87	72,0	2,1	0,5	0	0,9
68	60	80	72,0	1,5	2,1	0	1,2
90	63	85	80,8	2,1	1,5	1	1,5
71	54	82	72,3	0,5	0,5	1	0,7
65	41	69	61,0	0,5	0,5	0,5	0,5
65	41	79	66,0	0,5	0,5	0	0,3
70	44	79	68,0	1	0,5	1	0,8
59	40	71	60,3	1	0,5	0	0,5
60	74	80	73,5	0,5	1	1,5	1,0
94	55	85	79,8	0,5	2,1	0,5	1,0
73	53	93	78,0	1	1	0	0,7
91	51	87	79,0	0,5	1,5	0	0,7

Tabela E.16: Preciptação.

Precip	Evap	Insol
0,4	2,2	0,3
12,7	0,8	0,2
7,6	1	6,5
0	2,1	11,4
0	3,9	4,8
9,4	2,2	4,6
0	2,7	11,3
0	3,1	10,8
0	3,5	8,7
0	3,5	9,2
0	3,1	10,4
0	3,6	7,3
0	2,8	7
1	2,8	9,6
0	3,8	11
0	4	8,2
0,3	2,9	7,9
0,3	2,9	7,2
2	2,4	4,5
57,7	1,4	10,4
0	2,4	10,7
0	3,4	10,6
0	3,1	10,2
0	3,3	10
0	3,2	7,3
41,9	2,7	4,5
0	1,9	9,1
14,8	2,1	4,2

E.5 Março - 2005

Tabela E.17: Pressão.

Ano	Mês	Dia	Pressão 12h	Pressão 18h	Pressão 24h	Pressão Med
2005	MAR	1	929,6	926,6	927,5	927,9
2005	MAR	2	929,5	928,6	930,3	929,5
2005	MAR	3	930,6	929,8	930,8	930,4
2005	MAR	4	930,6	928,6	930,2	929,8
2005	MAR	5	931,4	928,2	929,4	929,7
2005	MAR	6	929,9	926,3	928,6	928,3
2005	MAR	7	929,5	926,4	929	928,3
2005	MAR	8	931,1	926,6	928,7	928,8
2005	MAR	9	929	925	926,7	926,9
2005	MAR	10	929	926,3	928,2	927,8
2005	MAR	11	930,8	927	928,3	928,7
2005	MAR	12	928	924,4	927	926,5
2005	MAR	13	928,2	924,3	925,9	926,1
2005	MAR	14	927,6	923,9	925,2	925,6
2005	MAR	15	927,6	924,6	927,1	926,4
2005	MAR	16	930,8	927,6	929,6	929,3
2005	MAR	17	930	926,4	928,2	928,2
2005	MAR	18	929	925,5	928,2	927,6
2005	MAR	19	929	925,9	927,9	927,6
2005	MAR	20	930,7	927,2	929,2	929,0
2005	MAR	21	930,7	927,8	929,5	929,3
2005	MAR	22	931,2	928,4	930,8	930,1
2005	MAR	23	933,4	929,8	930,8	931,3
2005	MAR	24	932	928,3	929,2	929,8
2005	MAR	25	930,6	928,6	929,2	929,5
2005	MAR	26	929,2	925,8	928,4	927,8
2005	MAR	27	930,3	927,6	929,2	929,0
2005	MAR	28	930	927,4	927,8	928,4
2005	MAR	29	931	928,2	930	929,7
2005	MAR	30	931,4	928,6	929,9	930,0
2005	MAR	31	931,5	928,2	929,5	929,7

Tabela E.18: Temperatura.

TempAr 12h	TempAr 18h	TempAr 24h	Tmax	Tmin	Tmed
22,3	24,8	22,1	26,2	20	22,5
22,3	20,9	18,5	23,1	19,9	20,5
19,3	20,4	19,3	21	17,4	19,3
20,7	20,6	18,7	21,3	18,2	19,5
20,3	23,4	20,3	23,4	17,8	20,4
23,4	29,1	22,9	29,4	17,6	23,2
24,9	29,9	23,7	30,7	18,3	24,3
23,5	30	22,3	31	19,2	23,7
26,1	30,8	22,7	31,4	19,6	24,5
24,1	24,4	23,3	29,5	18,6	23,8
22,3	29	22,5	29,5	20,2	23,4
25,3	30,8	23,3	31,9	17,8	24,3
26,3	32,5	23,3	32,6	19,7	25,0
25,7	31,1	23,9	31,5	19,6	24,9
23,7	29,9	22	30,4	20,6	23,7
21,9	29,5	21,4	29,7	19,7	22,8
25,3	27,5	23,4	30	18,8	24,2
25,3	29,3	21,5	30	19,6	23,6
23,7	25,3	22	28,2	18,6	22,9
21,3	24,7	22,1	26	19,6	22,2
25,7	27,4	22,9	28,9	19,4	24,0
24,5	28,8	22,8	29,8	19,1	23,8
25,4	29,4	22,3	29,8	18,7	23,7
25,6	29,7	21,3	30	17,9	23,2
26,2	21,6	21,3	27,4	19,8	23,2
24,3	28,3	21,5	28,7	17,6	22,7
23,9	26,5	21,3	27,1	18,7	22,5
23,7	26,9	20,7	28,4	17,9	22,3
23,8	27,5	20,3	27,8	17,6	22,0
24,6	28,9	21,5	30	17,6	23,0
25,1	28,9	21,7	29,2	17,7	23,1

Tabela E.19: Vento.

UR 12h	UR 18h	UR 24h	UR (média)	Vento 12h	Vento 18h	Vento 24h	Vento (médio)
95	83	85	87,0	0,5	0,5	0	0,3
83	92	96	91,8	1	0,5	1,5	1,0
96	95	96	95,8	1	1,5	0,5	1,0
95	96	96	95,8	0,5	0,5	1	0,7
96	86	95	93,0	0,5	1,5	0	0,7
77	48	84	73,3	0	1	0,5	0,5
68	46	78	67,5	1	0	0,5	0,5
77	48	84	73,3	1	0,5	0	0,5
66	48	83	70,0	0,5	1	0	0,5
78	86	88	85,0	0	0,5	0	0,2
95	64	91	85,3	0,5	2,1	0	0,9
70	47	76	67,3	0,5	0,5	0	0,3
63	44	73	63,3	2,1	0,5	0,5	1,0
68	48	82	70,0	1	1,5	0,5	
79	53	87	76,5	3,6	3,1	0,5	
90	51	91	80,8	1	2,1	0,5	
70	62	83	74,5	1	1	0,5	
73	54	85	74,3	1	1	0,5	
79	80	90	84,8	0,5	1	0,5	
95	72	90	86,8	1	2,1	1	
69	59	90	77,0	1	1,5	0,5	
68	49	78	68,3	1	1,5	0,5	
67	52	79	69,3	2,6	1,5	0,5	
66	50	86	72,0	2,6	0,5	0,5	
71	89	93	86,5	2,1	1,5	0	
72	55	75	69,3	1	1,5	0	
78	60	82	75,5	1,5	0	0,5	
72	56	79	71,5	1,5	1,5	0,5	
64	50	79	68,0	3,1	1,5	0	
65	44	77	65,8	2,1	0,5	0	
65	51	75	66,5	3,6	3,6	1	

Tabela E.20: Preciptação.

Precip	Evap	Insol
24,2	1,9	1,2
39,7	1	0
35,3	0,7	0
27,5	0,5	0
60,7	0,2	1,4
4,9	0,6	9,2
0	2,3	10,2
0,1	3,1	7
0	2,3	7,7
0,6	2,7	4,1
14,4	1,6	2,9
1,4	1,5	9,4
0	2,9	10,2
0	2,9	9,6
0	2,7	2,8
29,4	1,4	5,6
0	1,7	5,8
1,9	1,9	5,1
0,8	1,7	3,5
22,4	1,5	0,8
0,4	1,3	4,6
0	2,4	10,1
0	2,7	9,2
0	3,1	7,3
0,6	2,5	2,4
10,3	1	7,2
0,6	2,1	4,6
0	1,7	8,6
0	2,6	9,3
0	2,9	10,6
0	3	9,8

E.6 Abril - 2005

Tabela E.21: Pressão.

Ano	Mês	Dia	Pressão 12h	Pressão 18h	Pressão 24h	Pressão Med
2005	ABR	1	932	929,1	930,2	930,4
2005	ABR	2	932,6	929,6	931	931,1
2005	ABR	3	932,2	928,8	930,3	930,4
2005	ABR	4	933,4	929,2	930,8	931,1
2005	ABR	5	932,8	929,8	932,2	931,6
2005	ABR	6	934,6	931,2	931,9	932,6
2005	ABR	7	933,2	929,5	931	931,2
2005	ABR	8	932,2	929,1	930,7	930,7
2005	ABR	9	931,4	928,7	930,7	930,3
2005	ABR	10	932,7	929,5	931	931,1
2005	ABR	11	931,8	928,8	931	930,5
2005	ABR	12	932,6	929,5	931,8	931,3
2005	ABR	13	932,6	929,9	931,4	931,3
2005	ABR	14	933,1	930,2	930,6	931,3
2005	ABR	15	933	929,8	93,8	652,2
2005	ABR	16	932,4	929,4	931	930,9
2005	ABR	17	932,2	928,8	930,4	930,5
2005	ABR	18	930,7	927,9	929,6	929,4
2005	ABR	19	931,8	928	929,5	929,8
2005	ABR	20	931,8	928,4	930	930,1
2005	ABR	21	930,7	926,4	928,6	928,6
2005	ABR	22	929,5	926,3	928,7	928,2
2005	ABR	23	930,2	927,2	928,4	928,6
2005	ABR	24	931	927,4	928,8	929,1
2005	ABR	25	930,4	926,4	928,2	928,3
2005	ABR	26	929,2	926,4	929	928,2
2005	ABR	27	931	929,8	931,8	930,9
2005	ABR	28	931,8	929,1	930,3	930,4
2005	ABR	29	933,8	930	931,4	931,7
2005	ABR	30	932	929,9	931,1	931,0

Tabela E.22: Temperatura.

TempAr 12h	TempAr 18h	TempAr 24h	Tmax	Tmin	Tmed
25	29,2	22,1	29,4	17,9	23,3
24,7	29,1	22,4	29,4	18,7	23,5
24,5	29	21,5	30	17,3	23,0
25,3	31,1	22	31,6	16,7	23,5
25,8	31,3	21,3	31,6	18,2	23,6
26,1	28,9	22,3	29,5	18,6	23,8
25,1	28,8	21,1	29,1	19,6	23,2
25,6	30	22,3	31	17,2	23,7
25,4	30,3	21,9	30,7	17,4	23,5
25	28,6	21,6	29,6	17,6	23,1
24,5	28,9	21	29,2	17,4	22,6
24,1	29,7	21,5	30,8	16,5	22,9
25,3	29,7	20,7	30	17,5	22,8
24,7	27,3	20,3	28,3	18	22,3
23,5	28,9	20,4	29,5	17,7	22,3
23,9	29,4	19,5	29,9	16,7	21,9
24,5	30,1	22,1	30,4	16,6	23,1
23,9	28,1	21,3	29,2	17,9	22,7
24,6	28,1	20,1	28,6	17,2	22,1
24,5	28,5	20,3	28,6	16,7	22,1
24,7	28,7	22,3	30,6	16,6	23,3
25,1	30,1	21,8	30,4	16,9	23,2
24,1	29	20,9	30	16,8	22,5
24,9	29,5	21,5	30,5	17,4	23,2
23,3	28,3	20,3	29,1	17,6	22,1
21,5	26,8	19,5	27	18,6	21,2
18,1	21	17,9	22,4	15,8	18,4
21,9	24,5	20,3	24,9	15,6	20,6
20,2	28,3	20,7	28,5	17,6	21,5
18,9	23,9	18,9	24,6	17,6	19,8

Tabela E.23: Vento.

UR 12h	UR 18h	UR 24h	UR (média)	Vento 12h	Vento 18h	Vento 24h	Vento (médio)
66	48	75	66,0	1	4,1	0,5	
66	52	76	67,5	1,5	1,5	0	
62	50	80	68,0	1	1	0	
69	40	74	64,3	1,5	1	0	
64	41	75	63,8	1	1	0,5	
63	48	76	65,8	2,1	2,1	0	
61	48	81	67,8	4,1	3,1	1	
61	42	75	63,3	3,1	1	0,5	
62	33	73	60,3	1	1	1	
61	42	71	61,3	2,6	2,6	1,5	
65	41	69	61,0	3,6	4,6	0,5	
64	45	75	64,8	1,5	1	0,5	
62	40	75	63,0	2,6	1,5	0,5	
62	51	81	68,8	3,1	1,5	0,5	
63	41	72	62,0	3,1	1	0,5	
68	44	83	69,5	0,5	1	0	
64	40	74	63,0	1	1	0,5	
75	49	75	68,5	2,1	1,5	0,5	
61	45	75	64,0	3,1	3,6	0	
66	47	85	70,8	1,5	0,5	0,5	
69	49	73	66,0	2,1	0	0,5	
65	39	74	63,0	1	1	0,5	
68	47	84	70,8	1	0,5	0	
69	44	77	66,8	1	1,5	1	
72	49	89	74,8	2,6	1,5	0,5	
92	62	90	83,5	0,5	1	0,5	
77	68	84	78,3	1,5	1,5	0,5	
68	63	78	71,8	0,5	1	1,5	
93	54	89	81,3	0,5	2,1	0,5	
97	72	94	89,3	2,1	0	0	

Tabela E.24: Preciptação.

Precip	Evap	Insol
0	3,4	10,5
0	3,1	10
0	2,7	10,5
0	2,8	9,7
0	3	10,2
0	4	11
0	3,8	10,9
0	3,6	10,7
0	3,6	10,4
0	4,1	9,8
0	4,2	10,9
0	5	10,3
0	3,5	10,4
0	3,6	7,1
0	3,1	9,4
0	3,9	10,7
0	2,9	10,3
0	3,6	10,3
0	3	10,3
0	3,6	5,8
0	2,5	9,3
0	2,8	9,6
0	3,4	7,4
0	2,6	8,9
0	2,9	4,6
0	2,4	0
4,7	1,5	0
0	1,7	4,1
4,2	1,9	6,8
26,7	1,7	1,4

Bibliografia

AGUIRRE, L. A. (2000). *Introdução à identificação de sistemas: Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*, Editora UFMG, Belo Horizonte.

BAUER, T. A. E MORTENSEN, D. A. (1992). A comparision of economic optimum thresholds for two annual weeds in soybeans, *Weed Technology* 6(1): 228–235.

BERNHARD, R. H., JENSEN, J. E., E ANDREASEN, C. (1998). Prediction of yield loss caused by *orabanche spp.* in carrot and pea crops based on the soil seedbank, *Weed Research* 38(3): 191–197.

BERTI, A. E SATTIN, M. (1996). Effect of weed position on yield loss in soybean and a comparison between relative weed cover and other regression models, *Weed Research* 36(3): 249–258.

BERTI, A. E ZANIN, G. (1997). Gestinf: a decision model for post-emergence weed management in soybean (glicine max (l) merr.), *Crop Protection* 16(2): 109–116.

BIANCO, S., PITELLI, R. A., E PITELLI, A. (2003). Avaliação de uma metodologia de prática para o mapeamento de plantas daninhas, *Planta Daninha* 21(2): 257–261.

BUHLER, D. D., HARTZLER, R. G., E FORCELLA, F. (1997). Implications of weed seedbank dynamics to weed management, *Weed Science* 45(3): 329–336.

BUSSLER, B. H., MAXWELL, B. D., E PUETTMANN, K. J. (1995). Using plant volume to quantify interference in corn (*zea mays*) neighborhoods, *Weed Science* 43(4): 586–594.

CANNER, S. R., WILES, L. J., E MCMASTER, G. S. (2002). Weed reproduction model parameters may be estimated from crop yield loss data, *Weed Science* 50(6): 763–772.

CHEMALE, V. M. E FLECK, N. G. (1982). Avaliação de cultivares de soja (*glycine max (l) merril*) em competição com euphorbia heterophilla l. sob três densidades e dois períodos de ocorrência, *Planta Daninha* 5(2): 36–45.

CONLEY, S. P., BINNING, L. K., BOERBOOM, C. M., E STOLTENBERG, D. E. (2003a). Parameters for predicting giant foxtail cohort effect on soybean yield loss, *Agronomy Journal* 95(5): 1226–1232.

CONLEY, S. P., STOLTENBERG, D. E., E BINNING, L. K. (2003b). Predicting soybean yield loss in giant foxtail (*setaria faberi*) and common lambsquarters (*chenopodium album*) communities, *Weed Science* 51(3): 402–407.

COUSENS, R. (1985a). An empirical model relating crop yield to weed crop density and a statistical comparison with other models, *Journal of Agricultural Sciences* 105(3): 513–521.

COUSENS, R. (1985b). A simple model relationg yield los to weed density, *Annals of Applied Biology* 107(3): 239–252.

COUSENS, R. D., BRAIN, P., O'DONOVAN, J. T., E O'SULLIVAN, P. A. (1987). The use biologically realistic equations to describe the effcts of weed density and relative time of emergence on crop yield, *Weed Sciense* 35(5): 720–725.

COUSENS, R. E MORTIMER, M. (1995). *Dynamics of weed populations*, Cambridge University Press, Cambridge.

DEEN, W., COUSENS, R., WARRINGA, J., BASTIAANS, L., CARBERRY, P., REBEL, K., RIHA, S., MURPHY, C., BENJAMIN, L. R., CLOUGHLEY, C., CUSSANS, J., FORCELLA, F., HUNT, T., JAMIESON, P., LINDQUIST, J., E WANG, E. (2003). An evaluation of four crop: weed competition models using a common data set, *Weed Research* 43(2): 116–129.

DOMINGOS, G. A. (2004). A quem interessa?, *Folha de São Paulo, dia 20/04/04, site: http:www1.folha.uol.com.br, capturado dia 30/04/04.* .

DRAPER, N. R. E SMITH, H. (1981). *Applied Regression Analysis*, Editora John Wiley e Sons, Inc.

DRAPER, N. R. E SMITH, H. (1998). *Applied Regression Analysis*, A Wiley - Interscience Publication, United States of America.

ERASMO, E. A. L., TERRA, M. A., COSTA, N. V., DOMINGOS, V. D., E DIDONET, J. (2003). Fenologia e acúmulo de matéria seca em plantas de *murdannia nudiflora* durante seu ciclo de vida, *Planta Daninha* 21(3): 397–402.

FAVORETTI, A. C. (1995). *Modelos Não-Lineares: Um Enfoque Bayesiano*, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, USP-SC. Dissertação de Mestrado.

FLECK, N. G., RIZZARDI, M. A., AGOSTINETO, D., E VIDAL, R. A. (2003). Produção de sementes por picão-preto e guanxuma em função de densidades das plantas daninhas e da época de semeadura da soja, *Planta Daninha* 21(2): 191–202.

FLOREZ, J. A., FISCHER, A. J., RAMIREZ, H., E DUQUE, M. C. (1999). Predicting rice yield losses caused by multispecies weed competition, *Agronomy Journal* 91(1): 87–92.

GOMEZ, K. A. E GOMEZ, A. A. (1984). *Statistical Procedures for Agricultural Research*, Wiley-Interscience Publication, Los Baños, Philippines.

GONZÁLEZ-ANDÚJAR, J. L., MARTÍNEZ-COB, A., LÓPEZ-GRANADOS, F., E GARCÍA-TORRES, L. (2001). Spatial distribution and mapping of crenate broomrape infestations in continuous broad bean cropping, *Weed Science* 49(6): 773–779.

HANSEN, J. W. E INDEJE, M. (2004). Linking dynamics seasonal climate forecasts with crop simulation for maize prediction in semi-arid kenya, *Agricultural and Forest Meteorology* 125(1-2): 143–157.

HARVEY, R. G. (1997). A simple technique for predicting future weed problems and choosing the best weed manegement, *Plant Production Division Food and Protection Agricultural Organization of the United States Nation, FAO, Rome* pp. 33–39.

KARAM, D. E DA CRUZ, M. B. (2004). Sem concorrentes - manter o terreno limpo , sem invasoras é o primeiro passo para garantir o desenvolvimento, *Caderno Técnico: Plantas Daninhas. Cultivar - Grandes Culturas* (63).

KIM, D. S., BRAIN, P., MARSHALL, J. P., E CASELEY, J. C. (2002). Modelling herbicide dose and weed density effects on crop: weed competition, *Weed Research* 42(1): 1–13.

KING, D. A. (1987). A model for predicting the influence of moisture stress on cop losses caused by ozone, *Ecological Modelling* 35(1-2): 29–44.

KROPFF, M. J. E LAAR, H. H. (1993). *Modelling Crop-Weed Interactions*, CAB Internatinal and International Rice Research Institute, Grã Bretanha.

KROPFF, M. J. E SPITTERS, C. J. T. (1991). A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of the weeds, *Weed Research* 31(2): 97–105.

KROPFF, M. J., WEAVER, S. E., E SMITS, M. A. (1992). Use of ecophysiological models for crop-weed interference: relations amongst weed density, relative time of weed emergence, relative leaf area, and yield loss, *Weed Science* 40(2): 296–301.

LEMIEUX, C., VALÉE, L., E VANASSE, A. (2003). Predicting yield loss in maize fields and developing decision support for post-emergence herbicide applications, *Weed Research* 43(5): 323–332.

LINDQUIST, J. L. E KROPFF, M. J. (1996). Applications of an ecophysiological model for irrigated rice (oryza sativa)-echinochloa competition, *Weed Science* 44(1): 52–56.

LORENZI, H. (2000). *Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas*, Instituto Plantarum., 3ª edição, Nova Odessa, São Paulo.

LOTZ, L. A. P., CHRISTENSEN, S., CLOUTIER, D., QUINTANILLA, C. F., LÈGÈRE, A., LEMIEUX, C., LUTMAN, P. J. W., IGLESIAS, A. P., SALONEN, J., SATTIN, M., STIGLIANI, L., E TEI, F. (1996). Prediction of the competitive effects ef weeds on crop yields based on the relative leaf area of weeds, *Weed Research* 36(1): 93–101.

LOTZ, L. A. P., KROPFF, M. J., BOS, B., E WALLINGA, J. (1992). Prediction of yield loss based on relative leaf cover of weeds, *Proceedings First International Weed Control Congress* 2: 290–292.

LOTZ, L. A. P., KROPFF, M. J., WALLINGA, J., BOS, H. J., E GROENEVELD, R. M. W. (1994). Techniques to estimate relative leaf area and cover of weeds in crops for yield loss prediction, *Weed Research* 34(3): 167–175.

MARRA, M. C. E CARLSON, G. A. (1983). An economic threshold modelo for weeds in soybeans (glycine max), *Weed Science* 31(5): 604–609.

MOECHNIG, M. J., STOLTENBERG, D. E., BINNING, L. K., E BOERBOOM, C. M. (2003). Empirical corn yield loss estimation from common lambsquartes (chenopodium album) and giant foxtail (setaria faberi) in mixed communities, *Weed Science* 51(3): 386–393.

MURPHY, C., LEMERLE, D., JONES, R., E HARDEN, S. (2002). Use of density to predict crop yield loss between variable seasons, *Weed Research* 42(5): 377–384.

NGOUAJIO, M., LEROUX, G. D., E LEMIEUX, C. (1999). A flexible sigmoidal model relating crop yield to weed relative leaf cover and its comparison with nested models, *Weed Research* 39(4): 329–343.

OLIVEIRA, R. S. J. E CONSTANTIN, J. (2001). *Plantas daninhas e seu manejo*, Livraria e Editora Agropecuária, Guaíba, São Paulo.

PARK, S. E., BENJAMIN, L. R., E WATKINSON, A. R. (2003). The theory and application of platn competition models: an agronomic perspective, *Annals of Botany* 92(6): 741–748.

PEDRINHO, A. F. F. J., BIANCO, S., E PITELLI, R. A. (2004). Acúmulo de massa seca e macronutrientes por plantas de *glycine max* e *richardia brasiliensis*, *Planta Daninha* 22(1): 53–61.

PEOPLES, M. B., GAULT, R. R., LEAN, B., SYKES, J. D., E BROCKWELL, J. (1995). Nitrogen fixation by soybean in commercial irrigated crops of central and southern new south wales, *Soil Biology Biochemical* 27(4/5): 533–5618.

RIZZARDI, M. A. E FLECK, N. G. (2004). Métodos de quantificação da cobertura foliar da infestação de plantas daninhas e da cultura de soja, *Ciência Rural* 33(4): 621–627.

RIZZARDI, M. A., FLECK, N. G., AGOSTINETTO, D., E JR., A. A. B. (2003c). Previsão da perda de rendimento de grãos de soja causada pela infestação de plantas daninhas utilizando variáveis foliares relativas, *Planta Daninha* 21(1): 45–54.

RIZZARDI, M. A., FLECK, N. G., E AGOSTINETTO, D. (2003d). Nível de dano econômico como critério para controle de picão preto em soja, *Planta Daninha* 21(2): 273–282.

RIZZARDI, M. A., FLECK, N. G., MUNDSTOCK, C. M., E BIANCHI, M. A. (2003a). Previsão da perda de rendimento de grãos de soja causadas por interferência de picão-preto e guanxuma, *Ciência Rural* 33(4): 621–627.

RIZZARDI, M. A., FLECK, N. G., RIBOLDI, J., E AGOSTINETTO, D. (2003b). Ajuste de modelo para quantificar o efeito de plantas daninhas e época de semeadura no rendimento de soja, *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38(1): 35–43.

RUGGIERO, M. A. E LOPES, V. L. R. (1988). *Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais*, McGraw-Hill, São Paulo.

SAKAI, K. (2001). *Nonlinear Dynamics and Chaos in Agricultural Systems*, Elsevier-The Netherlands, Amsterdan.

SARTORATO, I., BERTI, A., E ZANIN, G. (1996). Estimation of economic thresholds for weed control in soybean (glycine max (l.) merr.), *Crop Protection* 15(1): 63–68.

SINCLAIR, T. R., FARIAS, J. R., NEUMAIER, N., E NEPOMUCENO, A. L. (2002). Modeling nitrogen accumulation and use by soybean, *Field Crops Research* 81(2-3): 149–158.

SPITTERS, C. J. T. (1983). An alternative approach to the analysis of mixed cropping experimenters. 1. estimation of competition effects, *Netherlands Journal of Agricultural Science* 31(1): 1–11.

STOLLER, E. W., HARRISON, S. K., WAX, L. M., REGNIER, E. E., E NAFZIGER, E. D. (1987). Weed interference in soybeans (*glycine max*), *Reviews of Weed Science* 3: 155–181.

SWINTON, S. M. E KING, R. P. (1994). A bioeconomic model for weed management in corn and soybean, *Agricultural Systems* 44(3): 313–335.

SWINTON, S. M. E LYFORD, C. P. (1996). A test for choice between hyperbolic and sigmoidal models of crop yield response to weed density, *Journal of Agricultural, Biological, and Evironmental Statistics* 44(1): 97–106.

VANACKER, R. C., LUTMAN, P. J. W., E FROUD-WILLIAMS, R. J. (1997). Predicting yield loss due to interference from two weed species using early observations of relative weed leaf area, *Weed Research* 37(5): 287–299.

VITTA, J. I. E QUINTANILLA, C. F. (1996). Canopy measurements as predictors of weed-crop competition, *Weed Science* 44(3): 511–516.

VITTA, J. I. E SATORRE, E. H. (1999). Validation of a weed: Crop competition model, *Weed Research* 39(4): 259–269.

VOLL, E., BRIGHENTI, A. M., GAZZIERO, D. L. P., E ADEGAS, F. S. (2004). Dinâmica da população de cardiospermum halicacabum e competição com a cultura de soja, *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39(1): 27–33.

WILES, L. J. E WILKERSON, G. G. (1991). Modelling competition for light between soybean and broadleaf weeds, *Agricultural Systems* 35(1): 37–51.

WILKERSON, G. G., MODENA, S. A., E COBLE, H. D. (1991). Herb: Decision model for postemergence weed control in soybean, *Agronomy Journal* 83(2): 413–417.

WILLOCQUET, L., SAVARY, S., FERNADEZ, L., ELAZEGUI, F., E TENG, P. (2000). Development and evaluation of a multiple-pest, production situation specific model to simulate yield losses of rice in tropical asia, *Ecological Modelling* 131(2-3): 133–159.

WITHROW, J. R. J. (2004). *The Use of Wisdem Model in the Simulation of Weed Sifts in Glyphosate-Tolerant Cropping Systems*, Department of Agricultural and Resource Economics, Colorado State University. Tese de doutorado.

WU, J. (2001). Optimal weed control under static and dynamic decision rules, *Agricultural Economics* 25(1): 119–130.

YANG, C. C., PRASHER, S. O., ABD J. PERRET, J. A. L., E RAMASWAMY, H. S. (1991). Recognition of weeds with image processing and their use whit fuzzy logic for precision farming, *Canadian Agricultural Engineering* 42(4): 195–200.

ZANIN, G., BERTI, A., E RIELLO (1998). Incorporation of weed spatial variability into the weed control decision-making process, *Weed Research* 38(2): 107–116.