



UFSM

Tese de Doutorado

**SIMULAÇÃO DA NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO NO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL PARA
COMPENSAR PERDAS POR DEFICIÊNCIA HÍDRICA
DE MILHO, SOJA E FEIJÃO**

Mirta Teresinha Petry

PPGCS

Santa Maria, RS, Brasil

2004

**SIMULAÇÃO DA NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO NO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL PARA
COMPENSAR PERDAS POR DEFICIÊNCIA HÍDRICA
DE MILHO, SOJA E FEIJÃO**

Por

Mirta Teresinha Petry

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria (RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **DOUTORA EM CIÊNCIA DO SOLO**.

PPGCS

Santa Maria, RS, Brasil.

2004

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

SIMULAÇÃO DA NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO NO ESTADO
DO RIO GRANDE DO SUL PARA COMPENSAR PERDAS POR
DEFICIÊNCIA HÍDRICA DE MILHO, SOJA E FEIJÃO

elaborada por
Mirta Teresinha Petry

como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutora em Ciência**
do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

Reimar Carlesso, Ph.D. - Orientador

Dalvan José Reinert, Ph.D.

Arno Bernardo Heldwein, Dr.

Nereu Augusto Streck, Ph.D.

Sílvio Steinmetz, Dr.

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004.

“Quando eu vim lá do sertão, seu moço do meu bodocó
A maleta era um saco e o cadeado era um nó. Só trazia a coragem e a cara.
Eu penei mas aqui cheguei...
Eu penei mas aqui cheguei...”
(Zé Ramalho)

À minha família, pela compreensão às longas ausências,
DEDICO este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Reimar Carlesso, pela orientação e presença durante toda a minha vida acadêmica, pela exigência, estímulo e amizade.

À minha irmã e melhor amiga, Célia. Aos meus sobrinhos Vívian Cristina, Gustavo Andrei e Guilherme Mateus.

Ao amigo Genesio, incansável, batalhador, fundamental para a conclusão desse trabalho.

Aos amigos Giane, Cleudson e Zaiosc, pela dedicação, companheirismo e confiança. “A gente não faz amigos, reconhece-os” (Paulo Sant’Ana).

A Fabiano Luiz Zimmermann, pela presença, apoio, entendimento e cumplicidade... *Passamos a vida tentando comover as estrelas e só o que conseguimos é fazer alguns ursos dançarem - ou se irritarem.*

Aos bolsistas e integrantes da equipe de trabalho, Fabiano De Bona, Tatiana, Vanessa, Renato, Juliano, Gustavo, Paulo, Cleiton, Shakan, Jefferson, Fábio, Brantan, Leandro e Francielli, pela dedicação e amizade.

Ao colega e amigo Braidá, uma dedicação especial pelo tempo de convivência. E aos eternos amigos e parceiros, Fernando Zimmermann, Dolores, Vanderlei, Gatiboni, Basso, Mattias, Collares, Secco, Sílvio, Danilo, Ceretta, Dalvan, Zé Miguel, fica o reconhecimento.

Aos colegas de moradia, Sandro Giacomelli e Wellington de Abreu Gonzaga, pelos momentos agradáveis e convivência harmoniosa.

Ao amigo Tarcísio Uberti.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Ciências Rurais, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa e possibilidade de realização deste curso.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------|
| LISTA DE TABELAS | vii |
| LISTA DE FIGURAS | x |
| LISTA DE ANEXOS | xxi |
| RESUMO..... | xxiii |
| ABSTRACT | xxvi |
| 1 - INTRODUÇÃO | 01 |
| 2 - HIPÓTESES | 04 |
| 3 - OBJETIVOS | 05 |
| 4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 05 |
| 4.1 - O déficit hídrico e a produtividade das culturas | 05 |
| 4.2 - Requerimento hídrico das plantas de milho, soja e feijão | 08 |
| 4.3 - Climatologia da distribuição das precipitações pluviais | 12 |
| 4.4 - Zoneamento agroclimático das precipitações pluviais | 15 |
| 4.4.1 - Milho | 16 |
| 4.4.2 - Soja | 18 |
| 4.4.3 - Feijão | 19 |
| 4.5 - Simulação matemática | 20 |
| 4.6 - Análise econômica e de riscos da atividade agrícola | 22 |
| 4.7 - Custos de produção relacionados à atividade agrícola | 24 |
| 4.8 - Irrigação | 26 |
| 5 - MATERIAL E MÉTODOS | 27 |
| 5.1 - Custos de produção | 32 |
| 5.2 - Custos de produção não relacionados à irrigação | 32 |
| 5.2.1 - Custo das operações agrícolas | 33 |
| 5.2.2 - Insumos de produção | 34 |
| 5.3 - Custo de mão-de-obra | 36 |
| 5.4 - Custo da terra, encargos contratuais, custos com assistência técnica e contábil | 37 |
| 5.5 - Custo de produção unitário | 37 |
| 5.6 - Custos de produção relacionados à irrigação | 37 |
| 5.7 - Níveis de frustração de safras considerados | 38 |
| 5.8 - Cálculo da área mínima irrigada | 39 |
| 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO | 40 |
| 6.1 – Estimativa da necessidade de irrigação por região e por cultura | 40 |
| 6.1.1 - Depressão Central | 40 |

| | |
|--|-----|
| 6.1.2 - Planalto Inferior | 49 |
| 6.1.3 - Planalto Médio | 57 |
| 6.1.4 - Missões | 64 |
| 6.1.5 - Baixo Vale do Uruguai | 71 |
| 6.2 – Lâmina máxima, média e mínima de irrigação por região agroecológica e cultura | 76 |
| 6.2.1 – Milho | 76 |
| 6.2.2 – Soja | 79 |
| 6.2.3 – Feijão | 81 |
| 6.3 - Custos de produção unitários de áreas não irrigadas | 83 |
| 6.4 - Custos de produção de áreas irrigadas | 85 |
| 6.5 - Receita líquida de áreas irrigadas | 87 |
| 6.6 - Receita líquida de áreas não irrigadas | 91 |
| 6.7 - Área irrigada necessária para cobrir os custos de produção de área não irrigadas | 94 |
| 6.7.1 - Milho | 94 |
| 6.7.2 - Feijão | 104 |
| 6.7.3 - Soja | 116 |
| 7 - CONCLUSÕES | 128 |
| 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 129 |
| 9 - ANEXOS | 141 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | - Regiões agroecológicas, coordenadas geográficas e período de dados utilizados. Santa Maria, RS, 2004..... | 28 |
| Tabela 2 | - Datas de semeadura simuladas para nove épocas de semeadura do milho durante o período de 1990-2001, na Depressão Central do Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2004..... | 30 |
| Tabela 3 | - Custo operacional de um trator novo, custo dos insumos, custo do operador e reparos. Santa Maria, RS, 2004..... | 33 |
| Tabela 4 | - Relação das operações realizadas para o cálculo dos custos de produção não relacionados à irrigação, para a cultura do milho..... | 34 |
| Tabela 5 | - Quantidade de NPK (fórmula 5-20-20) aplicada para os diferentes níveis de rendimento de grãos de milho, em kg ha ⁻¹ | 35 |
| Tabela 6 | - Quantidade de NPK (fórmula 8-18-28) aplicada para os diferentes níveis de rendimento de grãos do feijão, em kg ha ⁻¹ | 35 |
| Tabela 7 | - Quantidade de NPK (fórmula 0-20-30) aplicada para os diferentes níveis de rendimento de grãos da soja, em kg ha ⁻¹ | 36 |
| Tabela 8 | - Lâmina média, custo de aplicação, de depreciação e total para as culturas do milho, feijão e soja. Santa Maria, RS, 2004..... | 39 |
| Tabela 9 | - Precipitação pluvial acumulada (mm), valores médios e desvio padrão entre as médias, por época de semeadura e ano agrícola para o Planalto Inferior. Santa Maria, RS, 2004..... | 56 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tabela 10 | - Custos de produção do milho irrigado, considerando diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 20,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 86 |
| Tabela 11 | - Custos de produção do feijão irrigado, considerando diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 70,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 86 |
| Tabela 12 | - Custos de produção da soja irrigada, considerando diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 40,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 87 |
| Tabela 13 | - Receita líquida de 100 hectares de milho, para diferentes rendimentos de grãos (sc ha^{-1}) e preço médio de comercialização do produto de R\$ 20,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 91 |
| Tabela 14 | - Receita líquida de 100 hectares de feijão, para diferentes rendimentos de grãos (kg ha^{-1}) e preço médio de comercialização do produto de R\$ 70,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 92 |
| Tabela 15 | - Receita líquida de 100 hectares de soja, para diferentes rendimentos de grãos (kg ha^{-1}) e preço médio de comercialização do produto de R\$ 40,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 93 |
| Tabela 16 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80% com rendimento de 25 sc ha^{-1} de feijão em área não irrigada. Os valores entre parênteses correspondem a porcentagem de área irrigada necessária em relação a área total. Santa Maria, RS, 2004..... | 110 |
| Tabela 17 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80% com rendimento de 42 sc ha^{-1} de feijão em área não irrigada. Os valores entre parênteses correspondem a porcentagem de área irrigada necessária em relação a área total. Santa Maria, RS, 2004..... | 115 |

Tabela 18 - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 45 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80% com rendimento de 60 sc ha⁻¹ de soja em área não irrigada. Os valores entre parênteses correspondem a porcentagem de área necessária em relação a área total. Santa Maria, RS, 2004..... 125

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----------|---|----|
| Figura 1 | Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, para semeaduras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004. | 41 |
| Figura 2 | Déficit de água no solo (linha) e precipitação pluvial (barra) para a época de semeadura de início de outubro em ano de La Niña (1995) e El-Niño (1997), na Depressão Central do RS. Santa Maria, RS, 2004. | 42 |
| Figura 3 | Valores médios da evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração máxima da cultura (ET _m) e precipitação pluvial, para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 44 |
| Figura 4 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 288 e 333 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 45 |
| Figura 5 | Lâminas de irrigação necessárias acumuladas por época de semeadura da soja, na Depressão Central do RS. Santa Maria, RS, 2004..... | 46 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 6 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão, para semeaduras realizadas entre os dias 258 e 348 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 48 |
| Figura 7 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão safrinha, para semeaduras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 49 |
| Figura 8 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, para semeaduras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 50 |
| Figura 9 | - Valores médios de evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração máxima da cultura (ET _m) e precipitação pluvial, para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 51 |
| Figura 10 | - Déficit de água no solo (linha) e precipitação pluvial (barra) para a época de semeadura de 01 de outubro em ano de La Niña (1990) e 15 de outubro em ano de El-Niño (1997), no Planalto Inferior do RS. Santa Maria, RS, 2004..... | 52 |
| Figura 11 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 288 e 333 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 53 |

- Figura 12 - Lâminas de irrigação necessária acumulada por época de semeadura da soja, no Planalto Inferior do RS. Santa Maria, RS, 2004..... 55
- Figura 13 - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão, para semeaduras realizadas entre os dias 258 e 348 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... 55
- Figura 14 - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades de irrigação da cultura do feijão safrinha, para semeaduras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... 57
- Figura 15 - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, para semeaduras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Médio do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... 58
- Figura 16 - Valores médios de evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração máxima da cultura (ET_m) e precipitação pluvial para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, no Planalto Médio do RS. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... 59
- Figura 17 - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 228 e 333 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Médio do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... 60

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 18 | - Lâminas de irrigação necessária acumulada por época de semeadura da soja, no Planalto Médio do RS. Santa Maria, RS, 2004..... | 61 |
| Figura 19 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão, para semeaduras realizadas entre os dias 158 e 348 do ano, no Planalto Médio do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 62 |
| Figura 20 | - Estimativa do déficit hídrico máximo no solo (linha) e precipitação pluvial (barra) para a época de semeadura de 01 de novembro no Planalto Médio do RS. Santa Maria, RS, 2004..... | 63 |
| Figura 21 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão safrinha, para semeaduras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Médio do RS. Santa Maria, RS, 2004..... | 64 |
| Figura 22 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a cultura do milho, para semeaduras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, na Região das Missões do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 65 |
| Figura 23 | - Valores médios de evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração máxima da cultura (ET _m) e precipitação pluvial para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, na Região das Missões do RS. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 66 |
| Figura 24 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 288 e 333 do ano, em 13 anos agrícolas, na Região das Missões do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 67 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 25 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada por época de semeadura da soja, na Região das Missões do RS. Santa Maria, RS, 2004..... | 69 |
| Figura 26 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidade hídricas da cultura do feijão, para semeaduras realizadas entre os dias 258 e 348 do ano, na Região das Missões do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 69 |
| Figura 27 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a cultura do feijão safrinha, para semeaduras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 13 anos agrícolas, na Região das Missões do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 71 |
| Figura 28 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidade hídricas da cultura do milho, para semeaduras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, no Baixo Vale do Uruguai, RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 72 |
| Figura 29 | - Valores médios de evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração máxima da cultura (ET _m) e precipitação pluvial para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, no Baixo Vale do Uruguai. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 72 |
| Figura 30 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 288 e 333 do ano, no Baixo Vale do Uruguai, RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2003..... | 73 |
| Figura 31 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada por época de semeadura da soja, no Baixo Vale do Uruguai, RS. Santa Maria, RS, 2004..... | 74 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 32 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão, para semeaduras realizadas entre os dias 258 e 348 do ano, em 10 anos agrícolas, no Baixo Vale do Uruguai, RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 75 |
| Figura 33 | - Lâmina de irrigação necessária acumulada para a cultura do feijão safrinha, para semeaduras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 10 anos agrícolas, no Baixo Vale do Uruguai, RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004..... | 76 |
| Figura 34 | - Lâmina máxima, média e mínima de irrigação necessária para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, para diferentes épocas de semeadura do milho. Santa Maria, RS, 2004..... | 77 |
| Figura 35 | - Precipitação pluvial média por região (a) e média das precipitações (b) entre as diferentes regiões para a semeadura do milho entre 227 e 347 dias do ano. As barras verticais menores representam o desvio padrão entre as médias. Santa Maria, RS, 2004..... | 79 |
| Figura 36 | - Lâmina máxima, média e mínima de irrigação necessária para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, para diferentes épocas de semeadura da soja. Santa Maria, RS, 2004..... | 80 |
| Figura 37 | Lâmina máxima, média e mínima de irrigação necessária para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, para diferentes épocas de semeadura do feijão safra. Santa Maria, RS, 2004..... | 81 |
| Figura 38 | - Lâmina máxima, média e mínima de irrigação necessária para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, para diferentes épocas de semeadura do feijão safrinha. Santa Maria, RS, 2004..... | 82 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 39 | - Custo operacional para produzir uma saca de milho em diferentes áreas e preço médio de comercialização de R\$ 20,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004..... | 83 |
| Figura 40 | - Custo operacional para produzir uma saca de feijão em diferentes áreas e preço médio de comercialização de R\$ 70,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linhas). Santa Maria, RS, 2004..... | 84 |
| Figura 41 | - Custo operacional para produzir uma saca de soja em diferentes áreas e preço médio de comercialização de R\$ 40,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linhas). Santa Maria, RS, 2004..... | 85 |
| Figura 42 | - Receita líquida (R\$ ha ⁻¹) versus área cultivada irrigada para rendimentos de grãos de 100, 133, 167 e 200 sc ha ⁻¹ de milho e três preços de comercialização do produto. Santa Maria, RS, 2004.. | 88 |
| Figura 43 | - Receita líquida (R\$ ha ⁻¹) versus área cultivada irrigada para rendimentos de grãos de 45, 50, 55, 60, 65 e 70 sc ha ⁻¹ de soja e três preços de comercialização do produto. Santa Maria, RS, 2004.. | 89 |
| Figura 44 | - Receita líquida (R\$ ha ⁻¹) versus área cultivada irrigada para rendimentos de grãos de 25, 33, 42, 50, 58 e 67 sc ha ⁻¹ de feijão e três preços de comercialização do produto. Santa Maria, RS, 2004..... | 90 |
| Figura 45 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 100 sc ha ⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 67 sc ha ⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 94 |
| Figura 46 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 133 sc ha ⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 67 sc ha ⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 96 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 47 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 167 sc ha ⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 67 sc ha ⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50, a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 97 |
| Figura 48 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 100 sc ha ⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 100 sc ha ⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 98 |
| Figura 49 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 133 sc ha ⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 100 sc ha ⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 99 |
| Figura 50 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 167 sc ha ⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 100 sc ha ⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 100 |
| Figura 51 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 100 sc ha ⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 133 sc ha ⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 101 |
| Figura 52 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 133 sc ha ⁻¹) para compensar a frustração de safra com rendimento de 133 sc ha ⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 102 |
| Figura 53 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 167 sc ha ⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 133 sc ha ⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 103 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Figura 54 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 17 sc ha ⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 105 |
| Figura 54 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 17 sc ha ⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 105 |
| Figura 55 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80%, com rendimento de 17 sc ha ⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 106 |
| Figura 56 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 50 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 17 sc ha ⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 107 |
| Figura 57 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 58 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80%, com rendimento de 17 sc ha ⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 108 |
| Figura 58 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 50 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 25 sc ha ⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 111 |
| Figura 59 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 33 sc ha ⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 112 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Figura 60 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 58 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 33 sc ha ⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 113 |
| Figura 61 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 58 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 42 sc ha ⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 114 |
| Figura 62 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 45 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80%, com rendimento de 15 sc ha ⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 117 |
| Figura 63 | - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 45 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 40 a 80%, com rendimento de 30 sc ha ⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 118 |
| Figura 64 | - Área irrigada necessária (produtividade estimada de 55 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 40 a 80%, com rendimento de 30 sc ha ⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 119 |
| Figura 65 | - Área irrigada necessária (produtividade estimada de 65 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 40 a 80%, com rendimento de 30 sc ha ⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 120 |
| Figura 66 | - Área irrigada necessária (produtividade estimada de 45 sc ha ⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 40 a 80%, com rendimento de 45 sc ha ⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... | 122 |

- Figura 67 - Área irrigada necessária (produtividade estimada de 55 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 60 e 80%, com rendimento de 45 sc ha⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... 123
- Figura 68 - Área irrigada necessária (produtividade estimada de 65 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 60 e 80%, com rendimento de 45 sc ha⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a e 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... 124
- Figura 69 - Área irrigada necessária (produtividade esperada de 55 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra 60 e 80%, com rendimento de 60 sc ha⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... 126
- Figura 70 - Área irrigada necessária (produtividade estimada de 65 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra 60 e 80%, com rendimento de 60 sc ha⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004..... 127

LISTA DE ANEXOS

| | | |
|-----------|---|-----|
| Anexo I | - Custo operacional para produzir uma saca de milho em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 16,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004..... | 143 |
| Anexo II | - Custo operacional para produzir uma saca de milho em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 24,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004..... | 143 |
| Anexo III | - Custo operacional para produzir uma saca de feijão em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto R\$ 50,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004..... | 143 |
| Anexo IV | - Custo operacional para produzir uma saca de feijão em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 90,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004..... | 144 |
| Anexo V | - Custo operacional para produzir uma saca de soja em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 30,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004..... | 144 |
| Anexo VI | - Custo operacional para produzir uma saca de soja em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 50,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004..... | 144 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Anexo VII | - Receita líquida de 400 hectares de milho, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 16,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 145 |
| Anexo VIII | - Receita líquida de 1600 hectares de milho, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 24,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 145 |
| Anexo IX | - Receita líquida de 200 hectares de feijão, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 50,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 145 |
| Anexo X | - Receita líquida de 800 hectares de feijão, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 90,00. Santa Maria, RS, 2004..... | 146 |
| Anexo XI | - Receita líquida de 50 hectares de soja, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de 30,00 R\$. Santa Maria, RS, 2004..... | 146 |
| Anexo XII | - Receita líquida de 50 hectares de soja, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de 50,00 R\$. Santa Maria, RS, 2004..... | 147 |

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

SIMULAÇÃO DA NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL PARA COMPENSAR PERDAS POR DEFICIÊNCIA HÍDRICA DE MILHO, SOJA E FEIJÃO

Autora: Mirta Teresinha Petry

Orientador: Reimar Carlesso

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004.

A variabilidade temporal e espacial na distribuição das precipitações pluviais é um dos maiores riscos à atividade agrícola e responsável pela oscilação no rendimento de grãos das culturas de primavera-verão no Estado do Rio Grande do Sul. Para minimizar as perdas na produção de grãos devido às deficiências hídricas, a adoção da irrigação tem sido apontada e recomendada pela pesquisa. Entretanto, para estabelecer um adequado manejo da irrigação, é necessário conhecer, além da quantidade e distribuição das precipitações pluviais, as necessidades hídricas das culturas em diferentes regiões do Estado, solos e épocas de semeadura. Assim, os objetivos desse trabalho foram: determinar a necessidade de irrigação para as culturas do milho, feijão e soja para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai; estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), lâmina de irrigação acumulada necessária por época de semeadura; estimar o custo de produção das culturas do milho, feijão e soja, considerando diferentes expectativas de rendimentos de grãos e

preços de comercialização do produto; e, calcular a área mínima irrigada necessária para cobrir os custos de produção para os níveis de frustração de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%. O trabalho foi desenvolvido com base em uma série contínua de 13 anos de dados meteorológicos diários, provenientes das estações meteorológicas de Santa Maria, Cruz Alta, Passo Fundo, São Luiz Gonzaga e São Borja. Calculou-se o balanço hídrico diário e acumulado durante o ciclo de desenvolvimento das culturas. As datas de semeadura foram fixadas nos dias 01 e 15 de cada mês, dentro do período recomendado de semeadura. A lâmina de irrigação acumulada necessária por cultura, época de semeadura e ano agrícola foi determinada através do Sistema Irriga (<http://www.irriga.proj.ufsm.br>). Determinou-se o custo de produção das culturas do milho, feijão e soja para áreas não irrigadas de 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 ha, considerando-se diferentes expectativas de rendimentos de grãos e três preços de comercialização dos produtos. Para áreas irrigadas de 20, 40, 80, 160, 320 e 640 ha, determinou-se, além dos custos de produção, os custos de aplicação da lâmina e depreciação do equipamento. Sobre a receita bruta total em áreas não irrigadas foram aplicadas frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%. A partir da relação entre a receita líquida x área irrigada, calculou-se a área mínima irrigada necessária para compensar as frustrações de safra em áreas não irrigadas. Os resultados demonstraram que houve maior necessidade de irrigação para as três culturas na Região do Planalto Inferior. Menores lâminas de irrigação para a soja foram verificadas para a Região do Planalto Médio. A necessidade de irrigação complementar para a soja foi semelhante entre a Depressão Central e Planalto Inferior. As lâminas de irrigação necessárias para o feijão (safra) foram de 125, 133, 93, 90 e 114 mm, respectivamente, para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai. Houve uma redução nos custos de produção unitários com o aumento na expectativa de rendimento e estimativa de área plantada. Para uma frustração de safra de 20% sobre o rendimento de grãos de $4,02 \text{ Mg ha}^{-1}$ de milho, as

áreas irrigadas necessárias foram de 3,74, 13,26, 32,30, 70,38, 146,53 e 298,85 ha, para áreas não irrigadas de 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 ha, respectivamente, considerando rendimentos de grãos de 6,0 Mg ha⁻¹ em áreas irrigadas (preço de comercialização de R\$ 16,00). A redução na área irrigada necessária para compensar frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80% foi mais significativa com o aumento no preço do produto do que o aumento no rendimento de grãos e área cultivada.

ABSTRACT

Doctoral Thesis in Soil Science
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

SIMULATION OF SUPPLEMENTARY IRRIGATION FOR MAIZE, SOYBEAN AND DRYBEAN IN THE RIO GRANDE DO SUL STATE TO AVOID YIELD REDUCTION TO SOIL WATER DEFICIT

Author: Mirta Teresinha Petry

Adviser: Reimar Carlesso

Location and Date: Santa Maria, February 27, 2004.

The temporal and spatial variability of the rainfall amount and its distribution is usually the major cause of agricultural yield losses. These variables are responsible for the oscillations in yields of Spring and Summer crops in Rio Grande do Sul State. Irrigation practices are recommended by researchers to minimize grain yield reduction due to soil water deficit. However, to establish an adequate irrigation management, it is necessary to know the rainfall amount and its distribution, as well as the crop water requirements in different environmental conditions, soils and crop sowing dates. The objectives of this work were: to determine irrigation needs for maize, dry beans and soybean crops for Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões and Baixo Vale do Uruguai regions, to estimate reference evapotranspiration (ET_o) and cumulative irrigation water depth for maize, dry beans and soybean in different sowing dates; to calculate maize, dry beans and soybean crop production cost, considering different grain yield expectations and product prices for non-irrigated and irrigated areas and, to calculate the minimum irrigated area

necessary to equalize 0, 20, 40, 60 and 80% of harvest frustration levels in non-irrigated areas. This work was developed based on a historical series of meteorological data (13 years data series) from Santa Maria, Cruz Alta, Passo Fundo, São Luiz Gonzaga and São Borja meteorological stations. The daily and cumulative soil water balance was estimate during the crop cycle in all sowing dates. Sowing dates were fixed on the 1st and 15th days of month within each crop promoted sowing dates, based on a specific agroclimatic zoning. Cumulative irrigation water depth for each crop, sowing date and year were estimated with the Sistema Irriga (<http://www.irriga.proj.ufsm.br>). Crop production cost for irrigated and non-irrigated areas was determined. Over net incomes of non-irrigated areas were applied 0, 20, 40, 60 and 80% of harvest frustration levels. From the relationship among net incomes and irrigated areas, the minimum area to be irrigated in order to compensate the different frustration levels in non-irrigated areas was determined. Results indicated a higher irrigation needs for maize, dry beans and soybean in the Planalto Inferior region. A lower irrigation water depth for soybean were verified for the Planalto Médio region. Similar results of supplementary irrigation water depths were simulated for Planalto Inferior and Depressão Central Regions. The irrigation water depth for drybeans were 125, 133, 93, 90 and 144 mm for Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões and Baixo Vale do Uruguai regions, respectively. Considering an yield reduction of 20% on the maize yield of 4.02 Mg ha⁻¹ the necessary irrigation area were 3.74, 13.26, 32.30, 70.38, 146.53 and 298.85 ha for non-irrigated areas of 50, 100, 200, 400, 800 and 1600 ha, respectively for irrigated yield of 6.0 Mg ha⁻¹ and market price of R\$ 16.00. Crop production costs decreased with the increase of grain yield expectation and cultivated area. The decrease in necessary irrigated area to compensate 0, 20, 40, 60 and 80% of harvest frustration levels was more significant for the increase of product prices than the increase in grain yield expectation and cultivated area.

1 - INTRODUÇÃO

A grande variabilidade ou oscilação no rendimento de grãos das principais culturas agrícolas no Estado do Rio Grande do Sul está associada, entre outros fatores à ocorrência de déficit hídrico no solo. Estatísticas recentes indicam que o Estado produz cerca de 20% da produção nacional de grãos, que representa 122,38 milhões de toneladas (CONAB, 2003). Praticamente todas as culturas de primavera-verão (com exceção do arroz) nesse Estado são cultivadas em condições não irrigadas e, portanto, dependentes do regime de precipitação pluvial.

O Rio Grande do Sul tem destacada posição na produção agrícola nacional, sendo o terceiro maior produtor de milho, com 3.837.276 toneladas (12,23% da produção brasileira). A produtividade média no Estado é de 2.737 kg ha⁻¹ (IBGE, 2003), para uma área plantada de 1.400.000 ha (CONAB, 2003). A soja é a principal cultura agrícola do Estado, tendo superado o milho em área plantada na safra agrícola de 2002/2003. Atualmente, a área plantada com soja é superior a 3.000.000 de hectares (CONAB, 2003), com uma produtividade média de 1700 kg ha⁻¹ (Emater, 2003).

O cultivo do feijoeiro tem elevada importância econômica e social, sendo um alimento básico na dieta dos brasileiros. O feijão é cultivado preferencialmente em pequenas propriedades rurais, com a utilização de baixo índice tecnológico, o que resulta em baixo rendimento de grãos. Apesar do potencial produtivo das cultivares atualmente existentes no mercado, o rendimento médio nacional é de 691 kg ha⁻¹ e de 886 kg ha⁻¹ no Estado do Rio Grande do Sul, para uma área plantada de 158.000 ha (CONAB, 2003).

De acordo com Berlato (1992), a precipitação pluvial anual média do Rio Grande do Sul é de 1.540 mm, sendo superior a 1.500 mm no Norte do Estado e inferior a esse valor na Metade Sul. Embora a sua

distribuição nas quatro estações do ano seja bastante uniforme, a alta demanda evaporativa da atmosfera nos meses de dezembro à fevereiro, devido à maior intensidade de radiação solar e temperaturas do ar mais elevadas, faz com que a precipitação pluvial no período primavera-verão seja, em geral, insuficiente para atender as necessidades hídricas da cultura (Carlesso et al., 2001).

Estudos têm demonstrado que não existe tendência de aumento ou diminuição da precipitação pluvial anual média no Estado (Ávila et al., 1996; Berlato et al., 1995). Existe sim, segundo Fontana & Almeida (2002), uma alta variabilidade interanual desse elemento, o que o torna o principal fator limitante ao rendimento de grãos das culturas de primavera-verão.

O principal objetivo da programação de irrigação é o manejo das irrigações visando maior efetividade das mesmas. A água deve ser aplicada com frequência suficiente para evitar o déficit de água na planta e em quantidades adequadas para prover o reabastecimento de água ao solo até a profundidade efetivamente explorada pelo sistema radicular das plantas. Irrigações acima de um valor ótimo durante a fase vegetativa das plantas diminui a resposta das culturas em produtividade, além de interferir negativamente em outras práticas de manejo, como fertilização, data de plantio e colheita, população de plantas, controle de invasoras e pragas. A saturação em água e concentração de oxigênio é inversamente proporcional. Por isso, a primeira pode reduzir a taxa de difusão de O_2 , o que é indesejável ao crescimento radicular. Irrigações insuficientes, por sua vez, resulta em déficit hídrico e menor resposta das culturas a outros fatores (adubação, resistência do solo à penetração, espaçamento e população de plantas, aplicação de defensivos, etc.), mesmo que a eficiência de irrigação permaneça elevada devido às menores perdas por escoamento superficial e percolação profunda.

A frequência de irrigações requerida pelas culturas e a quantidade de água aplicada em cada irrigação depende da capacidade e armazenamento de água no perfil do solo, da cultura, estágio de

desenvolvimento, época do ano e condições climáticas. Para Matzenauer (1980), o conhecimento das necessidades hídricas das culturas durante o ciclo de desenvolvimento e em cada subperíodo é fundamental para a programação de irrigação suplementar, assim como para o planejamento da agricultura sem o uso de irrigação, determinando assim, melhor eficiência no aproveitamento da precipitação pluvial.

A grande variabilidade dos fatores ambientais que influenciam a produtividade agrícola tem provocado um redirecionamento do planejamento da atividade agrícola como um todo. A alteração fundamental encontra-se na mudança da estrutura fundiária, passando de uma agricultura de subsistência para a de mercado, com ampla inovação e difusão de tecnologias. Dentre as tecnologias disponíveis à empresa rural encontra-se a irrigação. De acordo com Costa (1998), a irrigação é uma tecnologia que possibilita agregar valor ao produto gerado, seja pela qualidade e/ou, principalmente, pela possibilidade de produção na entressafra, resultando em maior renda aos agricultores. Entretanto, uma importante decisão para os agricultores irrigantes é a de quando iniciar a irrigação e quanta água aplicar. Heinemann et al. (2000) cita que a escolha do momento certo de irrigar requer a consideração de vários fatores que fazem parte do processo produtivo, tais como: clima, espécie e estágio de desenvolvimento da cultura e capacidade de armazenamento de água do solo. Além desses, deve-se avaliar se o benefício adicional às culturas irrigadas é maior que o custo da irrigação, comparado ao valor das culturas não irrigadas.

A irrigação é uma prática que consiste na adição de água em uma parte do perfil do solo para o conseqüente uso pelas plantas. De acordo com Hillel (1980), um eficiente manejo da irrigação é aquele que otimiza espacial e temporalmente a distribuição da água, não necessariamente para a obtenção de rendimentos de grãos máximos ou a aplicação de menores quantidades de água, mas aquele que possibilita o melhor custo-benefício do sistema.

A atividade agrícola é afetada por um grande número de riscos e incertezas devido às oscilações ambientais e condições de mercado, à mudanças no preço do produto ou dos insumos. O nível de riscos ambientais pode ser diminuído pelo uso da irrigação (Franke & Dorfman, 1998), pelo planejamento agrícola (Matzenauer et al, 1989 e Carlesso, 1998), diversificação e rotação de culturas (Silva & Dhein, 1994), ou através da melhoria no fornecimento das informações meteorológicas disponíveis. Dentre esses, a irrigação é a que oferece maior probabilidade de futuro retorno do investimento.

2 - HIPÓTESES

O consumo de água pelas plantas depende da época de semeadura, estágio de desenvolvimento e local de cultivo, sendo influenciado pela capacidade de armazenamento de água no solo e condições meteorológicas do ambiente de cultivo.

A necessidade de irrigação suplementar é regulada pela distribuição e lâmina das precipitações pluviais. Assim, a lâmina de irrigação necessária é variável para diferentes regiões, épocas de semeadura e cultura implantada.

O equilíbrio entre receitas e despesas em casos de frustração de safra é obtido através do aumento da produtividade, aumento da área plantada, aumento no preço do produto e, principalmente, do uso da irrigação.

A utilização de irrigação numa fração da área total da propriedade pode compensar a frustração de safra em áreas não irrigadas. O total de área irrigada necessária depende do nível de frustração, do tamanho e produtividade da área não irrigada, do preço do produto e da produtividade em áreas irrigadas.

3 - OBJETIVOS

O principal objetivo desse trabalho foi simular a necessidade de irrigação para as culturas do milho, feijão e soja para as regiões da Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Baixo Vale do Uruguai e Missões, no Estado do Rio Grande do Sul, a partir do balanço hídrico diário para uma série contínua de dados meteorológicos.

Para isso, ênfase especial foi dada para os seguintes objetivos específicos: (i) calcular a evapotranspiração de referência (ET_o), lâmina acumulada de irrigação para as culturas do milho, soja e feijão por época de semeadura; (ii) calcular o déficit hídrico máximo de água no solo por cultura; (iii) calcular o custo de produção das culturas do milho, feijão e soja, considerando diferentes expectativas de rendimentos de grãos e preços de produto, para áreas de 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 hectares; (iv) calcular o custo de produção em áreas sob irrigação suplementar, considerando diferentes expectativas de rendimento e preços do produto, custo de aplicação da lâmina e custo de depreciação em áreas de 20, 40, 80, 160, 320 e 640 hectares e, (v) calcular a área mínima irrigada necessária para cobrir níveis de frustração de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%, na irrigação por pivô central.

4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 - O déficit hídrico e a produtividade das culturas

A água é um fator fundamental à produtividade das culturas e seu consumo é determinado, basicamente, pela demanda evaporativa da atmosfera, tipo de solo e características das plantas, como área foliar, distribuição e profundidade do sistema radicular e altura de plantas (Matzenauer & Sutili, 1983).

Inúmeros trabalhos têm sido realizados com o objetivo de determinar o momento e a duração do déficit hídrico. As respostas das plantas submetidas a déficit hídrico dependem do estágio de desenvolvimento, do genótipo, da duração e da severidade do déficit. Segundo Levitt (1980), Santos (1997) e Santos & Carlesso (1999), no entendimento das respostas das plantas ao déficit hídrico, é fundamental quantificar a disponibilidade de água no solo, além de analisar a influência dos diversos mecanismos utilizados pelas plantas para reduzir as perdas de água.

Para a cultura do milho, as primeiras respostas morfológicas apresentadas em função da deficiência hídrica no solo consistem na redução da área foliar, seguida do fechamento dos estômatos, aceleração da senescência, enrolamento e abscisão de folhas (Boyer, 1970; Mc Cree & Fernandes, 1989; Taiz & Zeiger, 1991; De Souza et al., 1997). Na soja, a redução na expansão foliar e aceleração da senescência das folhas fisiologicamente mais velhas parece ser uma tentativa para reduzir o uso da água (Begg & Turner, 1976; Thomas & Costa, 1994). Por outro lado, a senescência de folhas de soja está relacionada com a translocação de nitrogênio e carbono para o enchimento de grãos em variedades de ciclo curto (De Souza et al., 1997; Egli et al., 1983; Hayati et al., 1995). Segundo Hoogenboom et al. (1987), a recuperação no crescimento de plantas de soja submetidas a déficit hídrico após a aplicação de uma irrigação ou chuva é mais acentuada do que o crescimento de plantas irrigadas normalmente.

O déficit hídrico aumenta a senescência das folhas porque o solo seco não fornece nitrogênio suficiente para suprir as necessidades de crescimento da cultura e o nitrogênio do interior da planta é retranslocado das folhas mais velhas para os pontos de crescimento (Wright et al., 1983). Wolfe et al. 1988 demonstraram que a senescência das folhas induzida pelo déficit hídrico é mais intensa no período de enchimento de grãos e aumenta caso a planta possua um elevado número de grãos por unidade de área foliar.

O milho é relativamente tolerante ao déficit hídrico durante a fase vegetativa, porém demonstra extrema sensibilidade com acentuado decréscimo no rendimento de grãos se o déficit hídrico ocorrer na fase de florescimento e enchimento de grãos (Kasele et al., 1994). O déficit hídrico na pré-antese afeta o desenvolvimento das estruturas vegetativas das plantas, reduzindo a capacidade de produção de fitomassa pela cultura, e o desenvolvimento de grãos de milho é altamente dependente de um contínuo suprimento de assimilados para a espiga, decorrente da fotossíntese (Shussler & Wesgate, 1991).

O número de ramos de plantas de soja não é modificado pelo déficit hídrico, porém o crescimento deles pode diminuir nessa condição (Momen et al., 1979; Korte et al., 1983a; Thomas & Costa, 1994). Segundo Kadhem et al. (1985), é possível que plantas de hábito de crescimento indeterminado sejam mais sensíveis ao déficit hídrico do que aquelas de crescimento determinado. Normalmente, o número de nós formados é um fator genético, independente da ocorrência de déficit hídrico, porém a taxa de emissão de folhas é significativamente reduzida, indicando que essa característica depende das condições do meio (Sinclair et al., 1998). Diferenças na alongação do caule principal da soja durante o período de deficiência hídrica são associados com o comprimento dos entrenós. Diferenças no comprimento dos entrenós são verificados na faixa intermediária do caule, entre os nós 6 à 12 (Hoogenboom et al., 1987).

O déficit hídrico diminui a altura de plantas de soja, porém o número de nós no colmo não é alterado (Momen et al., 1979; Hoogenboom et al., 1987; Thomas & Costa, 1994). O aumento na concentração de ácido abscísico (ABA) é responsável pela diminuição da extensibilidade da parede e condutância de água e CO₂ dos tecidos do caule de plantas de soja sob déficit hídrico (Davies & Zhang, 1991). Muitos estudos correlacionam a influência do ABA na resposta das plantas a baixos teores de água no solo.

A sensibilidade da cultura da soja ao déficit hídrico é mínima durante a fase vegetativa, a não ser que a severidade limite o porte da planta (Boerma & Ashley, 1982), porém é máxima durante o período reprodutivo, principalmente na formação de legumes e enchimento de grãos (Korte et al., 1983b). A redução no rendimento de grãos de plantas de soja submetidas a déficit hídrico na floração é devido ao encurtamento do período de floração, produção de menor número de flores e legumes e pelo abortamento de flores (Maehler et al., 2003).

Guimarães et al. (1996) encontraram que 15 dias de déficit hídrico no estágio de pré-antese ou antese, reduz em 20%, na média, o rendimento de grãos do feijoeiro. Norman et al. (1995) verificaram que pode ocorrer redução em até 50% no rendimento de grãos quando o déficit hídrico ocorre de cinco a dez dias antes da antese. Os sintomas mais comuns da deficiência hídrica no feijoeiro são a abscisão de folhas e órgãos reprodutivos, menor interceptação da radiação solar pelo enrolamento das bordas das folhas e encurtamento ou prolongamento do ciclo (Rubin, 2003), dependendo da severidade do déficit hídrico.

4.2 - Requerimento hídrico das plantas de milho, soja e feijão

Em condições ideais de disponibilidade hídrica, a quantidade de água consumida pelas plantas é igual à evapotranspiração máxima da cultura (ET_m). Esta, por sua vez, é função das condições meteorológicas que ocorrem durante o ciclo de desenvolvimento das plantas (Matzenauer et al., 1998).

A água é o principal fator de crescimento das plantas, sendo responsável pelas oscilações na produtividade e rendimento de grãos das culturas nas diferentes regiões agrícolas. De acordo com Taiz & Zeiger (1991), a água é, ao mesmo tempo, o fator mais importante e o mais limitante à produtividade das culturas. Devido à sua importância nos sistemas agrícolas, muita atenção tem sido dada aos estudos que envolvem o armazenamento de água no solo e sua disponibilidade às plantas. Segundo Ritchie (1981), Carlesso (1995) e Petry (2000), a

dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera é afetada pela capacidade de armazenamento de água no solo, sua depleção e reabastecimento pelas precipitações pluviais ou irrigações e, principalmente, ao eficiente manejo do solo e água pelas explorações agrícolas.

As interações planta-ambiente são uma parte essencial do processo através do qual as plantas resistem às diferentes condições ambientais. Para Hatfield (1997), o déficit hídrico que atinge as plantas resulta das condições atmosféricas, da disponibilidade de água no solo, da habilidade das plantas em extrair água de um volume suficiente de solo e do transporte da água através das plantas. Conseqüentemente, as plantas podem manifestar sintomas de deficiência hídrica devido à excessiva demanda evaporativa atmosférica, à ausência de água na região de distribuição do sistema radicular para suprir a demanda evaporativa, ou uma limitação fisiológica do sistema radicular e vascular. De acordo com Davies & Zhang (1991), respostas fisiológicas das plantas determinam uma maior ou menor resistência das plantas ao déficit hídrico.

Diferenças no conteúdo de água do solo também ocorrem devido às diferenças na extração da água pelas plantas (NeSmith *et al.*, 1987). A agressividade do sistema radicular das plantas em diferentes situações pode influenciar a distribuição temporal e vertical do conteúdo de água no solo. Isso demonstra que o conteúdo de água no solo é influenciado por inúmeros fatores, desde as características do solo até os métodos de determinação, ratificando, portanto, resultados apresentados na literatura que evidenciam uma grande variabilidade do conteúdo de água no solo.

Segundo Matzenauer & Sutili (1983), o consumo de água pelas culturas depende dos seguintes fatores: condições meteorológicas que determinam a demanda evaporativa da atmosfera, tensão da umidade no solo, tipo de solo e características da planta como área foliar, sistema radicular e altura da planta. Em experimentos realizados com a cultura do milho no Rio Grande do Sul, Berlato & Molion (1981) afirmam que, o conhecimento do consumo de água pelas plantas (evapotranspiração

máxima) é essencial para se poder estimar a quantidade de água requerida para as irrigações. Também, o conhecimento do consumo de água nos diversos subperíodos de desenvolvimento das plantas cultivadas, permite o manejo mais racional e efetivo da irrigação de acordo com a exigência da cultura.

Em quatro anos de cultivo, Matzenauer et al. (1981) encontraram valores de evapotranspiração máxima (valores médios) para o ciclo da cultura do milho de 573 mm (da sementeira à maturação fisiológica), variando de 522 mm a 624 mm nos diferentes anos, com consumo médio diário de 4,6 mm. O subperíodo de maior consumo de água foi o do pendoamento ao espigamento, atingindo valores médios diários de 7,0 mm dia⁻¹. O menor consumo foi no subperíodo da sementeira à emergência, com 2,1 mm dia⁻¹.

Estudando a evapotranspiração do milho na Região de Santa Maria, Muller (1989) obteve valores médios de 4,7 mm dia⁻¹ no ciclo, quando submeteu as plantas à tensão de água no solo de 30 kPa na camada superficial do solo. Nessa mesma condição, no estágio de floração, obteve consumo médio de 8,9 mm dia⁻¹ de água. Entretanto, Pommerening (1989) constatou que tensões matriciais crescentes de água no solo afetam de forma significativa as características morfológicas das plantas de milho, diminuindo a área foliar e o número de folhas fotossinteticamente ativas e aumentando a densidade e o índice estomático foliar, mas não afetam de forma significativa a altura das plantas.

A evapotranspiração real de uma cultura depende da disponibilidade de água no solo, do estágio de desenvolvimento da cultura e das condições meteorológicas que determinam a demanda evaporativa da atmosfera. Em consequência, a evapotranspiração real se aproxima da evapotranspiração máxima da cultura em anos com boa disponibilidade hídrica e regiões com menor probabilidade de ocorrência de déficit hídrico no solo. Cunha et al. (1998) determinaram a perda potencial de

rendimento da soja por deficiência hídrica para Cruz Alta, em relação a produtividade dessa em anos normais, indicando uma perda estimada de 58% para semeadura em 15 de outubro, 50% para 5 de novembro e 36% para 5 de dezembro para Cruz Alta. Para as mesmas épocas de semeadura, os autores observaram menor perda potencial no rendimento de grãos para Passo Fundo, em relação a Cruz Alta.

Em trabalho realizado com a cultura da soja em cinco regiões do Estado, Berlato (1987) encontrou uma alta correlação entre o rendimento de grãos e a evapotranspiração real da cultura. Para as condições da Depressão Central do Rio Grande do Sul, para os anos agrícolas de 1974/75 a 1981/82, Berlato et al. (1986) encontraram um consumo médio diário de 6,1 mm dia⁻¹, e um consumo total de 820 mm desde a semeadura até a maturação fisiológica. Para as condições de Santa Maria, Petry et al. (2003) encontraram um consumo de 678 mm, para um consumo médio de 3,59 mm dia⁻¹. A menor evapotranspiração diária da cultura da soja para as condições de Santa Maria pode ser parcialmente explicada pela duração do ciclo da cultura, que foi de 189 dias.

Em trabalhos realizados para várias épocas de semeadura da soja e diferentes locais do Estado, Matzenauer et al. (1998) encontraram valores de evapotranspiração máxima da cultura que variaram de 664 mm para semeadura de dezembro em Cruz Alta e 930 mm para a semeadura realizada em outubro em Júlio de Castilhos. A evapotranspiração real para os mesmos locais e épocas de semeadura variou de 474 mm para Cruz Alta e 620 mm para Júlio de Castilhos.

A quantidade de água requerida pela cultura do feijoeiro para obtenção do máximo rendimento de grãos varia de 300 a 500 mm (Doorenbos & Kassan, 1979). Matzenauer et al. (1999) encontraram um consumo médio de 3,5 mm dia⁻¹, o que corresponde a 300 mm durante todo o ciclo. Steinmetz (1997) observou um consumo de 4,5 mm dia⁻¹, atingindo valores máximos de 6 mm dia⁻¹ durante a floração.

De acordo com Moreira et al. (1996), o requerimento hídrico do feijoeiro é variável, sendo influenciado por fatores como época, local de

semeadura, variedade, condições edafoclimáticas e estágio de desenvolvimento da cultura. O manejo da irrigação é importante no estabelecimento de lâminas adequadas de irrigação, possibilitando a determinação do momento exato de acionar o sistema e a quantidade de água a aplicar (Carlesso, 1998). Esse controle pode ser feito através da ETm ou da quantidade de água extraída do solo. Para Jadoski (1999), a aplicação de lâminas críticas de irrigação de 30 mm proporcionou a melhor resposta das plantas quanto ao rendimento de grãos e altura de inserção da primeira vagem.

A cultura do feijoeiro é extremamente sensível ao déficit hídrico no solo em virtude da baixa capacidade de recuperação das plantas após a ocorrência do mesmo, principalmente devido ao sistema radicular pouco profundo (Guimarães et al., 1996) e ao ciclo curto. Segundo Oliveira & Silva (1990), as raízes do feijoeiro apresentam máxima efetividade de absorção de água até 60 cm de profundidade e, usualmente aos 55 dias após a emergência, as plantas paralisam o seu crescimento em profundidade.

4.3 - Climatologia da distribuição das precipitações pluviais

A variabilidade interanual no rendimento de grãos das principais culturas de primavera-verão no Estado do Rio Grande do Sul deve-se, em grande parte, a desuniformidade existente na quantidade e distribuição das precipitações pluviais. Análises desenvolvidas por Matzenauer et al. (1995) apontaram uma alta correlação entre as variações da produção agrícola, no tempo e no espaço, com as condições meteorológicas e climáticas. E, dentre estas variáveis, o fator hídrico é o que, com maior frequência e intensidade, afeta o rendimento de grãos das culturas.

Apesar da importância econômica e social das culturas do milho, soja e feijão, as produtividades médias dessas culturas ainda são baixas, se comparados com outros países como os Estados Unidos, ou outros Estados brasileiros. As principais causas do baixo rendimento de grãos estão associadas ao uso de baixa tecnologia de produção e perdas

parciais e totais das safras devido a elementos meteorológicos. Segundo Ávila (1996), a probabilidade da precipitação pluvial ser superior à evapotranspiração potencial, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, é inferior a 60%, em praticamente todo o Estado. Berlato (1992) e Berlato & Fontana (2001) mostram que os baixos rendimentos médios da cultura da soja estão relacionados a anos em que ocorreram deficiências hídricas. Fontana et al. (2002) demonstraram que os maiores rendimentos obtidos pela soja e milho estão associadas a anos de El Niño e uma tendência de rendimentos modestos dessas culturas em anos de La Niña (1995/96, 1998/99, e 1999/2000). As estatísticas do rendimento da soja nas últimas três décadas, mostram uma frequência de 32% de redução no rendimento de grãos por estiagem, ou seja, a cada três safras, em média, ocorre redução na produção por deficiência hídrica. Segundo dados da EMATER/RS, as causas das perdas das safras no Estado no período entre 1992 e 1997 foram a estiagem (92,6% e 88,4%, para a soja e milho, respectivamente) e chuva excessiva, geada, granizo, pragas, doenças, etc. (7,4 e 11,6%, respectivamente, para a soja e milho).

A maior parte do trabalhos que estudaram o comportamento da distribuição pluvial no Rio Grande do Sul analisaram a distribuição anual e mensal desse elemento meteorológico. Valores anuais e mensais de precipitação pluvial são importantes mas de uso restrito para a agricultura, pois, segundo Fontana & Almeida (2002), a inconsistência dessas informações está no fato de que a análise das precipitações pluviais engloba somente o total de precipitação pluvial e não a precipitação efetiva ou aproveitável. Ainda, segundo esses autores, a carência maior de informações é na climatologia de número de dias da distribuição pluvial em períodos menores que a mensal.

A precipitação efetiva ou aproveitável é um dos elementos básicos a ser considerado na equação do balanço hídrico para determinar a necessidade de irrigação suplementar das culturas. A precipitação efetiva para fins agrícolas foi definida primeiramente por Hayes & Buell, citados por Dastane (1974), como sendo a precipitação total menos o

escoamento superficial, percolação profunda e evaporação. Assim, vários fatores influenciam na porção efetiva da precipitação pluvial, os quais podem atuar isoladamente ou interagir com outros. Qualquer fator que afeta a infiltração de água no solo, o escoamento superficial ou a evaporação, tem influência na precipitação efetiva.

O déficit hídrico é caracterizado pela ocorrência de precipitação pluvial inferior à evapotranspiração potencial ou de referência (Berlato, 1992). Ávila et al. (1996) demonstram que, nos meses de setembro e outubro, a probabilidade da precipitação pluvial superar a evapotranspiração potencial é de 90 e 70%, respectivamente. Os meses de setembro e outubro representam o início do ano agrícola para as culturas de primavera-verão, principalmente o milho e o feijão. Já em novembro, principal mês de semeadura da soja, a probabilidade da precipitação pluvial superar a evapotranspiração é inferior a 50%, na maioria das regiões do Estado. Entretanto, embora a probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nesse período seja pequena, muito em função da menor demanda hídrica pelas culturas nos estádios iniciais de desenvolvimento, em novembro pode ocorrer déficit hídrico mais severo. A maior probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica em dezembro, janeiro e fevereiro está associada ao aumento da radiação solar e temperatura do ar, resultando em maior demanda evaporativa da atmosfera. Esses são considerados os meses mais críticos em relação à disponibilidade hídrica às culturas, pois é nessa época que as principais culturas de primavera-verão apresentam seu máximo crescimento vegetativo e reprodutivo, com o máximo consumo de água e máxima sensibilidade ao déficit hídrico (Ávila et al., 1996).

A distribuição espacial do total anual do número de dias com precipitação pluvial no Rio Grande do Sul mostra um gradiente no sentido Oeste-Leste, sendo que o Planalto Superior e Serra do Nordeste apresentam o maior número de dias com precipitação pluvial, enquanto os valores menores ocorrem no Baixo Vale do Uruguai e Campanha (Fontana & Almeida, 2002). Os mesmos autores observaram que,

enquanto o total de precipitação pluvial não apresenta tendência de acréscimo nem de diminuição, o número de dias com precipitação pluvial sofreu um incremento, variando de cinco dias no Baixo Vale do Uruguai e mais de 20 dias no Planalto Superior e Serra do Nordeste. Por meio dessa análise, verificaram que houve um incremento linear de um dia nas precipitações pluviais a cada três anos. Pode-se, portanto, inferir que o mesmo total anual de precipitação pluvial está sendo distribuído em um maior número de dias.

4.4 - Zoneamento agroclimático das culturas do milho, soja e feijão por épocas de semeadura

Em condições naturais de ecossistemas cultivados, a produtividade das culturas depende direta ou indiretamente do meio ambiente, sendo o regime hídrico e o regime térmico, os fatores mais importantes. O zoneamento agroclimático possibilita estabelecer critérios de escolha de datas de semeadura e locais climáticos que melhor atendem as exigências das culturas e diminuir os riscos causados por adversidades do tempo ou meteorológicos. Além disso, é uma importante ferramenta no planejamento da atividade agrícola e em questões legais de liberação de crédito e seguro agrícola.

O conhecimento dos valores diários de precipitação pluvial, evapotranspiração e soma térmica são necessários para a avaliação dos diferentes sub-períodos de desenvolvimento em relação às respostas das culturas (Nield et al., 1983). A taxa de crescimento e desenvolvimento de uma cultura pode ser modificada por uma série de fatores, tais como fotoperíodo, conteúdo de água no solo, fertilidade; porém, é primariamente dependente da temperatura (Cross & Zuber, 1972). O efeito da temperatura sobre o desenvolvimento vegetal tem sido descrito usando-se a concepção de unidades de calor, como os graus-dia, os quais assumem que o desenvolvimento é constante por grau-dia, entre uma temperatura mínima ou temperatura base, e uma temperatura máxima (Stewart et al., 1998), abaixo e acima das quais a planta não se

desenvolve e, se o fizer, será em taxas muito reduzidas (Prela & Ribeiro, 2002). O conceito de graus-dia (GD) e graus-dia acumulados (GDA) foi introduzido para superar inadequações no calendário civil, prever eventos fenológicos (Warington & Kanemasu, 1983), identificar as melhores épocas de semeadura, escalonar a produção das culturas e programas de melhoramento (Prela & Ribeiro, 2002).

Inúmeros trabalhos têm demonstrado a importância da utilização de GDA (Cross & Zuber, 1972; Stewart et al., 1998; Ritchie & NeSmith, 1991) para prever eventos fenológicos, bem como para o zoneamento agroclimático das culturas (Mota et al., 1974; Maluf et al., 2000), uma vez que esses independem da época e local de cultivo da planta. Sammis et al. (1985) destacam que a contagem do tempo por um relógio biológico (GDA) é menos variável que a contagem por dias do calendário.

A contabilização dos valores de graus-dia numa seqüência de anos, para determinadas culturas, possibilita o planejamento adequado da atividade agrícola na agricultura não irrigada e irrigada. Nied (2003) utilizou essa técnica em nível diário para verificar as épocas de semeadura do milho com menor ou maior risco de ocorrência de deficiência hídrica em Santa Maria. Na agricultura não irrigada, o aspecto mais importante é a indicação da data favorável de semeadura, de maneira a coincidir a fase de maior sensibilidade da cultura à deficiência hídrica com o período de menores riscos à ocorrência dessa. Na agricultura irrigada, os GDA são importantes para o escalonamento da produção, ou seja, prover a sucessão de cultivos na primavera-verão e culturas de inverno, visando a máxima otimização do sistema de irrigação, sem causar prejuízos a sustentabilidade do sistema.

4.5.1 - Milho

De acordo com Mota et al. (1974), o milho pode ser cultivado em praticamente todo o Estado do Rio Grande do Sul, embora alguma região, como a Serra do Nordeste, apresentem uma estação de crescimento demasiadamente curta, em função da baixa disponibilidade térmica.

As exigências térmicas da maioria dos genótipos de milho pode variar para os processos de germinação e crescimento, porém poucas desenvolvem com temperaturas inferiores a 10°C (Maluf et al., 2000). Estimativas da temperatura mínima de crescimento ou temperatura base para o milho situam-se entre 10 e 6°C (Stewart et al., 1998), considerando as condições de clima temperado. Estimativas do limiar superior ou temperatura máxima para o mesmo período estão na ordem de 19 a 34°C (Ritchie & NeSmith, 1991). Ferraz citado por Maluf et al. (2000) indicam as temperaturas cardinais de 10, 30 e 41°C como a temperatura mínima, ótima e máxima de crescimento do milho, respectivamente. Estimativas da temperatura máxima para o período vegetativo e reprodutivo encontram-se entre 19 e 34°C (Ellis et al., 1992).

A indicação das datas de semeadura para o milho em que as chances de ocorrerem prejuízos causados por deficiência hídrica são menores requer a definição do ciclo do híbrido/variedade, do tipo de solo e da região de cultivo. Segundo Maluf et al. (2000), a classificação das zonas aptas para o cultivo do milho dá-se a partir da soma de GD da semeadura até o espigamento (75% das plantas com exteriorização de 2 cm dos estiletes), quando não há limitação hídrica. Para a elaboração do mapa de deficiência hídrica, os mesmos autores utilizaram como parâmetro a deficiência hídrica acumulada, que correspondeu a deficiência no mês do florescimento, mais a deficiência hídrica do mês anterior e posterior ao florescimento. Assim, o zoneamento agroclimático do milho classifica as épocas de semeadura por região em preferencial I e II, tolerada, marginal e não recomendado. A região preferencial I e II apresenta de zero a 25 mm de deficiência hídrica por ocasião do florescimento, enquanto as áreas não recomendadas ao cultivo apresentam mais de 70 mm de deficiência hídrica acumulada nesse período. Com relação ao regime térmico, as regiões preferenciais I e II são as que apresentam de 800 a 700 GDA até o florescimento, para semeaduras a partir de 1° de setembro e de 900 à 850 GDA para semeaduras realizadas antes dessa data. Já as regiões não

recomendadas são as que apresentam menos de 650 GDA para semeadura a partir de 1° de setembro e menos de 850 GDA, para semeaduras anteriores a essa data, considerando 75% das plantas espigadas.

4.5.2 - Soja

A soja pode ser cultivada em todo o Estado do Rio Grande do Sul e, atualmente, é a principal cultura agrícola, respondendo por praticamente 20% da produção de grãos no Estado. Além de sua importância econômica, a soja apresenta um papel fundamental no sistema de rotação de culturas da propriedade, favorecendo a integração entre a planta, o ambiente e o sistema de cultivo utilizado.

O fotoperíodo e a disponibilidade térmica são os principais fatores ecológicos que afetam o desenvolvimento da cultura da soja, favorecendo mudanças qualitativas ao longo do ciclo. Entretanto, de acordo com Rodrigues et al. (2001), a resposta não é linear durante o ciclo e existem subperíodos onde a planta é incapaz de perceber esses estímulos. Vários estudos têm caracterizado esses subperíodos quanto à sensibilidade à temperatura e ao fotoperíodo, principalmente entre a emergência e a floração (Wilkerson et al., 1989). No período entre a emergência e a primeira folha (V_1) as plantas de soja não percebem os sinais fotoperiódicos; somente a partir dessa fase, dependendo do genótipo, as plantas começam a responder ao fotoperíodo.

A sensibilidade fotoperiódica varia com o genótipo e o grau de resposta genotípica ao estímulo fotoperiódico é o principal determinante da área de adaptação das diferentes cultivares. Nas cultivares que são sensíveis ao fotoperíodo, a resposta é quantitativa, o que significa que a floração ocorre de qualquer modo, mas o tempo requerido para a indução à floração depende do comprimento do dia, sendo mais rápida com dias curtos do que com dias longos (Rodrigues et al., 2001). É de conhecimento que o número de dias entre a emergência e a floração depende da influência da temperatura e do fotoperíodo e que existe

determinado limite de comprimento de dia suficientemente curto para induzir a floração e suficientemente longo para impedi-la. Este é definido como o fotoperíodo crítico e que varia entre cultivares.

A previsão da data de floração, bem como de outros estádios de desenvolvimento da soja é de grande importância para o manejo da cultura e ainda pode fornecer indicações sobre como manejar a cultura para escapar de períodos de deficiência hídrica e demais estresses abióticos (Rodrigues et al., 2001).

4.5.3 - Feijão

O feijoeiro pode ser cultivado em todo o Rio Grande do Sul, variando, entretanto, o rendimento de grãos e os riscos climáticos decorrentes da variabilidade interanual, conforme a época de semeadura e entre regiões. De acordo com as Recomendações Técnicas para o Cultivo do Feijoeiro para o Rio Grande do Sul (2000), a época de semeadura para o feijão na safra situa-se entre 10 de agosto e 20 de outubro. Entretanto, a maior parte da semeadura encontra-se concentrada nos meses de outubro e novembro, em função da ocorrência de geadas tardias nas regiões potencialmente produtoras. Na safrinha, a época preferencial de cultivo situa-se entre 20 de janeiro e 25 de fevereiro.

A cultura do feijoeiro não tolera geadas durante o seu ciclo de desenvolvimento. Assim, o risco de geadas deve ser considerado como um fator restritivo ao cultivo. Temperaturas do ar abaixo de 10°C durante a germinação e desenvolvimento vegetativo causam redução de vigor e lesões na folha (Kish & Ogle, 1980). Os mesmos autores definem 10°C como a temperatura basal do feijoeiro, para efeito da estimativa das necessidades térmicas da cultura. As regiões ideais para cultivar feijão devem possuir temperatura média, durante o ciclo da cultura, entre 20 e 22°C, sendo considerada ótima a temperatura de 21°C. Temperaturas médias acima de 24°C durante o florescimento e formação dos legumes determinam efeitos negativos no rendimento de grãos, por provocarem o abortamento de flores e botões florais. Assim, a temperatura média

durante o mês mais quente do ciclo da cultura não deve ser superior a 24°C (Maluf & Caiaffo, 1999).

4.5 - Simulação matemática

A simulação numérica vem sendo amplamente utilizada como uma ferramenta altamente eficiente na complementação de pesquisas experimentais. Nos últimos anos, vários modelos foram desenvolvidos para testar e avaliar a resposta das culturas em diferentes condições ambientais. Segundo Whisler et al. (1986), existem pelos menos três razões para desenvolver modelos de simulação: (i) ajudar na interpretação de resultados experimentais; (ii) como ferramenta de desenvolvimento de pesquisas agronômicas e; (iii) como ferramenta de crescimento agrônomo. Boote et al. (1996), destacando as potencialidades e limitações no uso de modelos de simulação em culturas destacam a importância dos modelos na decisão de sistemas de cultivo e manejo da cultura.

Modelos de simulação podem auxiliar os agricultores na tomada de decisões porque fornecem informações sobre as respostas das culturas em uma grande variedade de condições ambientais e práticas de manejo. Os modelos de simulação têm sido utilizados na avaliação de novas tecnologias ou práticas culturais e para a transferência de tecnologia (Ritchie, 1986). Dentre os modelos de simulação utilizados na agricultura, os que simulam o crescimento das culturas são os que têm recebido mais atenção, ultimamente. De acordo com Tojo-Soler et al. (2001), simulações para a identificação de práticas de manejo (época de semeadura, espaçamento, adubação, etc) podem ser realizadas com baixo custo, utilizando-se uma série histórica de dados meteorológicos. Para Rosa (2000), a partir de uma série de dados meteorológicos de uma região, pode-se simular a necessidade de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento das culturas. Entretanto, muitas vezes a validação da informação fornecida é limitada pelas inúmeras situações de contorno utilizadas em cada modelo. Para que um modelo possa ser utilizado mais

genericamente, ele deve ser capaz de estimar com precisão a resposta da cultura semeada em qualquer época, clima ou solo (Alagarswamy & Ritchie, 1991).

Entretanto, a simulação das necessidades de irrigação a partir de séries históricas de dados meteorológicos tem recebido contestações (Heinemann et al., 2000), principalmente para regiões úmidas e subtropicais. Segundo Smith et al. (1985) a utilização de um programa de manejo de irrigação fixo, baseado em dados meteorológicos médios de uma região, pode levar a um manejo ineficiente da água de irrigação, principalmente devido a alta variabilidade entre o total e a distribuição das precipitações pluviais.

Ao longo das últimas três décadas, vários estudos têm sido realizados sobre modelos de simulação. Stocke & Campbell (1985) desenvolveram um modelo de simulação do transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera, ligado com simulação dos processos de fotossíntese e crescimento da cultura. Jones & Kiniry (1986) desenvolveram o modelo CERES-Maize para a caracterização da duração dos estádios vegetativo, reprodutivo e de enchimento de grãos do milho, em diferentes situações de cultivo. Para Costa & Barros (2001), a análise do ajuste do modelo ao longo do desenvolvimento do milho permite inferir que o índice de área foliar e o incremento de matéria seca são as variáveis que apresentam menor ajuste aos dados observados.

Os modelos de simulação servem como uma ferramenta indispensável nos estudos experimentais, pois possibilitam que os resultados desses sejam colocados em uma perspectiva dinâmica e quantitativa. Os modelos podem ser utilizados para extrapolar resultados experimentais, além das condições particulares onde o estudo é realizado. Se o entendimento dos processos biológicos e ambientais podem ser expressos em termos quantitativos (matematicamente, por exemplo), os processos de crescimento e desenvolvimento das plantas, suas interações e relações com o meio ambiente podem ser combinadas em um programa de computador. Sistemas dessa ordem ou com essa

finalidade são utilizados na agrometeorologia operacional e também podem ser utilizados como ferramenta auxiliar da pesquisa.

4.6 - Análise econômica e de riscos da atividade agrícola

O objetivo de toda atividade econômica é a minimização dos custos de produção ou a maximização dos retornos econômicos líquidos através do tempo (Kindler, 1988). A maximização dos retornos econômicos na atividade agrícola pode ser alcançada através do aumento da produtividade, da melhoria do preço do produto, do aumento da área cultivada e da redução dos custos ou, da combinação desses fatores. Segundo Rosa (2000), o aumento no retorno econômico líquido em função do aumento na área cultivada é menos significativo que o aumento na produtividade, concluindo que a melhor combinação possível é o aumento no rendimento de grãos por unidade de área e aumento na área cultivada. Isso porque, a redução no custo de produção por unidade produzida (sacos) com o aumento da área cultivada geralmente é menor que a redução no custo com o aumento no rendimento de grãos.

A atividade agrícola está constantemente sujeita aos riscos e incertezas que fazem parte do processo produtivo. O grau de incerteza no processo decisório sobre a atividade agrícola é o grande responsável pela ineficiência da atividade agrícola. Segundo Arruda (1982), o grau de incerteza é condicionado pelo volume de informações a que o indivíduo tem acesso durante o processo decisório. Assim, quanto maior for o volume de informações disponibilizadas ao produtor rural, maior é a probabilidade de acertar a alternativa escolhida quanto ao planejamento da atividade agrícola.

A eficiência na alocação de recursos produtivos constitui-se num objetivo natural de todo indivíduo ou empresa envolvido na produção de determinado bem ou produto (Franke & Dorfman, 1998). Segundo esses autores, a ineficiência é causada pela incerteza durante o processo decisório. Além disso, as incertezas são geradas pelo volume de informações disponíveis e pelo grau de confiabilidade nas alternativas

propostas, principalmente aquelas que norteiam a atividade agrícola. De acordo com Kindler (1988), em todos os modelos de eficiência econômica, o objetivo é a minimização dos custos de produção ou a maximização dos retornos econômicos líquidos através do tempo nos projetos de irrigação.

A análise econômica da atividade agrícola é fundamental para o planejamento da atividade agrícola e para fins de custeio e financiamento. Do ponto de vista estatístico, os custos de produção buscam observar um comportamento dos níveis tecnológicos praticados nos cultivos agrícolas. Além disso, os custos de produção constituem-se numa importante ferramenta de avaliação da eficiência da atividade agrícola, uma vez que contemplam todos os fatores envolvidos no processo de produção.

Shape citado por Franke & Dorfman (1998) define risco como a distribuição de probabilidades dos futuros retornos de investimentos. Para Marchetti (1995), risco é a variabilidade ou instabilidade dos possíveis retornos de um investimento. A atividade agrícola está constantemente afetada por um grande número de riscos e incertezas, principalmente aquelas originadas nas oscilações ambientais (Franke & Dorfman, 1998). Além disso, existem os riscos de mercado, oriundos do superávit da oferta em relação a demanda, fato que gera a queda do preço do produto.

De acordo com Berlato (1992) e Ávila et al. (1996), a probabilidade de ocorrência de déficit hídrico durante o ciclo de desenvolvimento das culturas de primavera-verão no Estado é da ordem de 30% ao ano. Ou seja, a cada três safras agrícolas, uma seria seriamente afetada ou reduzida devido à deficiência hídrica no solo. O nível de risco pode ser diminuído através do uso da irrigação (Franke, 1990; Rosa, 2000), através do planejamento da atividade agrícola (Matzenauer et al., 1989), fazendo coincidir as épocas de maior consumo de água pelas plantas com a maior disponibilidade hídrica da região (Carlesso et al., 2001) e diversificação e rotação de culturas (Silva & Dhein, 1994). De acordo com (Franke & Dorfman, 1998; Carlesso et al., 2003b), a melhoria na disponibilização das informações meteorológicas em cada região podem auxiliar o produtor no

planejamento da atividade agrícola, visando a diminuição dos riscos inerentes ao setor.

4.7 - Custos de produção relacionados à atividade agrícola

O cálculo do custo de produção de uma determinada cultura estabelece custos de produção associados aos diversos padrões tecnológicos e preços dos fatores de produção em uso nas diferentes situações ambientais e regiões. Assim, o custo total é resultado da multiplicação entre os coeficientes técnicos e os preços dos fatores. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o objetivo da formulação do custo de produção é calcular o custo médio por unidade produzida. Essa metodologia é fundamental para o estabelecimento do preço mínimo dos produtos agrícolas.

De um modo geral, a produção agrícola se desenvolve em épocas distintas no tempo. Isso significa que os insumos e serviços são incorporados à lavoura em momentos distintos durante o processo produtivo e faz com que haja a necessidade de fazer uma correção do custo que foi estimado antes da implantação das culturas, por ocasião da comercialização.

Os custos de produção podem ser divididos em custos explícitos e custos implícitos. Os custos explícitos são aqueles que podem ser mensurados, desembolsados pelo agricultor durante a atividade produtiva (insumos, mão-de-obra temporária, serviços de máquinas e animais, juros, encargos e outros). Os custos implícitos são os custos indiretos, representados pela depreciação da terra, máquinas, equipamentos e benfeitorias.

De acordo com Andrade (1990), embora a atividade primária seja diferente da industrial, os princípios que regem as empresas são os mesmos e as variáveis que afetam o resultado econômico são semelhantes, tais como: (i) preço do produto, (ii) custo de produção, (iii) produtividade e (iv) custeio ou crédito. A variável onde o produtor rural

tem menos ingerência é no preço do produto, pois o produtor rural é caracterizado como um tomador e não um formador de preços. Segundo Rosa (2000), a estruturação da empresa rural, com capacidade de armazenamento do produto gerado pode ser uma alternativa viável, pois possibilita que seja esperado o momento adequado de comercializar a produção, com possibilidade de obtenção de preços melhores na entressafra. Dada a ausência ou devido a deficitária política de crédito ou custeio no Brasil, esse vem a ser o fator que dificulta a produção agrícola e, quando existe, a taxa de juros praticada inviabiliza o custeio da lavoura, uma vez que esta eleva demasiadamente o custo de produção.

Contador (1997) destaca que a única variável que pode ser trabalhada pelo agricultor é o aumento da produtividade e, ainda assim, somente até um determinado ponto onde os benefícios advindos da maior quantidade de produto gerado são reduzidos, em função do maior aumento nos custos de produção para rendimentos mais elevados. Uma das formas mais eficientes de aumentar o rendimento de grãos das culturas é a incorporação da irrigação na atividade produtiva.

O custo de depreciação de máquinas e equipamentos agrícolas é um custo indireto e, por isso, segundo Schuh (1976), muitas vezes é desconsiderado no custo de produção, por não exigir um desembolso imediato do agricultor. A depreciação é calculada em função do valor do bem novo, seu valor residual, da vida útil em horas e do tempo de utilização do equipamento em um hectare por safra.

Do ponto de vista econômico, a depreciação é a perda do valor resultante da diminuição da capacidade de gerar novas receitas, devido a obsolescência ou inadequabilidade do equipamento. O objetivo da inclusão do custo de depreciação no cálculo dos custos visa criar um fundo de reserva que permita a reposição do capital investido ao final da vida útil do equipamento.

A depreciação de um pivô central é calculada em função da lâmina de água aplicada e do tempo necessário para a aplicação dessa lâmina. O custo horário de depreciação do sistema pivô central aumenta com a

redução da lâmina de irrigação total anual, e com o aumento da área irrigada por um pivô central, devido ao aumento do consumo de energia elétrica, em função da maior pressão de trabalho (Rosa, 2000). Assim, fica claro que o custo de depreciação do equipamento é mais elevado para cultivos isolados, reduzindo significativamente com a inclusão de safrinha após o cultivo principal.

4.8 - Irrigação

O objetivo da irrigação em climas temperados ou subtropicais úmidos é fornecer uma suplementação de água às culturas durante curtos ou médios períodos de deficiência hídrica. De acordo com Berlato (1992), a precipitação pluvial normal no Rio Grande do Sul é bem distribuída ao longo das quatro estações do ano; entretanto, a alta demanda evaporativa nos meses de dezembro a fevereiro faz com que a precipitação pluvial no período de primavera-verão seja, em geral, insuficiente para atender as exigências hídricas das culturas. De acordo com Bouwer (1994) e Hargreaves (2000), a irrigação é um elemento de fundamental importância para prover a produção de alimentos e fibras em escala suficiente para atender a demanda mundial por alimentos.

No Centro-Sul do Brasil, a necessidade de irrigação é menor que no Centro-Oeste e Nordeste. A irrigação suplementar é muito mais complexa e a ocorrência de precipitações pluviais durante o ciclo de crescimento da cultura deve ser considerada. Conseqüentemente, as irrigações complementam a deficiência de precipitação ou a má distribuição dessa, mas também potencializam problemas de erosão do solo, percolação profunda e, segundo Reinert et al. (2001), problemas de compactação do solo em solos úmidos em estado de maior susceptibilidade à compactação.

A irrigação é uma tecnologia que possibilita o aumento na produtividade dos cultivos, melhoria na qualidade da produção, agregando maior valor ao produto e diminuindo os riscos da atividade agrícola, propiciando maior renda aos agricultores. Entretanto, como a

água é um recurso finito, seu uso deve ser cuidadosamente planejado, para evitar perdas no processo de captação, condução e distribuição. A eficiência do uso da água na agricultura pode ser bastante melhorada através do manejo da cultura visando o melhor aproveitamento das precipitações pluviais (Carlesso et al., 2003a) e através da programação da irrigação. O controle na lâmina de água a ser aplicada é importante no manejo da agricultura irrigada, pois tanto o excesso como a falta, causam redução no rendimento de grãos das culturas.

A redução da lâmina de água aplicada, mediante o máximo aproveitamento das precipitações pluviais, proporciona uma redução no número de horas de funcionamento do sistema, com conseqüente redução no consumo de energia elétrica. O custo de aplicação da lâmina de irrigação, juntamente com os custos de depreciação do equipamento são os principais responsáveis pelos custos de produção em lavouras irrigadas.

5 - MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido com base em séries históricas de dados meteorológicos provenientes das estações meteorológicas de Santa Maria, Cruz Alta, Passo Fundo, São Luiz Gonzaga e São Borja, como representativa das regiões agroecológicas da Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, respectivamente (Tabela 1). Os dados meteorológicos de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), insolação (h), velocidade do vento a 2 m (m s^{-1}), pressão atmosférica (kPa) e precipitação pluvial (mm), foram tabulados em séries diárias para o período entre 1990 e 2002, para as estações meteorológicas de Santa Maria, Passo Fundo e São Luiz Gonzaga. Para o Planalto Inferior foram utilizados dados entre 1988 e 2001 e, para São Borja, entre 1990 a 2000. As regiões agroecológicas

Tabela 1. Regiões agroecológicas, coordenadas geográficas e período de dados utilizados. Santa Maria, RS, 2004.

| Regiões agroecológicas Est. meteorológica | Latitude (Sul) | Longitude (Oeste) | Altitude (m) | Período | Fonte |
|--|-------------------|----------------------|-----------------|-----------|------------------|
| Depressão Central Santa Maria | 29°42' | 53°42' | 95 | 1990-2002 | Est. Santa Maria |
| Planalto Inferior Cruz Alta | 28°38' | 53°36' | 472 | 1988-2001 | Fepagro |
| Planalto Médio Passo Fundo | 28°15' | 52°24' | 684 | 1990-2002 | 8° DISME |
| Missões São Luiz Gonzaga | 28°23' | 54°58' | 245 | 1990-2002 | 8° DISME |
| Baixo Vale do Uruguai São Borja | 28°39' | 56°00' | 99 | 1990-2000 | Fepagro |

englobadas por esse estudo estão compreendidas entre os paralelos 29°42' e 27°39' Sul e as longitudes de 53°36' e 54°25' Oeste. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima entre essas coordenadas pertence ao tipo subtropical "Cfa", (Moreno, 1961).

Para o cálculo da temperatura média do ar foi utilizada a fórmula do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que é dada por:

$$T_{\text{média}} = \frac{(T_{9h} + T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}} + 2 * T_{21h})}{5}, \quad (1)$$

onde: $T_{\text{média}}$ é a temperatura média do ar; T_{21h} é a temperatura das 9 horas; $T_{\text{máx}}$ é a temperatura máxima do ar; $T_{\text{mín}}$ é a temperatura mínima do ar e T_{21h} é a temperatura das 21 horas.

A umidade relativa do ar e a velocidade do vento a 2 m foram calculadas a partir da equação:

$$UR \text{ e } U_2 = \frac{(L_{9h} + 2 * L_{21h} + L_{15h})}{4}, \quad (2)$$

onde: UR e U₂ são a umidade relativa do ar e velocidade do vento a 2 m, respectivamente; L_{9h, 15h e 21h} são as leituras da UR e U₂ às 9, 15 e 21 horas, respectivamente.

Para as estações de São Luiz Gonzaga e Passo Fundo, a velocidade do vento foi convertida de 10 m para 2 m, usando a seguinte equação:

$$U_{2\text{ m}} = U_{10} * \left(\frac{LN16,73057}{LN86,44127} \right) \quad (3)$$

Utilizaram-se as culturas do milho, soja e feijão na safra, mais o feijão na safrinha. Primeiramente, foi definido o período preferencial de semeadura, de acordo com o zoneamento agroclimático de cada cultura para as diferentes regiões de abrangência. Assim, os cálculos de necessidade de irrigação foram feitos simulando-se as datas de semeadura do milho a partir de 15 de agosto até 15 de dezembro (Maluf et al., 2000). A simulação da semeadura do feijão foi feita para o período compreendido entre 15 de setembro 15 de dezembro; para o feijão safrinha, a simulação foi feita para datas de semeadura entre 01 de janeiro e 15 de fevereiro (Recomendação Técnica para a cultura do Feijão, 2000). Para a cultura da soja observou-se as datas de semeadura entre 15 de outubro e 01 de dezembro (XXVIII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul - Recomendações Técnicas, 2000). As datas de semeadura foram espaçadas de 15 em 15 dias (a data de semeadura adotada foi o 1º e o 15º de cada mês). A contagem de dias a partir da semeadura foi feita em dias do ano (DDA) ou dia juliano. As datas consideradas inviáveis para a semeadura foram aquelas onde ocorreram precipitações pluviais em excesso (Tabela 2). Assim, as datas de semeadura foram simuladas quando a precipitação pluvial acumulada foi inferior a 3 mm em até três dias consecutivos, considerando o período entre 1º e 14º dia e 15º à 30/31º dia do mês. Nenhuma data de

Tabela 2. Datas de semeadura simuladas para nove épocas de semeadura do milho durante o período de 1990-2001, na Depressão Central do Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2004.

| Ano | Épocas de semeadura | | | | | | | | |
|------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 15/ago | 01/set | 15/set | 01/out | 15/out | 01/nov | 15/nov | 01/dez | 15/dez |
| 1990 | 18/8 | 03/9 | 15/9 | 02/10 | 17/10 | -* | 23/11 | 01/12 | 15/12 |
| 1991 | 15/8 | 03/9 | 15/9 | 02/10 | 15/10 | 03/11 | 16/11 | 01/12 | 17/12 |
| 1992 | 15/8 | 04/9 | 15/9 | 04/10 | 18/10 | 01/11 | 15/11 | 02/12 | 15/12 |
| 1993 | 15/8 | 03/9 | 15/9 | 01/10 | 16/10 | 03/11 | 19/11 | 07/12 | 18/12 |
| 1994 | 18/8 | 03/9 | 16/9 | 05/10 | 26/10 | 07/11 | 19/11 | 01/12 | 17/12 |
| 1995 | 16/8 | 01/9 | 16/9 | 02/10 | 15/10 | 01/11 | 15/11 | 01/12 | 15/12 |
| 1996 | 16/8 | 04/9 | 18/9 | 03/10 | 16/10 | 01/11 | 18/11 | -* | 22/12 |
| 1997 | 15/8 | 03/9 | 15/9 | 07/10 | 17/10 | 08/11 | 15/11 | 01/12 | 16/12 |
| 1998 | 20/8 | 01/9 | 15/9 | 01/10 | 18/10 | 01/11 | 15/11 | 01/12 | 19/12 |
| 1999 | 15/8 | 10/9 | 17/9 | 04/10 | 18/10 | 07/11 | 15/11 | 01/12 | 16/12 |
| 2000 | 17/8 | 01/9 | 26/9 | 01/10 | 15/10 | 05/11 | 16/11 | 02/12 | 18/12 |
| 2001 | 15/8 | -* | 16/9 | 03/10 | 19/10 | 01/11 | 16/11 | 07/12 | 15/12 |

- semeaduras não simuladas.

semeadura foi considerada inviável devido à deficiência hídrica no solo, uma vez que, a necessidade de irrigação foi simulada desde a semeadura das culturas.

O ciclo de desenvolvimento e as fases fenológicas das culturas do milho e feijão foram previstas através da soma térmica ou graus-dia acumulados (GDA) e, para a cultura da soja, utilizou-se, além da soma térmica, o fotoperíodo, a fim de determinar o início da floração da cultura.

O GDA das culturas foi determinado a partir de dados experimentais observados por Rubin (2002) para a cultura do feijão e Petry (2000) para a cultura da soja. A soma térmica do milho foi calculada a partir de dados experimentais obtidos por Wolshick (2000). Os graus-dia (GD) e graus-dia acumulados (GDA) foram calculados a partir da temperatura média diária (INMET), menos a temperatura base adotada para cada cultura. Assumiu-se que o desenvolvimento fenológico das culturas em estudo é constante por grau de temperatura entre uma temperatura base (T_{min}) e um limite superior de temperatura (T_{max}), acima e abaixo do qual a taxa de crescimento é nula. Assim, considerou-se como a T_{min} de 10°C para o

milho e feijão e 15°C para a soja e a Tmax de 30°C, para todas as culturas. O GDA final médio adotado foi de 1700 para o milho, 1250 para a soja, 1050 para o feijão safra e safrinha.

A necessidade de irrigação para o milho, feijão e soja foi determinada com base no programa de manejo da irrigação do Sistema Irriga, disponível no site <http://www.irriga.proj.ufsm.br>. A metodologia do cálculo foi a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith. A evapotranspiração máxima das culturas (ET_m = ET_o x K_c) foi estimada pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO, utilizando os valores dos coeficientes de cultura (K_c) propostos por Doorenbos & Kassam (1979). As irrigações foram recomendadas quando a ET_m indicava valores acumulados de 25 mm para o milho, 30 mm para o feijão e 37 mm para a soja. A lâmina de irrigação foi determinada em função da capacidade de armazenamento de água disponível no solo até a profundidade efetiva do sistema radicular das plantas, para as diferentes regiões em estudo. A lâmina máxima aplicada por dia, por pivô, foi de 10 mm, considerando-se um tempo de funcionamento de 21 horas.

Os valores de capacidade de armazenamento de água disponível às plantas (CAD) considerados foram de 160 mm para a Depressão Central e 120 mm para as demais regiões, conforme determinações feitas por Petry (2000), para solos de textura franco-arenosa (Depressão Central) e argila pesada (Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai). Na definição da profundidade efetiva do sistema radicular considerou-se a sua evolução ao longo do ciclo das culturas. Assim, por ocasião da semeadura-emergência, considerou-se uma profundidade efetiva de 10 cm, incrementando essa profundidade de acordo com a evolução dos estádios fenológicos, chegando-se a um máximo de 80 cm no estágio entre a floração e maturação fisiológica.

A partir dos dados da lâmina de irrigação, data de semeadura e GDA, determinou-se o número de irrigações aplicadas durante o ciclo de desenvolvimento das culturas, a lâmina total de água aplicada em cada

época de semeadura e o total de água consumida pela cultura (ETm). Para o cálculo da lâmina bruta de irrigação a ser aplicada utilizou-se uma eficiência de aplicação de água de 85%.

5.1 - Custos de produção

Os custos de produção das culturas do milho, soja e feijão foram determinados considerando cultivos em sistema plantio direto, para áreas irrigadas e não-irrigadas. Os custos não relacionados à irrigação envolveram custos com operações, insumos, mão-de-obra, valor da terra, depreciação, expectativa de rendimento e valor de comercialização do produto. Os preços dos insumos foram pesquisados no comércio da região e comparados com aqueles praticados pelo Instituto Cepa – SC (<http://www.icepa.com.br/>). Os custos operacionais (insumos, custo hora/máquina, mão-de-obra, etc) foram calculados com base no Instituto Cepa – SC. Os custos da lavoura envolveram os custos de produção relacionados à irrigação, como lâmina média de irrigação para cada cultura, investimento e depreciação do equipamento, mais os custos operacionais.

5.2 - Custos de produção não relacionados à irrigação

Os custos de produção não relacionados a irrigação para a cultura do milho, soja e feijão envolveram todas as operações com máquinas e equipamentos (dessecação, semeadura, aplicação de defensivos, colheita, transporte interno e externo), custos com insumos (sementes, fertilizantes de base e cobertura, herbicidas, inseticidas, fungicidas, espalhante adesivo), custo com mão-de-obra, arrendamentos, encargos contratuais, juros, PROAGRO e assistência técnica e contábil. O referencial econômico utilizado foi o salário mínimo a R\$ 240,00 (duzentos e quarenta reais).

5.2.1 - Custo das operações agrícolas

As operações para implantação e condução das culturas foram realizadas para sistema plantio direto. Considerou-se todas as despesas para o custeio da lavoura, incluindo os insumos necessários para as operações, as máquinas, equipamentos, depreciação, sementes, defensivos e fertilizantes e custo hora homem. Na tabela 3 são apresentados os fatores de custo envolvidos na determinação do custo operacional mecanizado.

Tabela 3. Custo operacional de um trator novo, custo dos insumos, custo do operador e reparos. Santa Maria, RS, 2004.

| Fatores de custo | Preço Unitário | Custo Hora ⁻¹ |
|-----------------------------------|----------------|--------------------------|
| | R\$ | R\$ |
| Trator MF 5310/4 (105 CV) | 144.000,00 | - |
| Combustível (óleo diesel) | 1,40 | 11,90 |
| Lubrificantes | | |
| Motor | 4,48 | 0,21 |
| Transmissão e redução final | 4,72 | 0,32 |
| Óleo de cárter | 9,92 | 0,05 |
| Combustível | 4,92 | 0,05 |
| Hidráulico | 3,00 | 0,00 |
| Graxa | 5,17 | 0,16 |
| Filtros | | |
| Filtros de ar | 111,58 | 0,11 |
| Filtro de ar interno | 55,98 | 0,14 |
| Filtro de ar interno | 55,60 | 0,00 |
| Pneus | | |
| Dianteiro (14,9 x R1) | 850,00 | 0,57 |
| Traseiro (23,1 x 30R1) | 2.391,00 | 1,59 |
| Câmaras | | |
| Dianteira (14,9 x R1) | 129,00 | 0,09 |
| Traseira (23,1 x 30R1) | 280,00 | 1,19 |
| Reparos | | 11,52 |
| Depreciação | | 14,40 |
| Total do custo hora ⁻¹ | | 41,35 |

Na tabela 4 são apresentadas as operações realizadas para implantação, condução e comercialização do produto de uma lavoura de

Tabela 4. Relação das operações realizadas para o cálculo dos custos de produção não relacionados à irrigação, para a cultura do milho.

| Operações | Unid. ha ⁻¹ | Unid. | R\$ Unid. ⁻¹ | R\$ ha ⁻¹ |
|-----------------------------------|------------------------|-------|-------------------------|----------------------|
| Semeadura direta | 1 | 1 | 39,74 | 39,74 |
| Adubação terrestre/cobertura | 1 | v | 18,42 | 18,42 |
| Aplicação terrestre/herbicida | 2 | v | 13,43 | 26,87 |
| Aplicação terrestre/inseticida | 2 | v | 13,43 | 26,87 |
| Colheita | 1 | v | 95,48 | 95,48 |
| Transporte interno | 100 | sc | 0,24 | 24,00 |
| Transporte externo | 100 | sc | 0,40 | 40,00 |
| Total do custo operacional | | | | 271,64 |

Unid. = unidade; v = valor; sc = sacas ha⁻¹

100 hectares de milho, com produtividade esperada de 100 sc ha⁻¹ (considerando saco de 60 kg). Dentro dos custos operacionais não está relacionada a secagem de grãos.

5.2.2 - Insumos de produção

Os custos de produção foram determinados para expectativas de rendimentos de 9, 17, 25, 33, 42, 50, 58 e 67 sacas ha⁻¹ para o feijão cultivado sem irrigação e 25, 33, 42, 58 e 67 sc ha⁻¹ para o feijão cultivado com irrigação. Para a cultura da soja foram utilizadas expectativas de rendimentos de 15 a 70 sc ha⁻¹, com incremento de 5 sc ha⁻¹ para lavouras conduzidas sem irrigação e 45 a 70 sc ha⁻¹ para a soja irrigada, também com incremento de 5 sc ha⁻¹ para lavouras conduzidas com irrigação. Para a cultura do milho foram utilizadas expectativas de rendimento de 33, 67, 100, 133, 167 e 200 sc ha⁻¹ para lavouras não irrigadas e de 67 até 200 sc ha⁻¹ para áreas irrigadas. Os custos foram elaborados para áreas não irrigadas de 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 hectares e de 20, 40, 80, 160, 320 e 640 hectares irrigados. As áreas irrigadas foram selecionadas considerando-se pivôs centrais de 20 a 80 hectares.

A quantidade de adubação na base e cobertura utilizada para fins de custo foi baseada na recomendação da ROLAS para o RS e SC (Comissão..., 1995) e Ceretta & Silveira (2001). Os níveis de fertilização e

quantidade de adubação em cobertura aplicada para as culturas do milho, feijão e soja são apresentados nas tabelas 5, 6 e 7, respectivamente.

Tabela 5. Quantidade de NPK (fórmula 5-20-20) aplicada para os diferentes níveis de rendimento de grãos de milho, em kg ha⁻¹.

| Rendimento de grãos ----- sc ha ⁻¹ ----- | N | P | K | Fórmula | Cobertura - Uréia ----- kg ha ⁻¹ ----- |
|--|------|----|----|---------|--|
| 33 | 5 | 20 | 20 | 100 | 75 |
| 67 | 7,5 | 30 | 30 | 150 | 95 |
| 100 | 10 | 40 | 40 | 200 | 155 |
| 133 | 12,5 | 50 | 50 | 250 | 239 |
| 167 | 15 | 60 | 60 | 300 | 300 |
| 200 | 17,5 | 70 | 70 | 350 | 340 |

Considerou-se um preço mínimo, médio e máximo de comercialização utilizada no Estado nos últimos cinco anos para cada produto. Assim, assumiu-se preços de R\$ 30,00, 40,00 e 50,00 para a cultura da soja, R\$ 50,00, 70,00 e 90,00 para o feijão e R\$ 16,00, 20,00 e 24,00 para a cultura do milho. Os demais índices de preços associados ao custo de produção foram obtidos junto ao Instituto Cepa – SC (<http://www.icepa.com.br/>).

Tabela 6. Quantidade de NPK (fórmula 8-18-28) aplicada para os diferentes níveis de rendimento de grãos do feijão, em kg ha⁻¹.

| Rendimento de grãos ----- sc ha ⁻¹ ----- | N | P | K | Fórmula | Cobertura - Uréia ----- kg ha ⁻¹ ----- |
|--|------|----|-----|---------|--|
| 9 | 6,4 | 14 | 22 | 80 | 30 |
| 17 | 10,4 | 23 | 36 | 130 | 50 |
| 25 | 15,7 | 35 | 55 | 196 | 63 |
| 33 | 20,0 | 45 | 70 | 250 | 98 |
| 42 | 25,6 | 58 | 90 | 320 | 113 |
| 50 | 30,4 | 68 | 106 | 380 | 127 |
| 58 | 34,4 | 77 | 120 | 430 | 142 |
| 57 | 38,4 | 86 | 134 | 480 | 157 |

Tabela 7. Quantidade de NPK (fórmula 0-20-30) aplicada para os diferentes níveis de rendimento de grãos da soja, em kg ha⁻¹.

| Rendimento de grãos ----- sc ha ⁻¹ ----- | P | K | Fórmula |
|--|---------------------------------|------|---------|
| | ----- kg ha ⁻¹ ----- | | |
| 15 | 10 | 15 | 50 |
| 20 | 15 | 22,5 | 75 |
| 25 | 20 | 30 | 100 |
| 30 | 25 | 37,5 | 125 |
| 35 | 30 | 45 | 150 |
| 40, 45 e 50 | 35 | 52,5 | 175 |
| 55 e 60 | 50 | 75 | 250 |
| 65 e 70 | 70 | 105 | 350 |

5.3 - Custo de mão-de-obra

Para o cálculo de custo com a mão-de-obra, considerou-se a necessidade de um número efetivo de funcionários na propriedade, acrescentando-se funcionários com o aumento da área cultivada. Assim, o quadro de funcionários é representado por um capataz, um tratorista, um auxiliar de tratorista, um auxiliar de lavoura e uma cozinheira. Para áreas de até 72 hectares é considerado somente um tratorista e, acima dessa área, considera-se dois tratoristas. A remuneração é feita com base no salário (salário mínimo) acrescido de um percentual de produção (1%). Assim, o salário de cada funcionário foi determinado pela seguinte expressão:

$$SAL = \left(\frac{N \cdot SM \cdot 1,6 \cdot M \cdot a}{Área} \right) + (RG \cdot PP \cdot \%) \quad (4)$$

onde: SAL é o valor da remuneração ao trabalho recebido pelo funcionário; *N* é o número de salários mínimos pagos ao funcionário; 1,6 é o percentual dos encargos sociais; *SM* é o valor do salário mínimo vigente; *M* é o número de meses em que o salário é pago no ano; *a* é a percentagem da área cultivada em relação à área da propriedade; *RG* é o rendimento de grãos; *PP* é o preço do produto (R\$ sc⁻¹); % é a

percentagem da produção a ser paga ao funcionário (1%) e *área* é a área cultivada.

5.4 - Custo da terra, encargos contratuais, custos com assistência técnica e contábil

Os custos do fator arrendamento foram desconsiderados no cálculo de custos. A taxa de juros usada é a utilizada pelo Banco do Brasil S.A para financiamentos agrícolas da última safra (6,5% a.a.). Além dos juros, outro encargo contratual assumido foi o PROAGRO, no total de 2% do valor financiado.

O custo associado à assistência técnica foi de 2% da produção estimada; para os custos contábeis foi considerado o valor de um salário mínimo por mês, durante seis meses de atividade.

5.5 - Custo de produção unitário

Uma vez determinado o custo total de todas as operações envolvidas no processo produtivo, calculou-se o custo unitário, expresso em custo para produzir um saco do produto e o custo por hectare. O custo para produzir um saco, para as diferentes áreas consideradas, foi calculado pela razão entre o custo total e a produção líquida total. Os custos unitários do milho, feijão e soja para as diferentes áreas e três diferentes preços de produtos foram ajustados através de uma regressão não-linear inversa de primeira ordem do tipo $Y = Y_0 + (a/x)$, onde x é a área e Y_0 e a são coeficientes do modelo.

5.6 - Custos de produção relacionados à irrigação

Os cálculos dos custos relacionados à irrigação foram realizados tomando-se como base em pivôs instalados e quitados, para que no custo de produção não incidisse nenhum valor relacionado a aquisição do equipamento. Assim, calculou-se o custo de aplicação de uma lâmina

média de irrigação necessária para cada cultura, somado ao custo de depreciação do equipamento.

Os valores das taxas de energia elétrica foram obtidas de planilhas de tarifas fornecidas pela Companhia de Energia Elétrica para a Região Sul – AES Sul. O consumo de energia, em kW h^{-1} , foi calculado a partir da equação $Y = 9,2675 + 0,24045X + 0,000208X^2$, desenvolvida por Rosa (2000), onde a variável independente é a área do pivô e a variável dependente é o consumo de energia. O cálculo do gasto com a movimentação do sistema foi realizado considerando-se o número de torres do pivô (número de motorreductores), o consumo em kW h^{-1} e o tempo de funcionamento do sistema para a aplicação de cada lâmina requerida.

A lâmina de irrigação foi obtida a partir da simulação da necessidade de irrigação para diferentes épocas de semeadura e 13 anos de dados meteorológicos. Neste trabalho, utilizou-se a lâmina média de irrigação necessária para as culturas do milho, feijão e soja para o Planalto Inferior, obtida a partir de uma série histórica de dados meteorológicos de 1988-2001 e aquelas determinadas por Rosa (2000) para Cruz Alta. Na tabela 8 são apresentadas as lâminas médias de irrigação aplicadas para cada cultura, o custo de aplicação e de depreciação para áreas irrigadas de 20, 40 e 80 hectares. O custo da aplicação e depreciação para as áreas de 160, 320 e 640 hectares foi obtido multiplicando 2, 4 e 8 vezes a lâmina de pivôs de 80 hectares.

A depreciação horária foi determinada com base no tempo de utilização do sistema de irrigação por cultura. Assim, a depreciação do equipamento por hora de utilização foi obtida a partir da lâmina de irrigação aplicada e do tempo necessário para a aplicação de um (1) milímetro de água por pivô.

5.7 - Níveis de frustração de safra considerados

Para a realização desse trabalho, foram considerados níveis de

Tabela 8. Lâmina média, custo de aplicação, de depreciação e total para as culturas do milho, feijão e soja. Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Lâmina aplicada (mm) | Custo aplicação (R\$ ha ⁻¹) | Depreciação (R\$ ha ⁻¹) | Total (R\$ ha ⁻¹) |
|--------------|-------------------------|--|--|----------------------------------|
| Milho | | | | |
| 20 | 210 | 263,57 | 184,42 | 447,98 |
| 40 | 210 | 142,40 | 142,28 | 284,69 |
| 80 | 210 | 128,71 | 121,22 | 249,93 |
| Feijão | | | | |
| 20 | 115 | 144,33 | 184,42 | 328,75 |
| 40 | 115 | 77,98 | 142,28 | 220,27 |
| 80 | 115 | 70,48 | 121,22 | 191,70 |
| Soja | | | | |
| 20 | 170 | 213,36 | 184,42 | 397,78 |
| 40 | 170 | 115,28 | 142,28 | 257,56 |
| 80 | 170 | 104,19 | 121,22 | 225,41 |

frustração de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%. Os índices de frustração foram adotados com base em dados de literatura (Berlato, 1992; Ávila et al., 1996; Fontana & Almeida, 2002 e Buriol et al., 1977), que afirmam que existe uma probabilidade anual de frustração de safras de 30% para as culturas de primavera-verão no Estado. Dessa forma, foi possível calcular a redução na expectativa de rendimento e receita líquida para os casos de deficiência hídrica leve, moderada e severa (0 a 80%), em diferentes épocas de semeadura.

5.8 - Cálculo da área mínima irrigada

Primeiramente, foi determinada a receita líquida para cada produtividade, área não irrigada e preço do produto, considerando os níveis de frustração de safra acima citados. A receita líquida foi determinada pela diferença entre a receita bruta (quantidade produzida x preço do produto x tamanho da área x frustração de safra), menos o custo de produção por expectativa de rendimento, preço do produto e área cultivada. A partir da receita líquida obtida nas áreas irrigadas foram

criadas equações de regressão ($Y = a+bx$), onde a variável independente é a receita líquida e a variável dependente é a área irrigada. Substituindo-se na equação a receita líquida de áreas não irrigadas, foi calculada a área irrigada necessária para compensar diferentes níveis de frustração de safra.

Os resultados da lâmina de irrigação necessária foram analisados por meio de regressão e desvio padrão entre as médias de cada época de semeadura, nos diferentes anos agrícolas, em nível de 5% de probabilidade de erro.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - Estimativa da necessidade de irrigação por região e por cultura

6.1.1 - Depressão Central

Na figura 1 é apresentada a lâmina de irrigação necessária para complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, para semeaduras realizadas entre a segunda quinzena de agosto e a segunda quinzena de dezembro. A necessidade de irrigação apresentou uma resposta quadrática para semeaduras realizadas entre 15 de agosto (227 DDA) e 15 de dezembro (349 DDA); a maior necessidade de irrigação foi observada para a semeadura realizada na primeira quinzena de setembro (223 mm).

A variação da lâmina de irrigação necessária deve-se à variabilidade na distribuição das precipitações pluviais. A maior variação entre as médias (desvio padrão) foi observada para a época de semeadura de 01 de setembro (244 DDA), enquanto a menor variação ocorreu para semeaduras realizadas em 01 de novembro (305 DDA), considerando 13 anos de dados meteorológicos. O déficit hídrico máximo

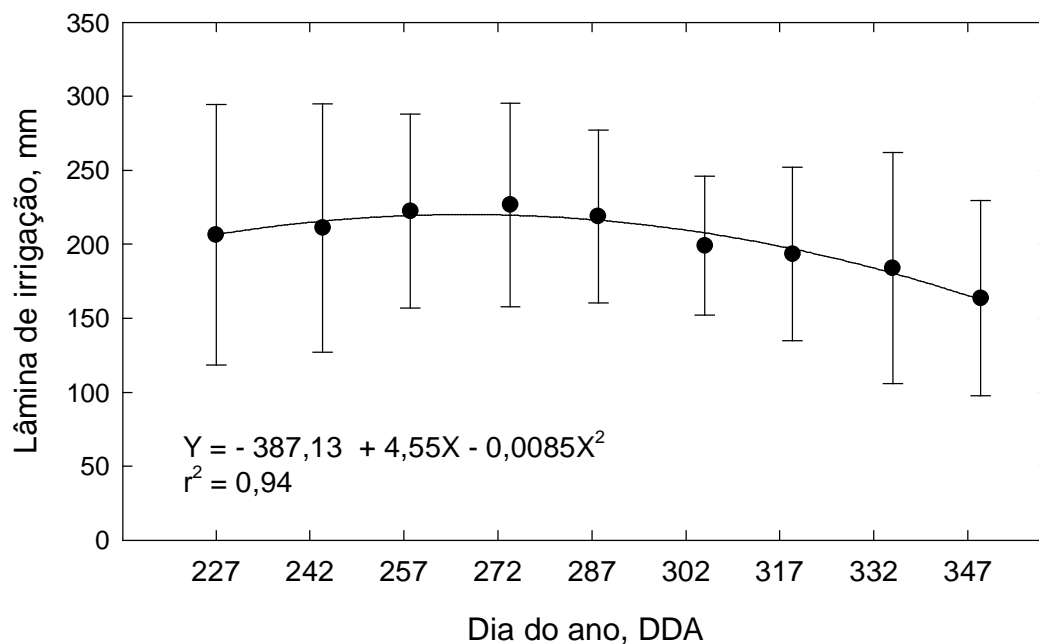


Figura 1. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, para semeaduras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

observado foi de 319 mm, para a semeadura realizada em 16 de agosto de 1995 (figura 2). O déficit hídrico máximo acumulado ocorreu entre 27 de outubro e 23 de dezembro, época em que o milho semeado em agosto e setembro encontra-se na floração e enchimento do grãos, período de maior consumo de água pela cultura. Durante esse período de deficiência hídrica, verificou-se apenas uma precipitação pluvial de 9 mm, quantidade insuficiente para reabastecer o armazenamento de água no solo e atender a demanda hídrica da cultura.

Analisando as estimativas do déficit de água no solo e a precipitação pluvial (figura 2) para uma mesma época de semeadura, porém em anos distintos, observa-se que a necessidade de irrigação foi maior no ano de 1995. O déficit hídrico foi mais intenso dos 40 aos 80 DAS (figura 2a), embora este também tenha sido verificado por ocasião da emergência da cultura e emissão das primeiras folhas (0 aos 24 DAS).

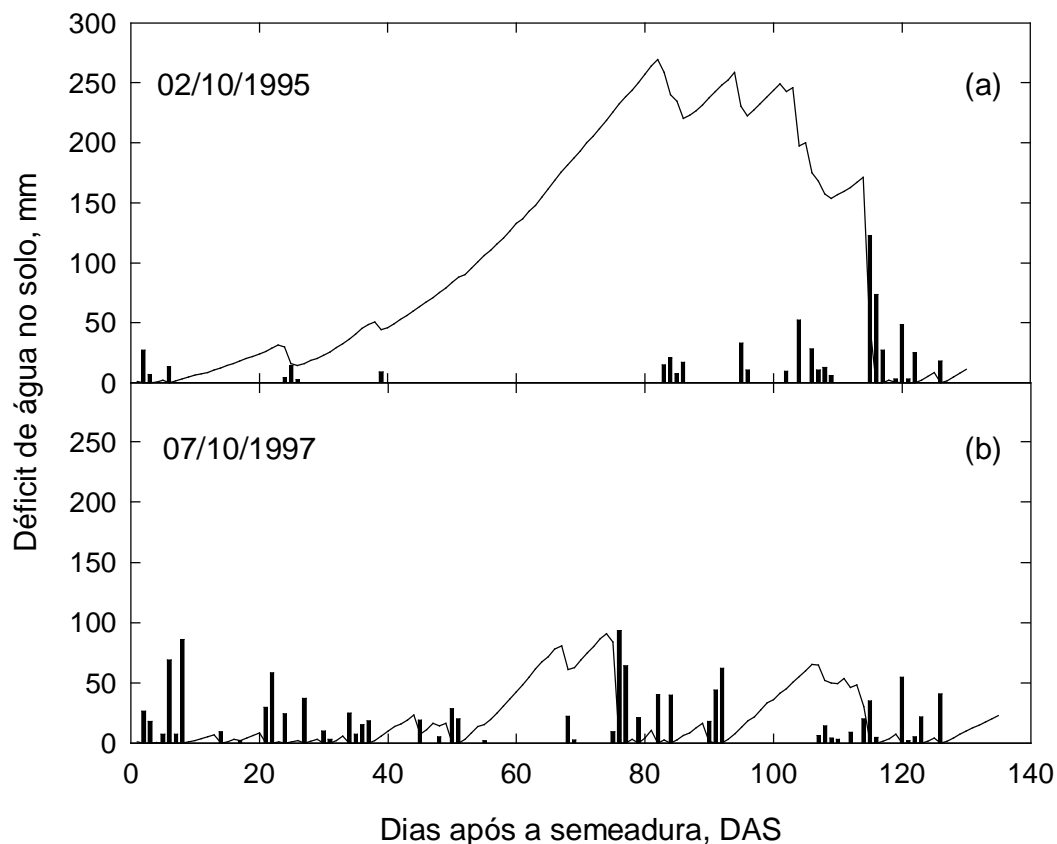


Figura 2. Déficit de água no solo (linha) e precipitação pluvial (barra) para a época de semeadura de início de outubro em ano de La Niña (1995) e El-Niño (1997), na Depressão Central do RS. Santa Maria, RS, 2004.

De acordo com Fancelli (2001) o potencial produtivo do milho é definido por ocasião da emissão da 4ª folha, podendo se estender até a 6ª folha. Nessa fase, a planta não deve ser submetida a nenhum tipo de estresse ambiental, principalmente a disponibilidade de água. Da mesma forma, a definição do número de fileiras na espiga ocorrerá entre o período compreendido entre a emissão da 7ª e 9ª folhas completamente expandidas, devido às transformações na gema axilar que dará origem à espiga. Entretanto, apesar do total de precipitação pluvial ter sido elevado para a semeadura de 07/10/1997 (1171,20 mm), a quantidade ocorrida durante o desenvolvimento vegetativo (inclusive o estabelecimento da cultura), provavelmente ocasionou falta de luminosidade, com reflexos no rendimento de grãos semelhantes ao provocado pelo déficit hídrico no

ano de 1995. Além disso, entre os 51 e 74 DAS (figura 2b), pré floração e floração, a precipitação pluvial foi de apenas 25,2 mm, insuficiente para atender a demanda hídrica da cultura. Assim, haveria a necessidade de suplementar água via irrigação, nesse período.

Na figura 3 são apresentados os valores médios de 13 anos da precipitação pluvial, ETo e ETm por época de semeadura para a Depressão Central do Rio Grande do Sul. Menores valores de precipitação pluvial foram verificados para a semeadura realizada na segunda quinzena de novembro. Observa-se que o volume total de precipitação pluvial varia pouco ($\cong 20\%$) entre as diferentes épocas de semeadura. O maior desvio padrão em relação às médias, considerando 13 anos de dados meteorológicos, foi verificado para as semeaduras realizadas na primeira quinzena de novembro (335 mm). Essa variação é atribuída, principalmente, ao fenômeno El Niño (Berlato & Fontana, 1999), cujo período principal de ocorrência é nos meses de outubro e novembro, com um repique no final do outono do ano seguinte. Embora o volume de precipitação pluvial tenha sido superior a ETo, em todas as épocas de semeadura, houve a necessidade de aplicação de irrigação para complementar as necessidades hídricas do milho em todas as datas avaliadas (figura 1), evidenciando que a distribuição das precipitações pluviais é o fator mais importante na programação de irrigação (Carlesso et al., 2003), no planejamento das épocas de semeadura e no aperfeiçoamento de zoneamentos agroclimáticos (Matzenauer et al., 1998).

Observa-se que houve pequena variação entre a ETm durante o ciclo de desenvolvimento do milho nas diferentes épocas de semeadura, principalmente por estarem sendo considerados valores médios diários de 13 anos de cultivo. A diferença entre o maior valor (semeadura de 01 de outubro) e o menor valor (semeadura de 15 de dezembro) foi de 34%. Esses valores de ETm estão de acordo com os apresentados por Matzenauer et al. (1998), para três épocas de semeadura na região de

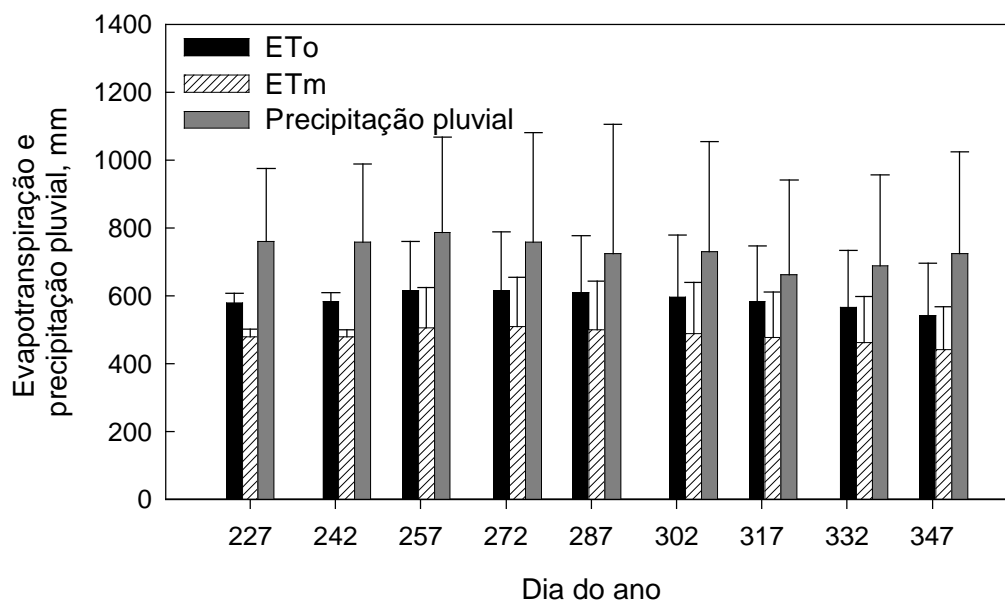


Figura 3. Valores médios da evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração máxima da cultura (ETm) e precipitação pluvial, para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

Taquari. Segundo esses autores, pequenas variações entre épocas de semeadura podem ser esperadas, uma vez que o desenvolvimento do milho ocorre principalmente em resposta ao regime térmico, que é variável com a época de semeadura.

Na figura 4 é apresentada a lâmina de irrigação necessária para a complementação hídrica da cultura da soja semeada entre a segunda quinzena de outubro e primeira quinzena de dezembro. Os resultados demonstraram uma resposta linear inversa entre a necessidade de irrigação e épocas de semeadura, para semeaduras realizadas entre 15 de outubro (288 DDA) e 01 de dezembro (335 DDA). Através desses resultados pode-se inferir que o retardamento de 15 dias na data de semeadura, a partir da primeira data de semeadura, ocasiona uma redução na lâmina de irrigação necessária de 11 mm (Figura 4). A redução na lâmina de irrigação necessária com o retardamento da

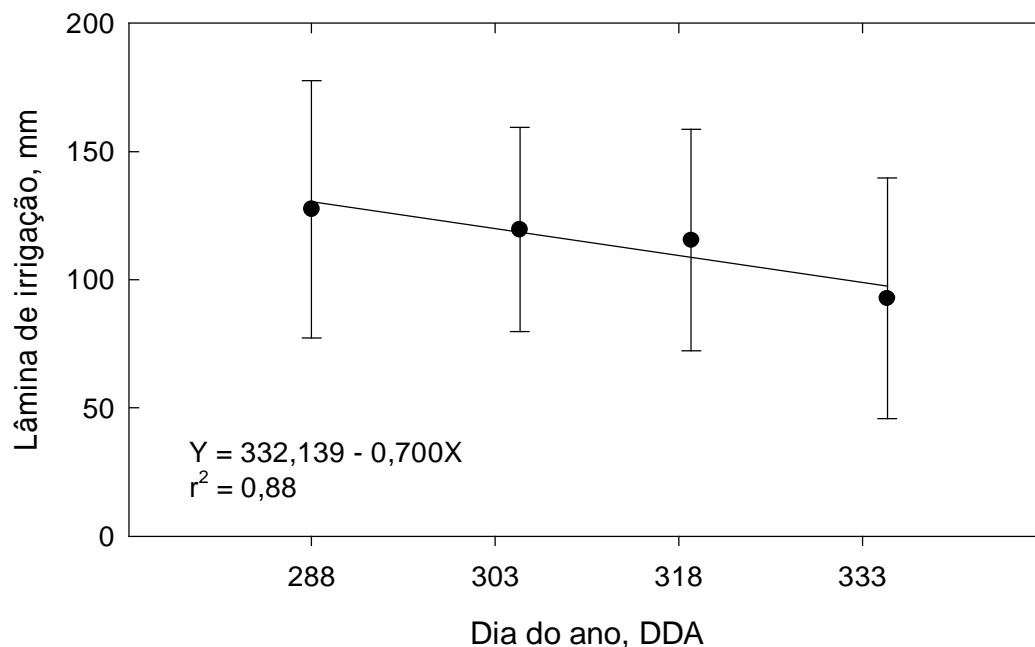


Figura 4. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 288 e 333 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

semeadura de 15 de outubro (288 DDA) para 01 de dezembro (335 DDA) deve-se a redução no ciclo de desenvolvimento da soja semeada em novembro, devido ao fotoperíodo favorável ao florescimento. Segundo observações feitas por Nied (2003), para semeaduras previstas para outubro, ocorre uma elevação na necessidade hídrica no ciclo, devido a maior demanda evaporativa da atmosfera. Para semeaduras realizadas além de novembro, a menor necessidade de irrigação está em função de temperaturas do ar mais amenas nos meses a partir de março e, pelo fato de que os subperíodos de maior exigência hídrica transcorrerem em períodos de diminuição gradativa da demanda evaporativa da atmosfera. De acordo com Berlato & Fontana (1999) há uma tendência de aumento na precipitação pluvial de dezembro a março, fato que explica a menor necessidade de irrigação complementar com o retardamento da data de semeadura.

O déficit hídrico máximo acumulado de água no solo para a cultura da soja na Depressão Central foi de 207 mm, para a semeadura realizada em 23 de novembro de 1990. A variação entre a menor e a maior lâmina necessária por época de semeadura deve-se a variação interanual na distribuição das precipitações pluviais.

Na figura 5 são apresentadas as lâminas de irrigação recomendadas por época de semeadura da soja para um período de 13 anos de cultivo. Maiores lâminas de irrigação foram necessárias nos anos agrícolas de 1990/91, 1993/94, 1999/00 e 2001/02, considerados anos de La-Niña (Fontana et al., 2002). Os mesmos autores verificaram que uma das influências do La Niña sobre as variáveis climáticas é a alteração na distribuição das precipitações pluviais, sendo o número de dias de chuva inferior em anos de La Niña. O último fenômeno de La Niña ocorrido no século 20 esteve compreendido entre julho de 1998 e junho de 2000, com expressão máxima em novembro de 1990 (Fontana et al., 2002).

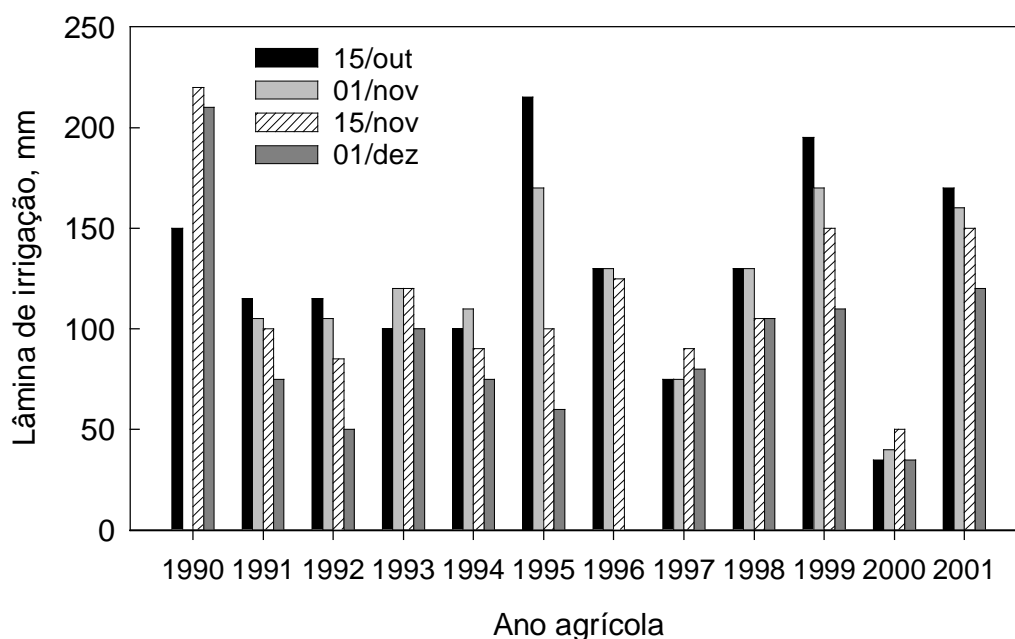


Figura 5. Lâminas de irrigação necessárias acumuladas por época de semeadura da soja, na Depressão Central do RS. Santa Maria, RS, 2004.

Os resultados demonstram que, para todas as datas de semeadura consideradas e todos os anos agrícolas, houve a necessidade de irrigação complementar para a cultura da soja (Figura 5). Pandey et al. (1984) verificaram um aumento linear no número de legumes por planta com a quantidade de água aplicada, enquanto os tratamentos que receberam menor quantidade de água tiveram redução de 52% no número de legumes produzidos. Berlato & Fontana (1999) encontraram uma correlação positiva entre a distribuição das precipitações pluviais e o rendimento de grãos de soja entre dezembro e março, período que compreende o crescimento vegetativo, florescimento e enchimento de grãos. Nos meses de janeiro, fevereiro e março se concentram a floração e enchimento de grãos, períodos de maior requerimento hídrico da soja (Berlato et al., 1992), fato que explica a maior necessidade de irrigação complementar requerida para a semeadura realizada na segunda quinzena de outubro (figura 4).

Na figura 6 são apresentadas as lâminas de irrigação necessárias para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijoeiro na safra. A maior necessidade de irrigação para o feijão na safra foi verificada para a semeadura realizada em 01 de novembro (124,8 mm) (305 DDA). Observou-se que, em todos os anos e todas as épocas de semeadura, foi necessária a aplicação de irrigação suplementar para o feijão cultivado na safra. Essas observações estão de acordo com as de Matzenauer et al. (1998) e Berlato & Fontana (1999), que verificaram maior necessidade hídrica para o feijoeiro semeado nos meses de novembro e dezembro, citando a Depressão Central e o Baixo Vale do Uruguai como as regiões de maior probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nesse período. A maior variação entre a lâmina de irrigação necessária dentro de cada época de semeadura, em 12 anos, foi de 70 mm, para a semeadura de 01 de outubro (274 DDA), observando-se menor variação (43 mm) para a semeadura de 15 de novembro (319 DDA).

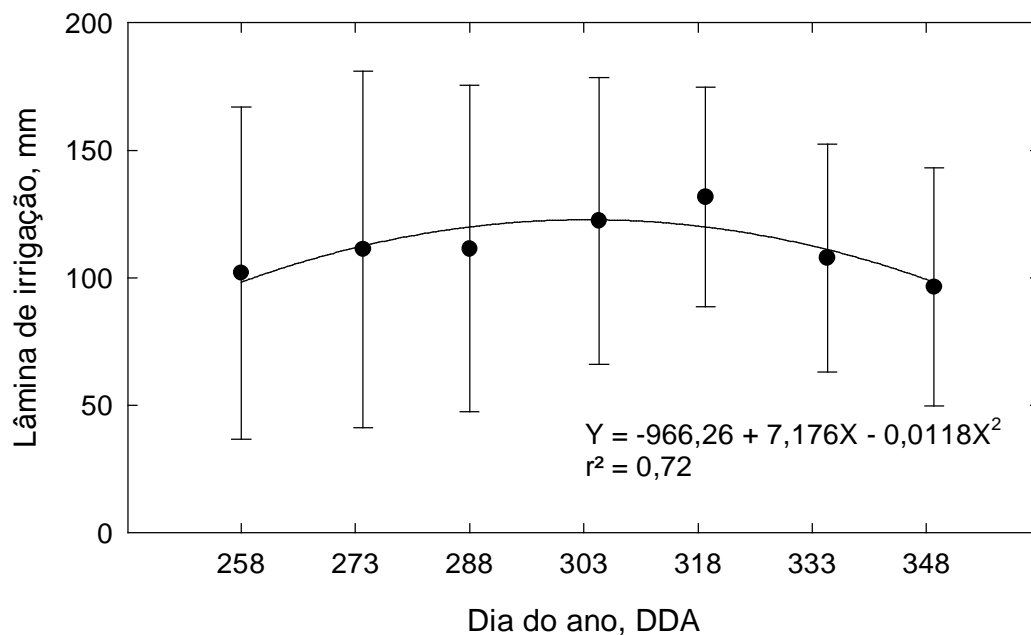


Figura 6. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão, para sementeiras realizadas entre os dias 258 e 348 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

O maior déficit hídrico total acumulado no solo para a cultura do feijão na Depressão Central foi de 240 mm, para a sementeira do feijoeiro realizada em 02 de outubro de 1995. A influência do déficit hídrico sobre o rendimento de grãos do feijoeiro depende da duração, severidade e estágio de desenvolvimento da cultura em que ocorre. A duração do período de deficiência hídrica para essa data de sementeira foi de 56 dias, iniciando-se aos 26 dias após a sementeira do feijão. Para Guimarães et al. (1996), a sensibilidade do feijoeiro ao déficit hídrico está relacionada a sua baixa capacidade de recuperação após a ocorrência do mesmo, em função de seu sistema radicular pouco profundo e ciclo curto.

Para o feijão safrinha, a maior lâmina de irrigação complementar necessária foi verificada para a sementeira realizada em 15 de janeiro (67 mm). A menor necessidade de irrigação para o feijão safrinha deve-se

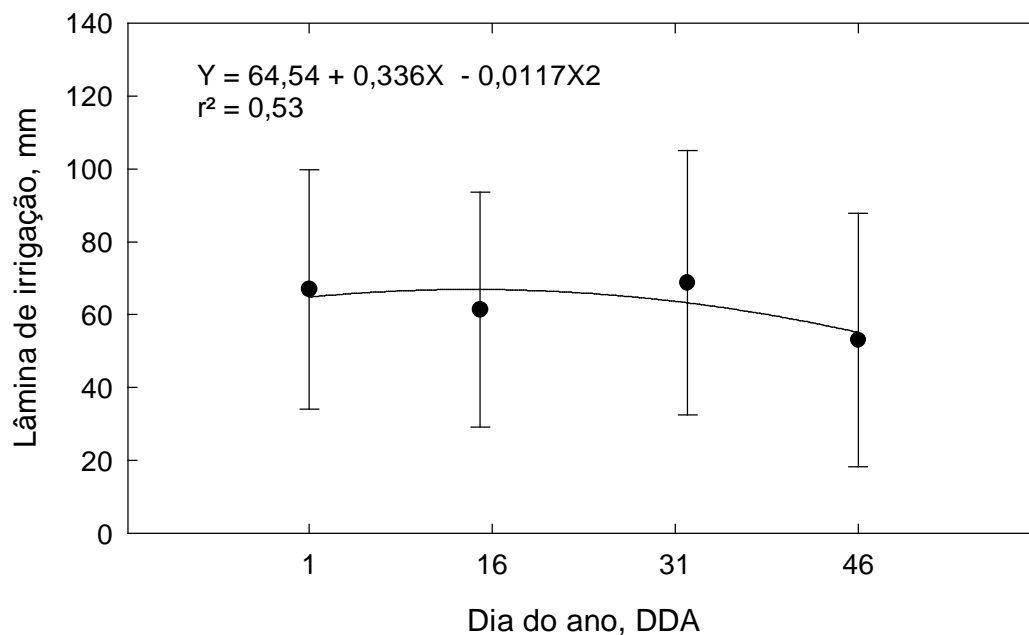


Figura 7. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão safrinha, para sementeiras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 13 anos agrícolas, na Depressão Central do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

a menor demanda evaporativa da atmosfera a partir de fevereiro e à menor probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica severa nesse período (Ávila et al., 1996). A variabilidade existente entre as lâminas de irrigação necessárias para o feijão safrinha deve-se, em grande parte, a estiagem ocorrida no ano agrícola de 1996 e 1997, principalmente para a sementeira realizada em 15 de janeiro e 01 de fevereiro (figura 7).

6.1.2 - Planalto Inferior

Na figura 8 é apresentada a lâmina de irrigação necessária para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, para sementeiras realizadas entre 15 de agosto (227 DDA) e 15 de dezembro (349 DDA) no Planalto Inferior do Rio Grande do Sul. Os resultados demonstram que ocorreu uma resposta linear inversa na lâmina de

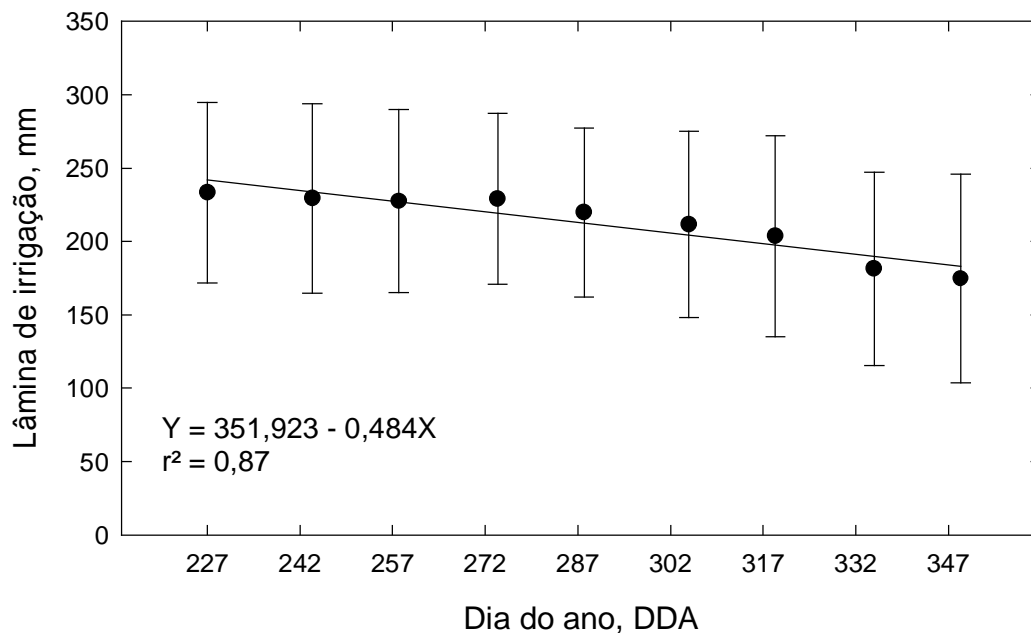


Figura 8. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, para sementeiras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

irrigação necessária com o retardamento da sementeira do milho de 15 de agosto à 15 de dezembro. A lâmina máxima de irrigação requerida foi de 233 mm, para a sementeira de 15 de agosto (227 DDA). Por outro lado, Rosa (2000) encontrou uma lâmina média de irrigação de 133 mm para Cruz Alta, considerando datas de sementeira entre 15 de agosto e 01 de dezembro e 10 anos de dados meteorológicos. A diferença encontrada na lâmina de irrigação necessária no trabalho desenvolvido por Rosa e este, é que a lâmina de irrigação aplicada pelo primeiro foi superior àquela utilizada para a realização deste trabalho.

O menor valor de precipitação pluvial (609), para o período compreendido entre 1988 – 2000, foi observado para a sementeira de 15 de novembro (319 DDA), enquanto que a maior precipitação pluvial foi registrada para sementeiras realizadas na segunda quinzena de agosto (839 mm). A distribuição das precipitações pluviais entre as sementeiras

de 15 de agosto e 15 de dezembro no Planalto Inferior (figura 9) apresentou uma resposta quadrática negativa, com o ponto de mínima (651 mm) ocorrendo para as semeaduras realizadas na primeira quinzena de novembro (dados não apresentados).

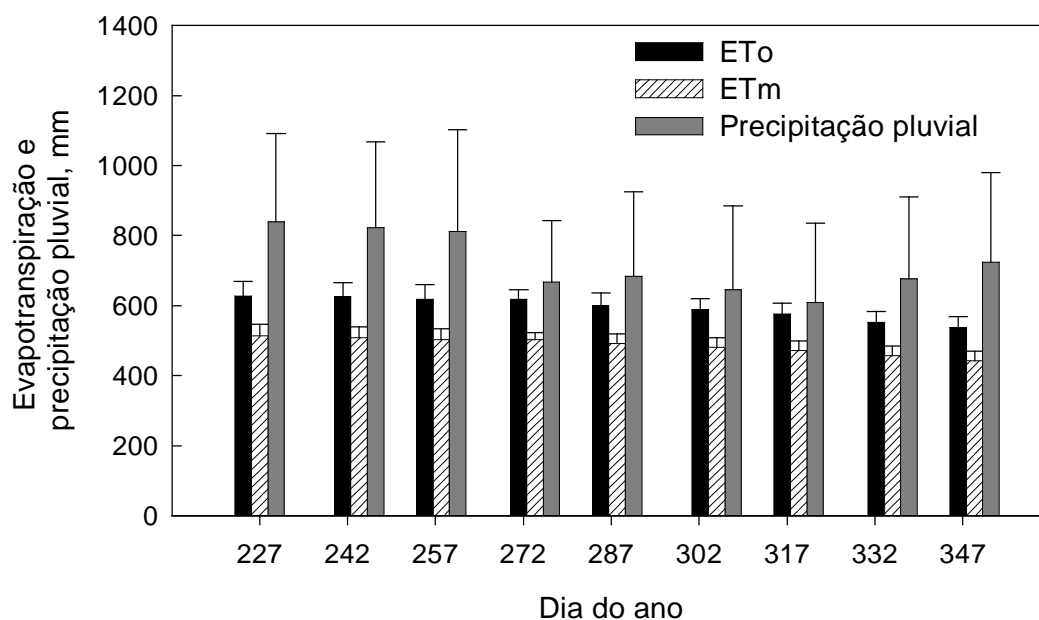


Figura 9. Valores médios de evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração máxima da cultura (ETm) e precipitação pluvial, para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

Embora a ETo e a precipitação pluvial acumulada tenham sido semelhantes entre si durante o ciclo de desenvolvimento do milho na Depressão Central e Planalto Inferior (diferença menor que 1%), nos meses de outubro e novembro o total de precipitação pluvial foi somente ligeiramente superior a ETo no Planalto Inferior (figuras 3 e 9). Para o Planalto Inferior, o total de precipitação pluvial, nas diferentes épocas de semeadura e 13 anos de dados meteorológicos, variou menos que na Depressão Central. Trabalhos conduzidos por Matzenauer et al. (2000) indicam maior deficiência hídrica para Cruz Alta em relação à Passo Fundo. Além disso, a precipitação pluvial esteve concentrada nas

semeaduras de agosto e setembro, diminuindo com o retardamento da semeadura até dezembro.

A estimativa do déficit hídrico no solo para distintas épocas de semeadura, em dois anos agrícolas é apresentado na figura 10. Nesse local, o déficit máximo de água no solo foi de 338 mm, para a semeadura realizada em 15 de novembro de 1990 (dados não apresentados). Analisando a figura 10 observa-se que, para a semeadura de 01 de outubro de 1990, ocorreu um déficit hídrico severo a partir de 70 DAS. O total de precipitação pluvial durante o ciclo de desenvolvimento foi de 558,90 mm.

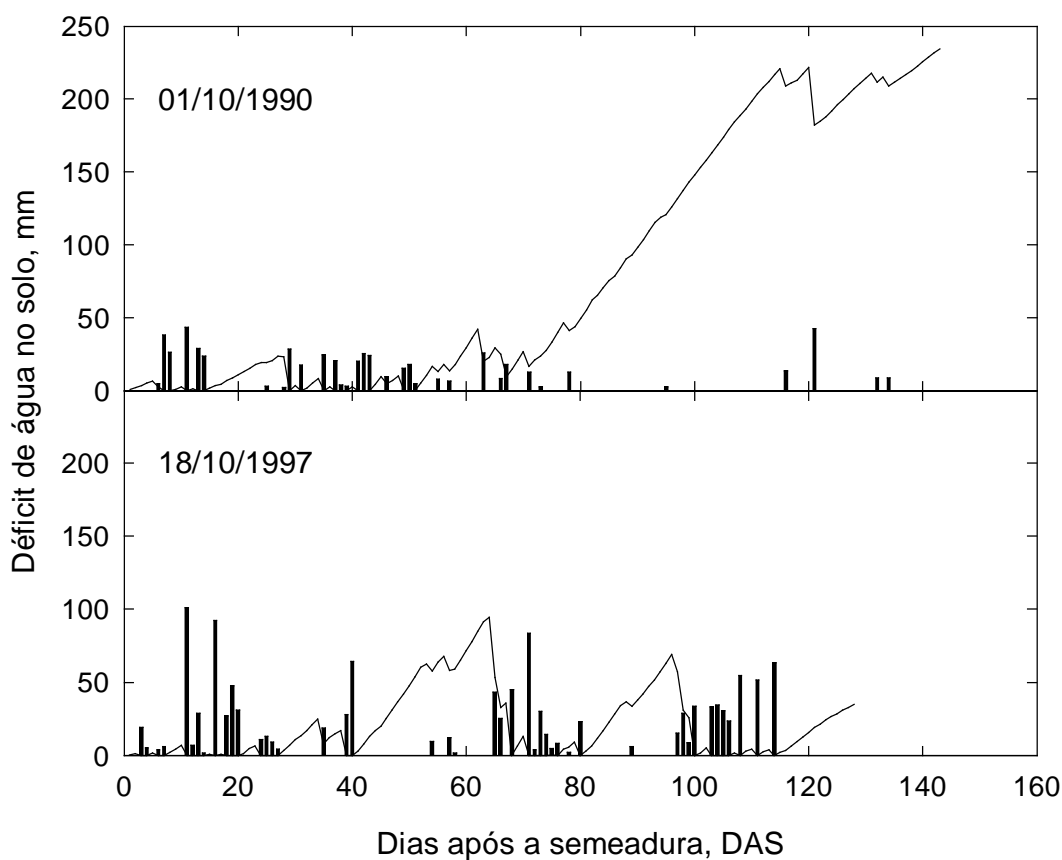


Figura 10. Déficit de água no solo (linha) e precipitação pluvial (barra) para a época de semeadura de 01 de outubro em ano de La Niña (1990) e 15 de outubro em ano de El-Niño (1997), no Planalto Inferior do RS. Santa Maria, RS, 2004.

Em contrapartida, a necessidade de irrigação para a semeadura de 1990, na semeadura de 18 de outubro de 1997 houve um déficit hídrico máximo estimado de 94 mm, entre os 40 e 65 DAS, que corresponde ao período da pré-floração e floração para semeaduras de ciclo normal. Em lavouras cultivadas sem irrigação, possivelmente haveria apenas uma pequena redução no rendimento de grãos, em função da distribuição irregular das precipitações pluviais.

A lâmina de irrigação necessária para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja é apresentada na figura 11. A necessidade de irrigação decresceu linearmente com o retardamento da semeadura de 15 de outubro a 01 de dezembro (288 a 335 DDA). Observou-se que o retardamento da semeadura provocou uma redução na lâmina de irrigação necessária de 27,48%, entre semeadura de 15 de outubro e 01 de dezembro (288 a 335 DDA).

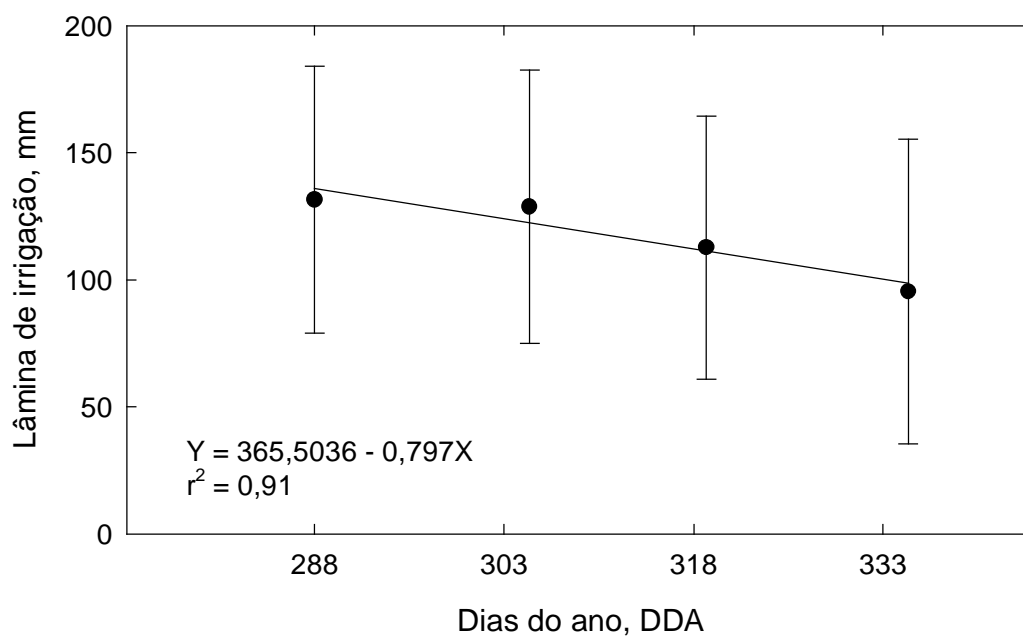


Figura 11. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 288 e 333 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

Esses dados estão em concordância com os observados por Matzenauer et al. (1998), que verificaram maior risco de deficiência hídrica para a semeadura realizada em outubro e menor risco para semeaduras realizadas em dezembro, em Cruz Alta. Observaram ainda que, à medida que a época de semeadura foi retardada, diminuiu a perda de rendimento potencial do milho, com uma perda estimada de 58% para semeadura de 15 de outubro, 50% para a semeadura de 5 de novembro e 36% para a época de 5 de dezembro. Franke & Dorfman (2000) encontraram uma lâmina de irrigação suplementar para a soja de 486,5 mm, considerando um rendimento estimado da cultura igual a 100%. Rosa (2000) encontrou maior necessidade de irrigação para a primeira quinzena de outubro (259 mm) e menor necessidade na segunda quinzena de novembro (186 mm).

Na figura 12 são apresentadas as lâminas de irrigação recomendadas para complementação das necessidades hídricas por época de semeadura da soja, para o período de 1988-2000. Maiores lâminas de irrigação foram requeridas nos anos agrícolas de 1990/91, 1995/96 e 1999/00, considerados anos de La-Niña (Berlato & Fontana, 2001). Em todos os anos e todas as épocas de semeaduras simuladas houve a necessidade de irrigação suplementar para a cultura da soja. A maior e a menor lâmina de irrigação necessária foi para a época de semeadura de 01 de dezembro de 1990 e 15 de outubro de 1994, respectivamente.

A lâmina de irrigação necessária para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão no Planalto Inferior é apresentada na figura 13. A lâmina máxima de irrigação requerida foi de 133 mm, para a semeadura realizada na segunda quinzena de outubro (288 DDA). De acordo com Reichart (1990), o feijoeiro necessita de 300 a 500 mm para completar o seu ciclo. Considerando que a lâmina de irrigação necessária para a complementação das necessidades hídricas do feijoeiro foi de 133 mm, pode-se inferir que o déficit de água durante o ciclo, na média de 12 anos, foi de 33%.

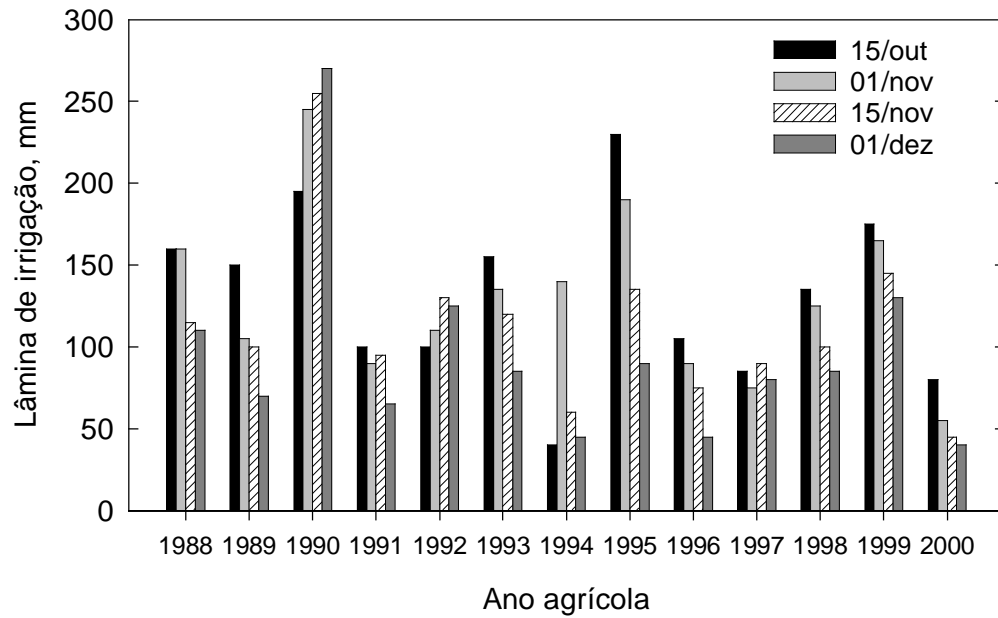


Figura 12. Lâminas de irrigação necessária acumulada por época de semeadura da soja, no Planalto Inferior do RS. Santa Maria, RS, 2004.

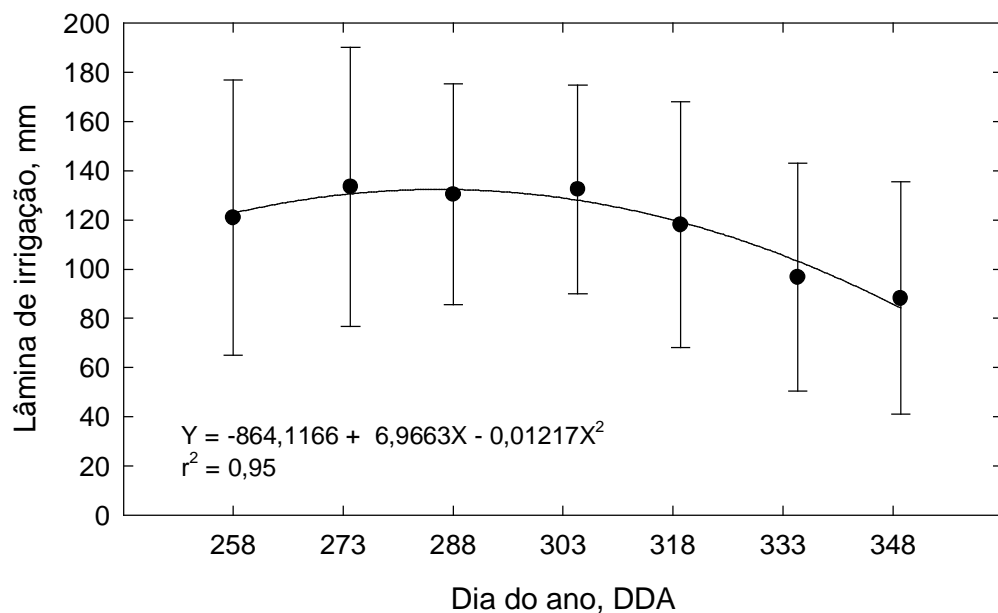


Figura 13. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão, para semeaduras realizadas entre os dias 258 e 348 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

Na tabela 9 é apresentada a precipitação pluvial acumulada durante o ciclo de desenvolvimento do feijoeiro, por época de semeadura e ano agrícola, para o Planalto Inferior do Rio Grande do Sul. Os menores valores de precipitação pluvial e menor variação entre as médias foram observados para as semeaduras realizadas em novembro. Isso explica a maior necessidade de irrigação requerida para a semeadura realizada na época de 15 de outubro (288 DDA), uma vez que o período de maior requerimento hídrico culmina com o de menor disponibilidade hídrica nessa região. Os valores ausentes na tabela 9 correspondem às semeaduras não simuladas devido ao excesso de umidade no solo durante o período destinado para a semeadura dessa época.

Tabela 9. Precipitação pluvial acumulada (mm), valores médios e desvio padrão entre as médias, por época de semeadura e ano agrícola para o Planalto Inferior. Santa Maria, RS, 2004.

| Ano | Épocas de semeadura | | | | | | |
|-------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 258 | 274 | 288 | 305 | 319 | 335 | 349 |
| 1988 | 525 | 292 | 315 | 297 | 337 | 304 | 300 |
| 1989 | 613 | 447 | 371 | 380 | 400 | 422 | 563 |
| 1990 | 622 | 482 | 319 | 295 | 181 | 157 | 92 |
| 1991 | 269 | 305 | 319 | 338 | 472 | 533 | 540 |
| 1992 | 503 | 473 | 467 | 369 | 383 | 356 | 349 |
| 1993 | 798 | 676 | 657 | 612 | 468 | 615 | 418 |
| 1994 | 568 | 562 | 590 | * | 363 | 379 | 403 |
| 1995 | 275 | 121 | 129 | 102 | 354 | 506 | 567 |
| 1996 | 444 | 410 | 320 | 366 | 346 | 371 | 360 |
| 1997 | 987 | * | 855 | 496 | 513 | 694 | 897 |
| 1998 | 356 | 262 | 211 | 220 | 208 | 286 | 250 |
| 1999 | 383 | 300 | 220 | 176 | 187 | 183 | 269 |
| 2000 | 532 | 523 | 575 | 489 | 513 | 559 | 580 |
| Média | 528 | 404 | 411 | 345 | 363 | 412 | 429 |
| Des. Padrão | 202 | 153 | 206 | 142 | 115 | 162 | 202 |

* semeaduras não simuladas.

Para o feijão safrinha, a necessidade de irrigação decresceu linearmente com a retardamento da semeadura de 01 de janeiro a 15 de fevereiro (01 a 46 DDA). Entre a semeadura da primeira época de janeiro

(01 DDA) e a segunda época de fevereiro (46 DDA), ocorreu uma redução de 50% na lâmina de irrigação necessária (Figura 14).

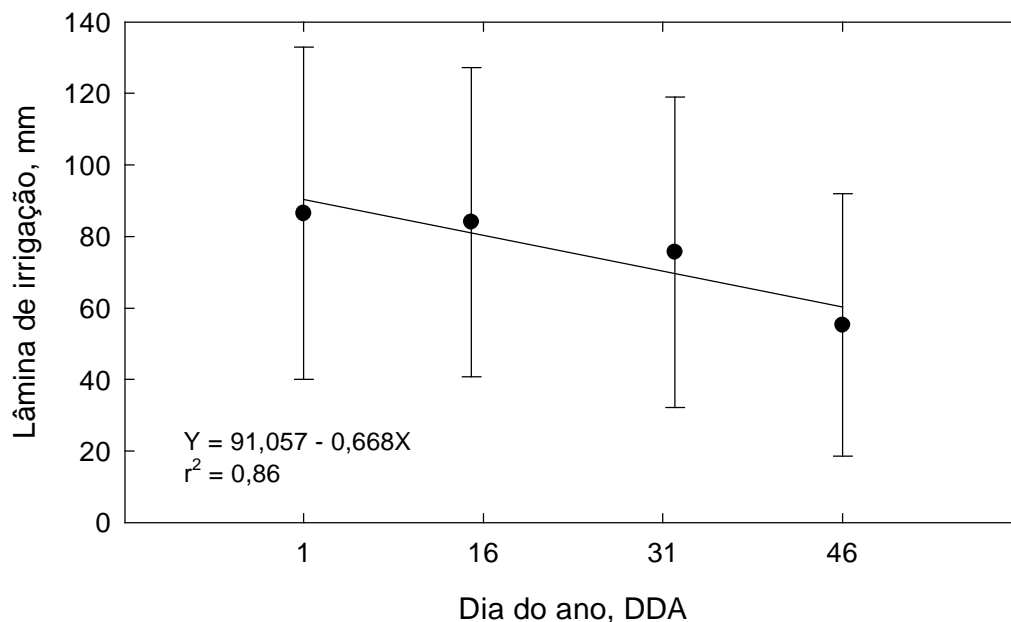


Figura 14. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades de irrigação da cultura do feijão safrinha, para sementeiras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Inferior do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

A maior deficiência hídrica para o feijão safra e safrinha foi de 207 e 185 mm, para sementeiras realizadas em 01 de outubro de 1995 e 01 de janeiro de 1991, respectivamente.

6.1.3 - Planalto Médio

A lâmina média de irrigação recomendada necessária para a complementação das necessidades hídricas do milho semeado entre 15 de agosto e 15 de dezembro no Planalto Médio do Rio Grande do Sul é apresentada na figura 15. A maior média de lâmina de irrigação requerida foi de 167 mm, para a sementeira realizada em 01 de setembro (244 DDA).

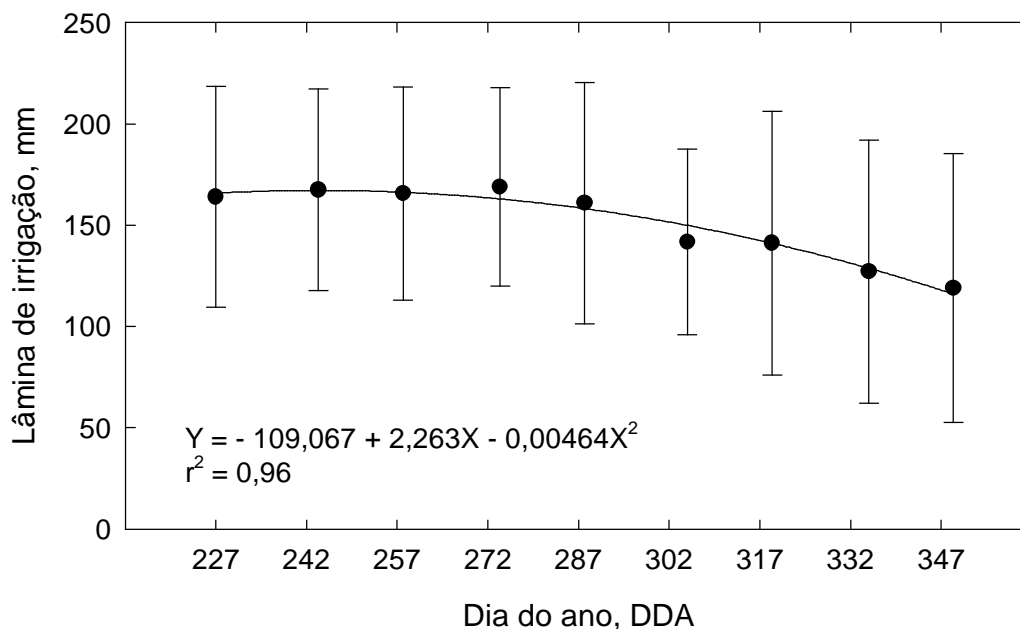


Figura 15. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, para semeaduras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Médio do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

Matzenauer et al. (2000) encontraram uma deficiência hídrica durante o ciclo de desenvolvimento do milho de 82 mm para a semeadura de 01 de dezembro. Os autores observaram menor probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica para Passo Fundo em relação a Cruz Alta. A estimativa do déficit hídrico máximo acumulado no solo (318 mm) para o milho em Passo Fundo foi verificado para a semeadura realizada em 21 de agosto de 1995.

A ETo, a ETm e a precipitação pluvial média para semeaduras do milho realizadas entre a segunda quinzena de agosto (227 DDA) e segunda quinzena de dezembro (349 DDA) são apresentados na figura 16. Observa-se que, enquanto a evapotranspiração de referência variou minimamente entre as diferentes épocas de semeadura, o total de precipitação pluvial foi menor para as semeaduras realizadas em outubro e novembro (274 a 319 DDA). Comparando-se os totais de precipitação

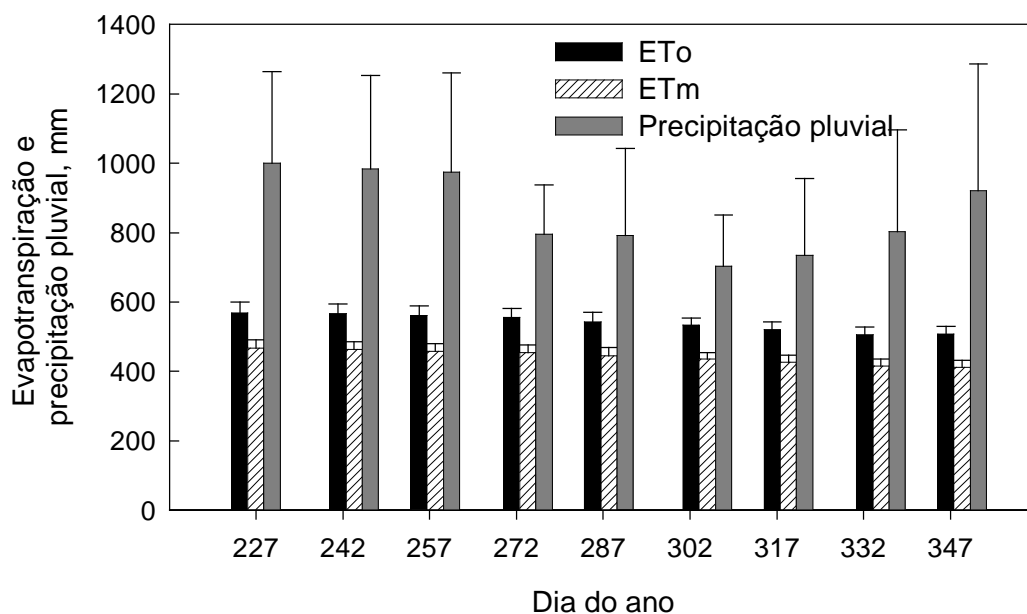


Figura 16. Valores médios de evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração máxima da cultura (ETm) e precipitação pluvial para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, no Planalto Médio do RS. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

pluvial, para diferentes épocas de semeadura e 13 anos agrícolas, entre a Depressão Central, Planalto Inferior e Planalto Médio, observa-se uma tendência de distribuição mais uniforme entre as últimas regiões, e uma variação mais acentuada para a região da Depressão Central (Figura 03).

Observando os valores apresentados na figura 16 verifica-se que, embora a precipitação pluvial nos meses de outubro e novembro apresente um decréscimo para as semeaduras realizadas entre a primeira quinzena de outubro (274 DDA) e primeira quinzena de dezembro (335 DDA), em relação às semeaduras de agosto (227 DDA), setembro (244 e 258 DDA) e segunda quinzena de dezembro (349 DDA), a precipitação pluvial média no Planalto Médio foi 16 e 19% superior àquela verificada para o Planalto Inferior e Depressão Central, respectivamente.

A necessidade de irrigação para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja é apresentada na figura 17. A

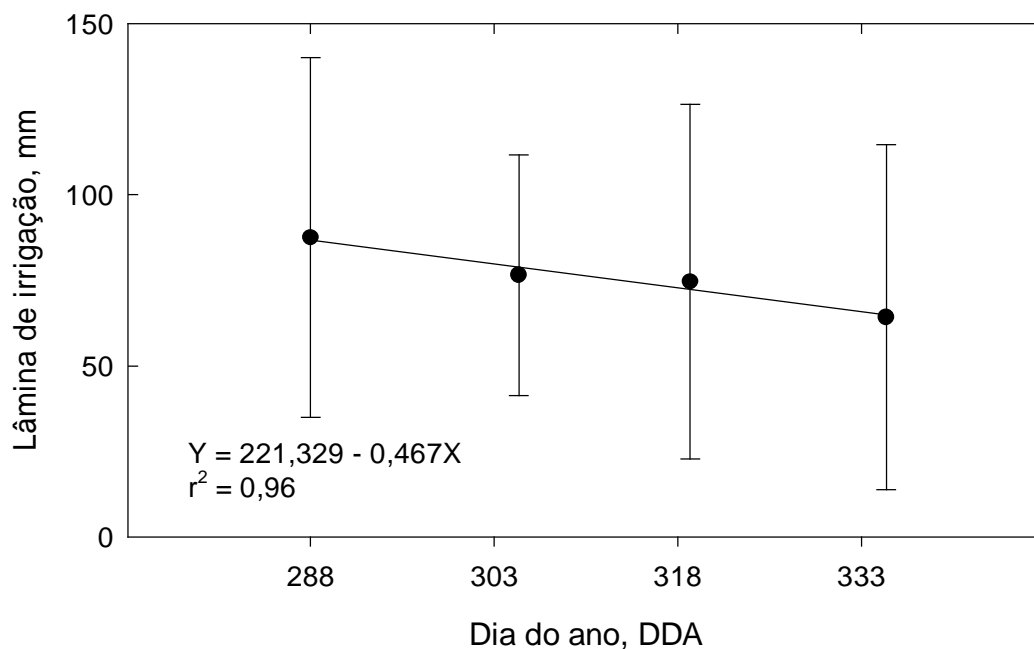


Figura 17. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 228 e 333 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Médio do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

lâmina necessária decresceu linearmente com o retardamento da data de semeadura de 15 de outubro (288 DDA) a 01 de dezembro (335 DDA). Cunha et al. (1998) determinaram a perda potencial de rendimento da soja por deficiência hídrica, observando menores perdas potenciais para Passo Fundo em relação a Cruz Alta, estando de acordo com os resultados obtidos nesse trabalho. Entretanto, Matzenauer et al. (1998) verificaram uma deficiência hídrica de 181 mm para a cultura da soja semeada em 01 de dezembro em Passo Fundo.

A semeadura de 01 de novembro de 1990 e 1997 não foi simulada devido ao excesso de umidade no solo (Figura 18). As maiores lâminas de irrigação foram determinadas para os anos agrícolas de 1990/91, 1995/96 e 1999/00, seguindo a mesma tendência observada para o Planalto Inferior (Figura 12) e Depressão Central (Figura 05).

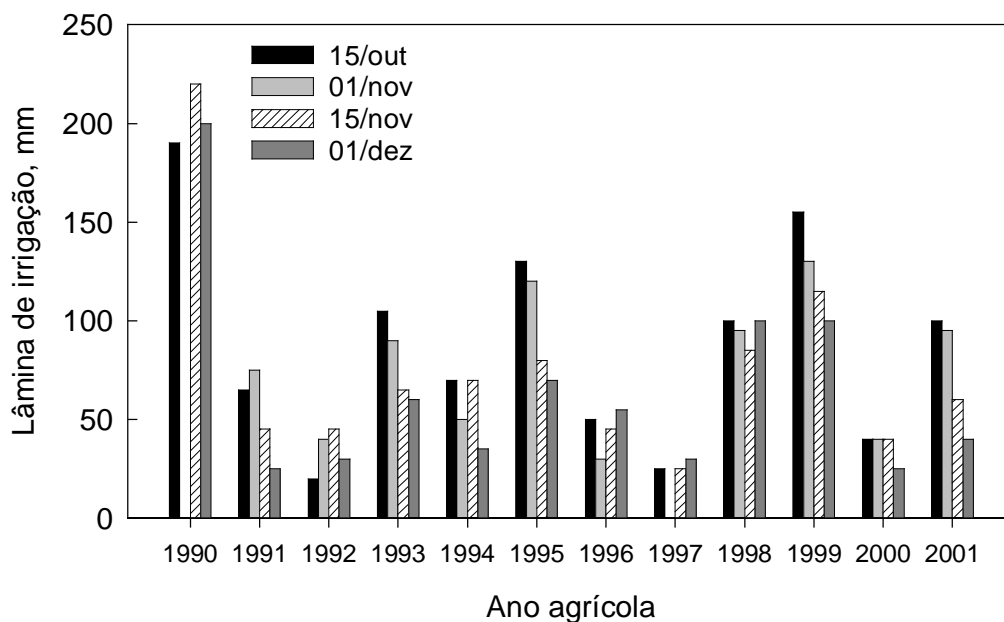


Figura 18. Lâminas de irrigação necessária acumulada por época de semeadura da soja, no Planalto Médio do RS. Santa Maria, RS, 2004.

A estimativa da máxima deficiência hídrica no solo foi de 207 mm, na época de semeadura simulada em 22 de novembro de 1990. Matzenauer et al. (1998) encontraram uma evapotranspiração real (ET_r) de 620 mm para a época de semeadura de outubro em Passo Fundo. Como a ET_r depende principalmente da disponibilidade hídrica no solo, os maiores valores de precipitação pluvial verificados para o Planalto Médio significam que, nessa região, a ET_r se aproxima da ET_m, acarretando em baixos valores de deficiência hídrica.

Analisando a lâmina de irrigação complementar requerida pela cultura da soja no Planalto Médio (Figura 17) e a máxima deficiência hídrica no solo (média de 13 anos agrícolas) pode-se inferir que somente um déficit hídrico severo em anos com forte estiagem representa riscos de perdas significativas no rendimento de grãos dessa cultura.

As lâminas de irrigação recomendadas para complementação das necessidades hídricas do feijão na safra para o Planalto Médio são apresentadas na figura 19. A maior média de lâmina foi de 93,2 mm,

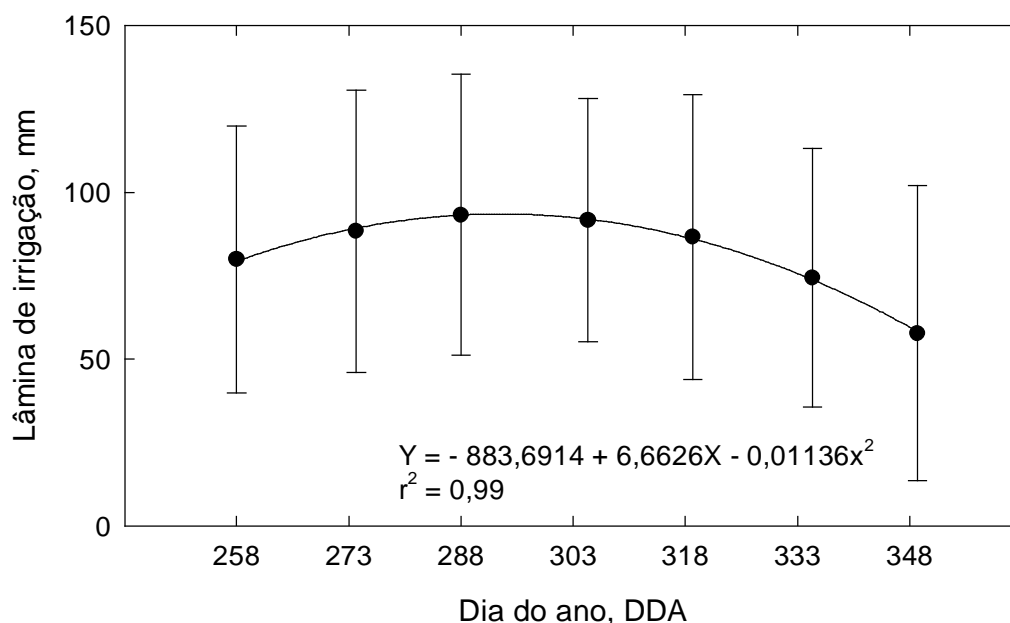


Figura 19. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão, para sementeiras realizadas entre os dias 158 e 348 do ano, no Planalto Médio do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

obtida para a sementeira realizada na época de 15 de outubro (288 DDA). As sementeiras de 01 de novembro de 1990 e 1997, 01 de outubro de 1997 e 01 de dezembro de 1996 não foram simuladas devido ao excesso de umidade no solo nessas datas. A lâmina de irrigação necessária para atender as necessidades hídricas do feijão no Planalto Médio segue a mesma tendência da lâmina observada para o Planalto Inferior (lâmina máxima para segunda quinzena de outubro) porém, 30% inferior àquela, fato que pode ser parcialmente explicado pela melhor distribuição e maior volume das precipitações pluviais na região do Planalto Médio.

A estimativa do déficit hídrico máximo no solo foi observado para a sementeira realizada em 22 de novembro de 1990 (157,35 mm). Observando os dados da figura 20 verifica-se que, para a sementeira do feijão realizada em 01 de novembro de 1995 (305 DDA), houve restrição hídrica por ocasião do estabelecimento da cultura e um déficit severo

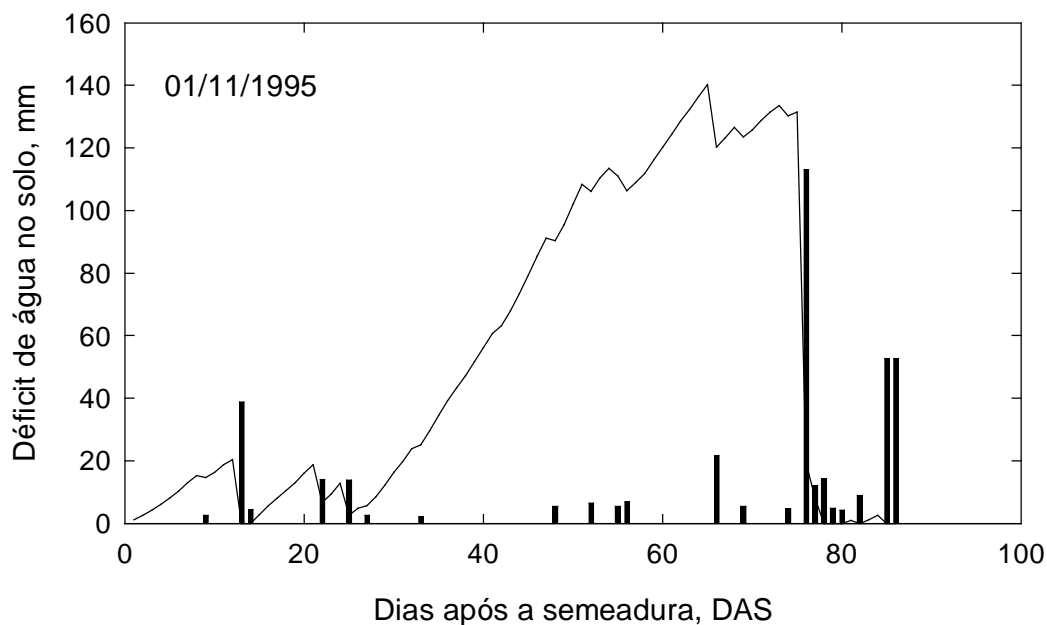


Figura 20. Estimativa do déficit hídrico máximo no solo (linha) e precipitação pluvial (barra) para a época de semeadura de 01 de novembro no Planalto Médio do RS. Santa Maria, RS, 2004.

entre 22 e 64 DAS. Além disso, houve excesso de precipitação pluvial durante o estágio de maturação fisiológica do feijão, o que pode ocasionar perdas devido à germinação das sementes na vagem, além das perdas no rendimento causadas pelo déficit hídrico nos estádios vegetativo, floração e frutificação.

Para o feijão safrinha (figura 21), a necessidade de irrigação para complementação das necessidades hídricas apresentou um comportamento quadrático com o retardamento da semeadura de 01 de janeiro (01 DDA) para 15 de fevereiro (46 DDA). A máxima necessidade de água (56 mm) foi observada para a semeadura realizada em 15 de janeiro (15 DDA). Esses resultados concordam com os observados por Cunha et al. (1998), que verificaram menores valores de deficiência hídrica para as culturas de primavera-verão em Passo Fundo.

A redução na lâmina de irrigação necessária para o feijão safrinha no Planalto Médio com o retardamento da semeadura de 01 e 46 DDA foi

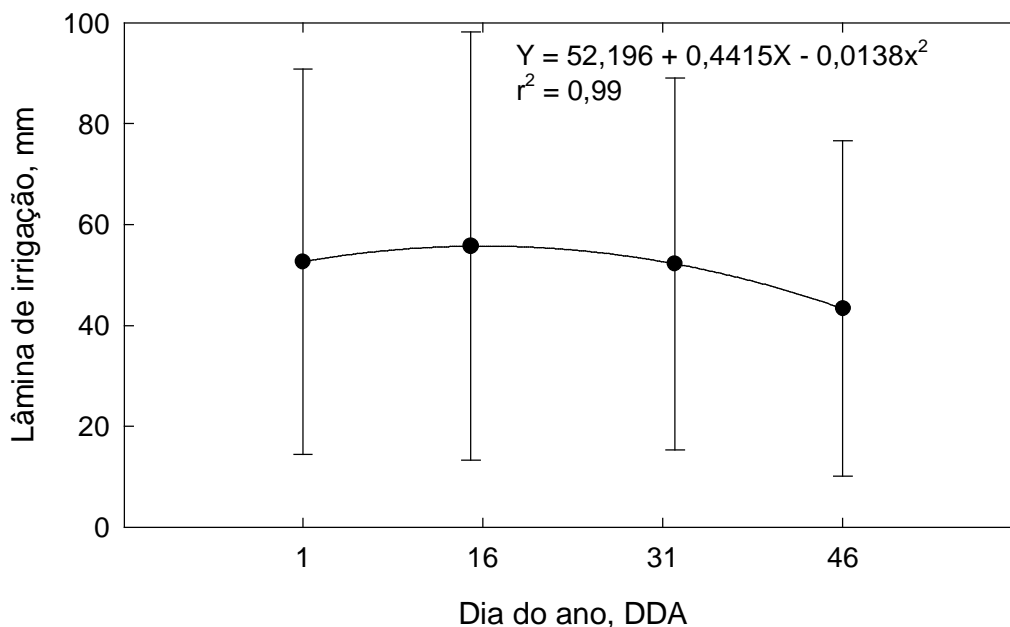


Figura 21. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão safrinha, para sementeiras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 13 anos agrícolas, no Planalto Médio do RS. Santa Maria, RS, 2004.

de 18%. Observou-se que a variação (desvio padrão) entre as lâminas de irrigação recomendadas por época de sementeira (média de 13 anos) foi maior que a lâmina média de irrigação. Essa variação ocorreu, principalmente, em função do baixo volume de precipitações pluviais registradas para o feijão safrinha no ano de 1991 (224 mm), levando a necessidade de aplicação de maior lâmina de irrigação.

6.1.4 - Missões

A maior média de necessidade de irrigação requerida para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho foi de 164 mm para a sementeira realizada na época de 15 de outubro (288 DDA) (Figura 22). A variabilidade da lâmina de irrigação necessária é maior entre os diferentes anos do que entre as épocas de sementeira. Isso deve, basicamente, em função da grande variabilidade interanual na distribuição das precipitações pluviais e, portanto, as diferenças de

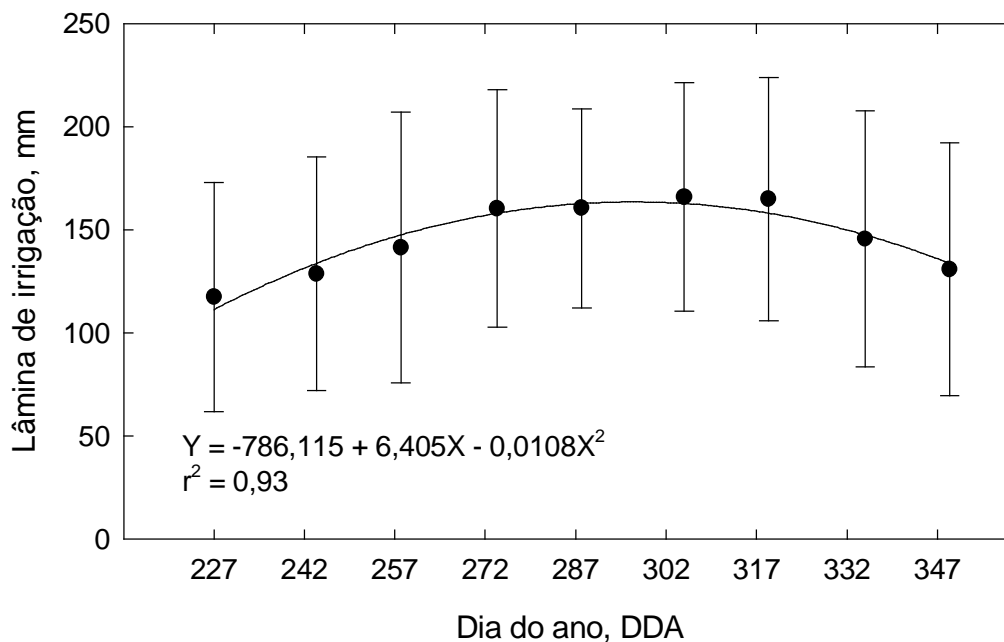


Figura 22. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a cultura do milho, para semeaduras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, na Região das Missões do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

requerimento hídrico entre as épocas devem ser consideradas com muita cautela.

A estimativa do déficit hídrico máximo observado foi de 319 mm, para a semeadura realizada em 18 de agosto de 1995 (227 DDA). A maior deficiência hídrica no solo, em todos os anos avaliados, ocorreu nos meses de novembro e dezembro, período em que a precipitação pluvial foi menor (Figura 23). Matzenauer et al. (2000) observaram que é comum a ocorrência de deficiência hídrica em diferentes locais e épocas de semeadura. Entretanto, ao contrário das observações feitas pelos autores acima citados, grandes diferenças entre locais e épocas de semeadura não foram verificadas nesse trabalho, o que pode ser atribuído às pequenas variações entre as precipitações pluviais entre as regiões estudadas, para todas as épocas de semeadura avaliadas.

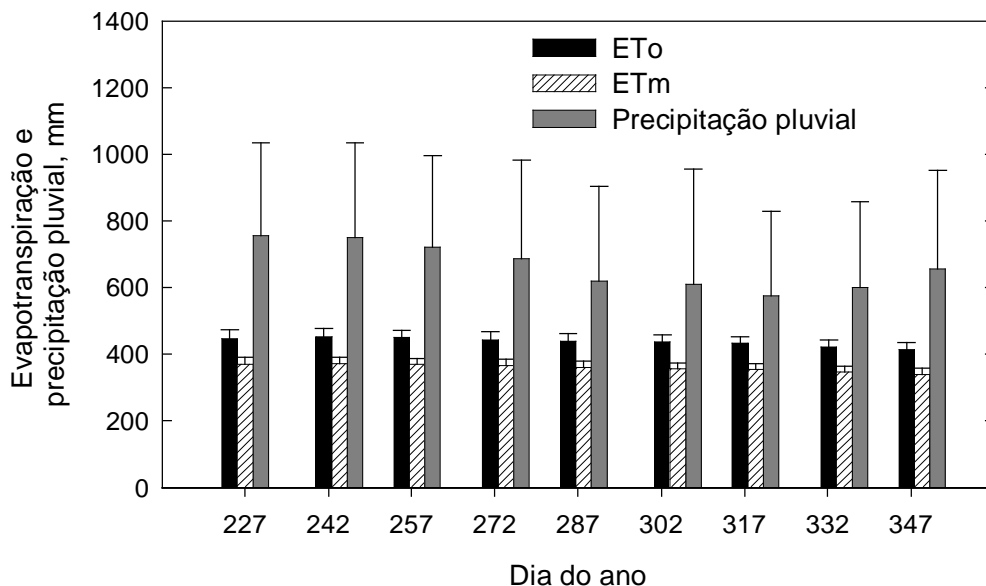


Figura 23. Valores médios de evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração máxima da cultura (ETm) e precipitação pluvial para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, em 13 anos agrícolas, na Região das Missões do RS. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

O volume médio de precipitação pluvial comparado entre as épocas de semeadura (média de 13 anos) para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio e Missões variou minimamente (com exceção do Planalto Médio, onde a precipitação pluvial foi 23% superior à Região das Missões). A ETo observada para a região das Missões foi 27, 22 e 19% inferior àquela observada para o Planalto Inferior, Depressão Central e Planalto Médio, respectivamente. A ETo é influenciada pelas condições meteorológicas, principalmente a radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento. Diferenças nos valores absolutos entre essas variáveis para as diferentes regiões agroecológicas são difíceis de determinar; entretanto, dias claros favorecem uma maior demanda evaporativa da atmosfera e, portanto, maior consumo de água pelas plantas. Assim, a menor ETo observada para a Região das Missões possivelmente esteja relacionada com um maior número de dias nublados, maior umidade relativa do ar e menor velocidade do vento.

A necessidade de irrigação para a cultura da soja é apresentada na figura 24. A necessidade de irrigação apresentou um comportamento quadrático para as semeaduras realizadas entre 15 de outubro (288 DDA) e 01 de dezembro (335 DDA), com a lâmina máxima de irrigação (100 mm) recomendada para semeaduras realizadas na segunda quinzena de novembro (319 DDA). Berlato & Fontana (1999) encontraram uma correlação positiva entre o rendimento de grãos da soja e a precipitação pluvial para a Região das Missões, com maiores rendimentos em anos de El-Niño e rendimentos de grãos menores associados ao La-Niña. A estimativa do déficit hídrico máximo no solo para a soja foi de 162 mm, para a semeadura realizada em 15 de outubro de 1995 (288 DDA).

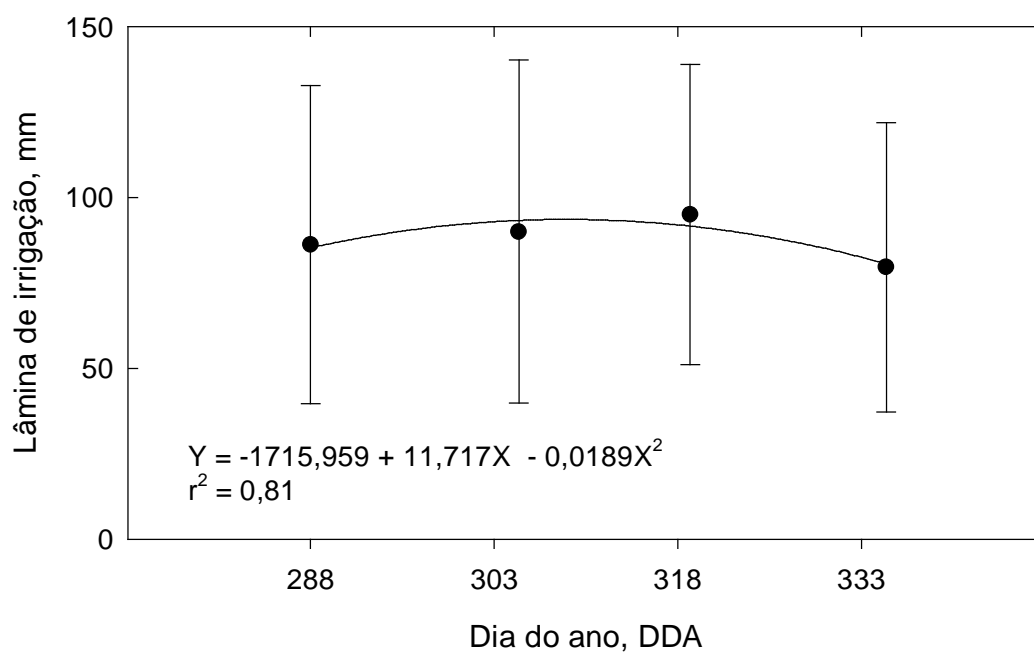


Figura 24. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 288 e 333 do ano, em 13 anos agrícolas, na Região das Missões do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

A sensibilidade da soja à deficiência hídrica é mínima durante o estágio vegetativo, a não ser que a severidade do déficit limite muito a

altura da planta (Boerma & Ashley, 1982), e máxima durante a formação de vagens e enchimento de grãos (Korte et al., 1983a). Maehler et al. (2003) verificaram que o déficit hídrico alterou a duração do ciclo da cultura a partir de R5, quando o tratamento irrigado levou 12 dias a mais do que o não irrigado para atingir a maturação, resultando em maior período para o enchimento de grãos. A principal resposta da soja ao déficit hídrico é o abortamento de flores e legumes no início da formação desses. Em trabalho realizado com a ontogenia da soja, Ventimiglia et al. (1999) verificaram que, caso todas as flores presentes no florescimento se transformassem em legumes, o rendimento da soja poderia alcançar 18.000 kg ha⁻¹, ao passo que, se todos os legumes formados até o início do enchimento de grãos alcançassem a maturação fisiológica, o rendimento seria de 10.000 kg ha⁻¹, enquanto o rendimento alcançado em R8 foi de 4.600 kg ha⁻¹, fato que explica a maior necessidade hídrica no estágio de formação de legumes e enchimento de grãos.

A necessidade de irrigação por época de semeadura da soja na Região das Missões é apresentada na figura 25. As maiores lâminas de irrigação foram necessárias para as semeaduras da soja realizadas em novembro (305 e 319 DDA), indicando maior probabilidade de ocorrência de déficit hídrico para os meses de janeiro e fevereiro, ao contrário das regiões anteriores, onde o déficit hídrico usualmente ocorre entre novembro e janeiro. De acordo com Franke & Dorfman (2000), a irrigação na cultura da soja no Planalto Inferior e Missões justifica-se tecnicamente, porém restam dúvidas quanto a viabilidade econômica da irrigação.

A maior necessidade de irrigação para a cultura do feijão na safra foi verificada para a semeadura realizada em 15 de novembro, com uma lâmina de irrigação requerida de 90 mm (Figura 26). Comparando-se as lâminas de irrigação recomendadas para a cultura do feijão na safra na Região das Missões (Figura 26), Planalto Inferior e Depressão Central (Figuras 13 e 09), observa-se um redução de 32 e 28% na lâmina de irrigação necessária, em relação ao Planalto Inferior e Depressão Central,

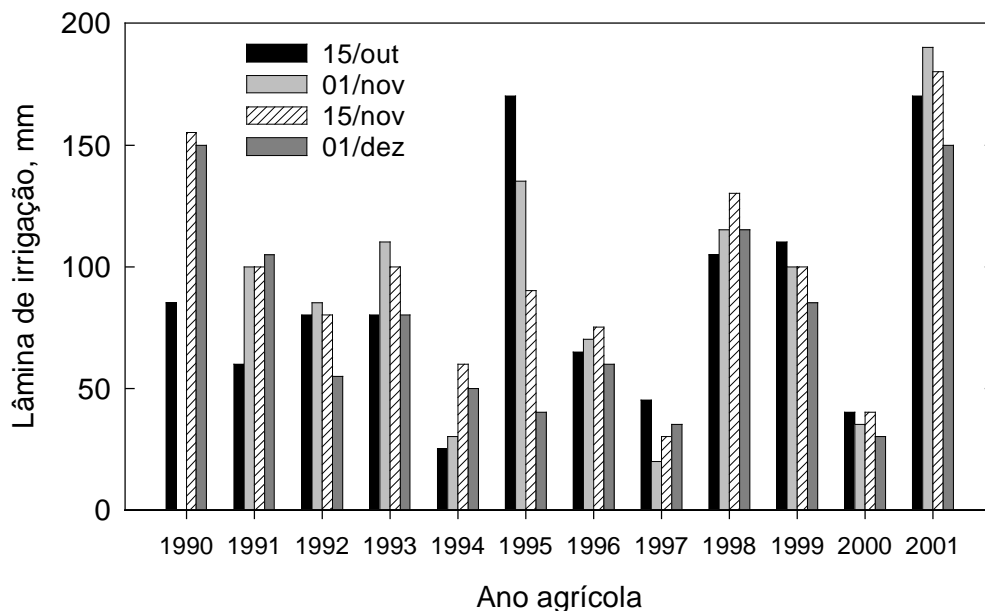


Figura 25. Lâmina de irrigação necessária acumulada por época de semeadura da soja, na Região das Missões do RS. Santa Maria, RS, 2004.

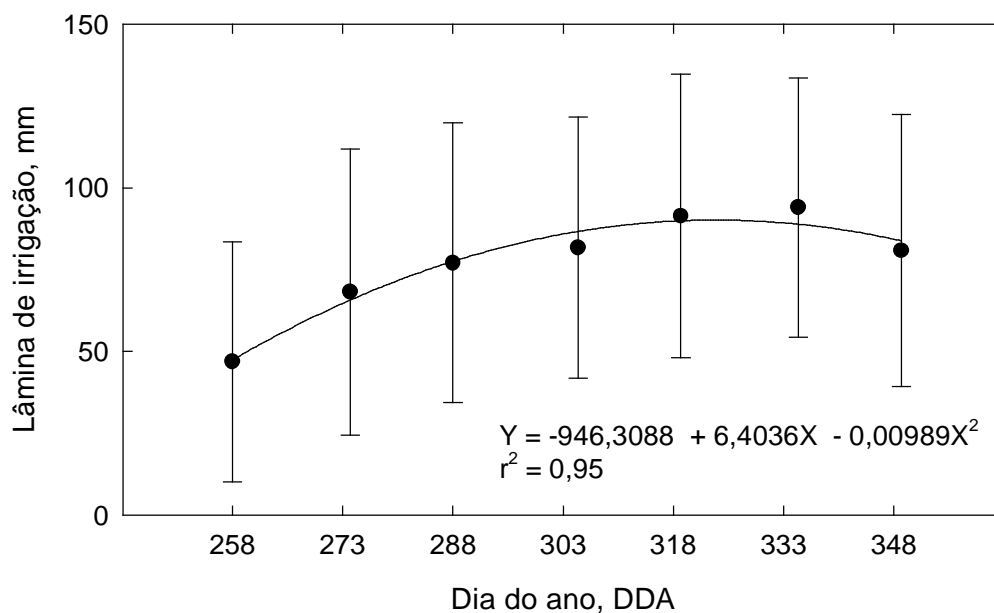


Figura 26. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão, para semeaduras realizadas entre os dias 258 e 348 do ano, na Região das Missões do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

respectivamente. Além disso, observou-se um retardamento na época de semeadura de maior requerimento de irrigação complementar (Figura 26), confirmando a tendência de ocorrência de períodos de deficiência hídrica mais tarde (janeiro e fevereiro), em relação ao Planalto Inferior e Depressão Central.

Guimarães et al. (1996) afirmam que a definição do momento certo de irrigar o feijoeiro é um fator que deve ser considerado, uma vez que o sistema radicular pouco profundo dificulta a recuperação de plantas submetidas a estresse hídrico, mesmo que de curta duração. A grande variabilidade encontrada entre as lâminas de irrigação entre épocas de cultivo e entre regiões, deve-se à variabilidade anual e interanual das variáveis meteorológicas determinantes da demanda evaporativa da atmosfera, principalmente a distribuição e o volume das precipitações pluviais (Matzenauer et al., 1999), como já dito anteriormente.

A necessidade de irrigação complementar para o feijão safrinha decresceu com o retardamento da semeadura de janeiro para fevereiro (Figura 27). A lâmina de irrigação recomendada para o feijão safrinha foi 33 e 10% menor que àquela recomendada para o Planalto Inferior e Depressão Central (Figuras 14 e 07). A tendência observada para o feijão safrinha (Figura 26), soja (Figura 24) e milho (Figura 23), ou seja, maior necessidade de irrigação para semeaduras realizadas na segunda quinzena de outubro e em novembro.

Culturas semeadas nessas datas encontram-se no estágio de floração e enchimento de grãos em janeiro e fevereiro, período de maior probabilidade de ocorrência de déficit hídrico nas Região das Missões. De acordo com Ávila et al. (1996), a probabilidade da precipitação pluvial superar a evapotranspiração potencial na região do Planalto Médio, Missões e Vale do Uruguai é maior que 60% a partir de março, fato que explica a menor necessidade de irrigação para o feijão na safrinha. Isso ocorre principalmente devido a queda na demanda evaporativa da atmosfera, e menos devido ao aumento nas precipitações pluviais.

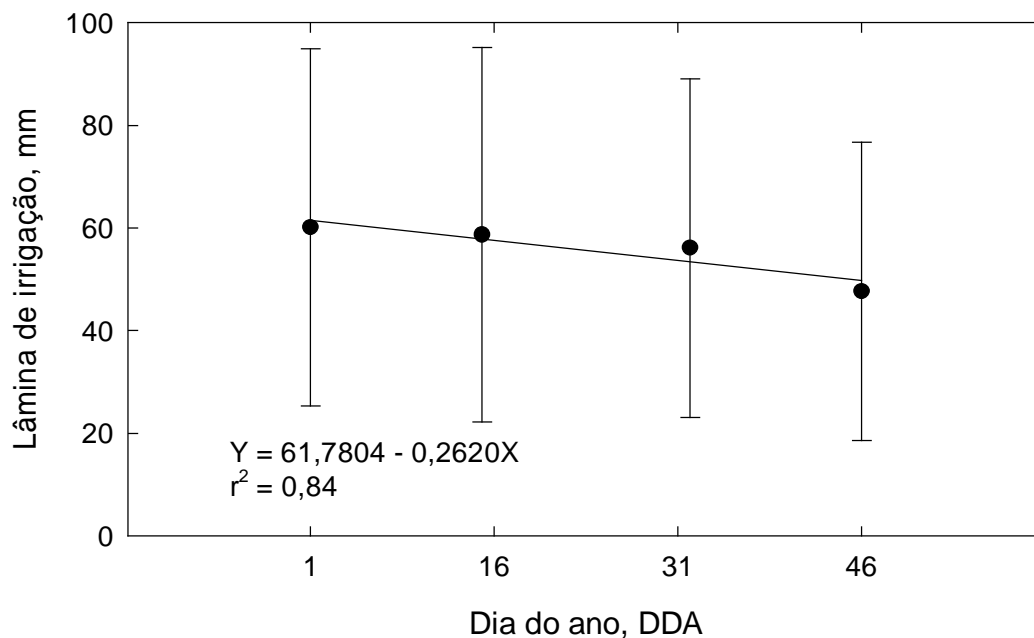


Figura 27. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a cultura do feijão safrinha, para sementeiras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 13 anos agrícolas, na Região das Missões do RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

6.1.5 - Baixo Vale do Uruguai

A lâmina de irrigação necessária para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, considerando 10 anos de dados meteorológicos, é apresentada na figura 28. A maior lâmina de irrigação necessária foi de 186 mm e foi observada para a sementeira realizada na data de 01 de outubro (274 DDA). A diferença entre a maior lâmina (186 mm para 01 de outubro - 274 DDA) e a menor (138 mm para 15 de dezembro – 349 DAE) foi de 26%.

A ET_m, ET_o e a precipitação pluvial para a sementeira do milho realizada entre a segunda quinzena de agosto (227 DDA) e segunda quinzena de dezembro (349 DDA), no Baixo Vale do Uruguai são apresentados na figura 29. Matzenauer et al. (1995) verificaram a relação entre o rendimento de grãos do milho e a disponibilidade hídrica para São Borja, encontrando uma grande dependência da cultura à disponibilidade hídrica, principalmente para as sementeiras de ciclo normal.

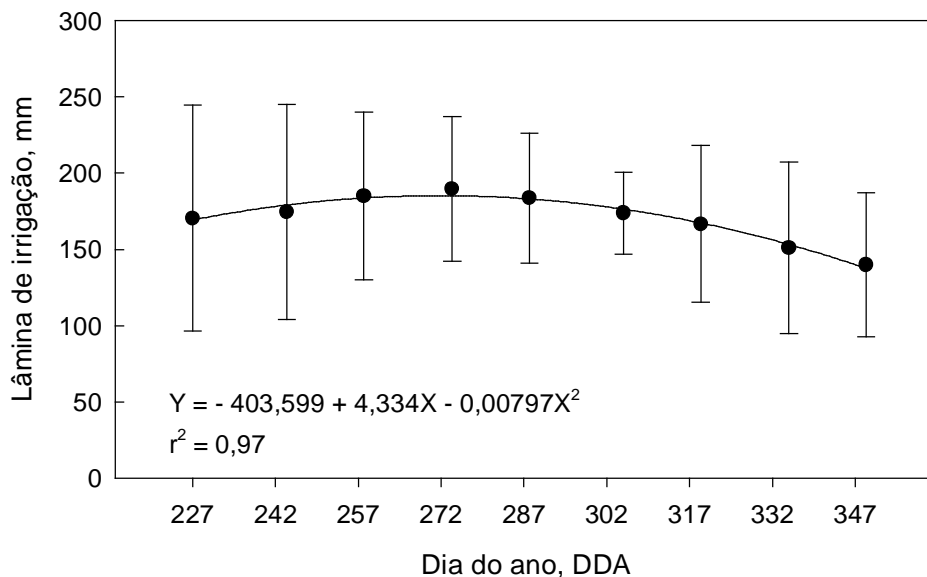


Figura 28. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do milho, para semeaduras realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, no Baixo Vale do Uruguai, RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

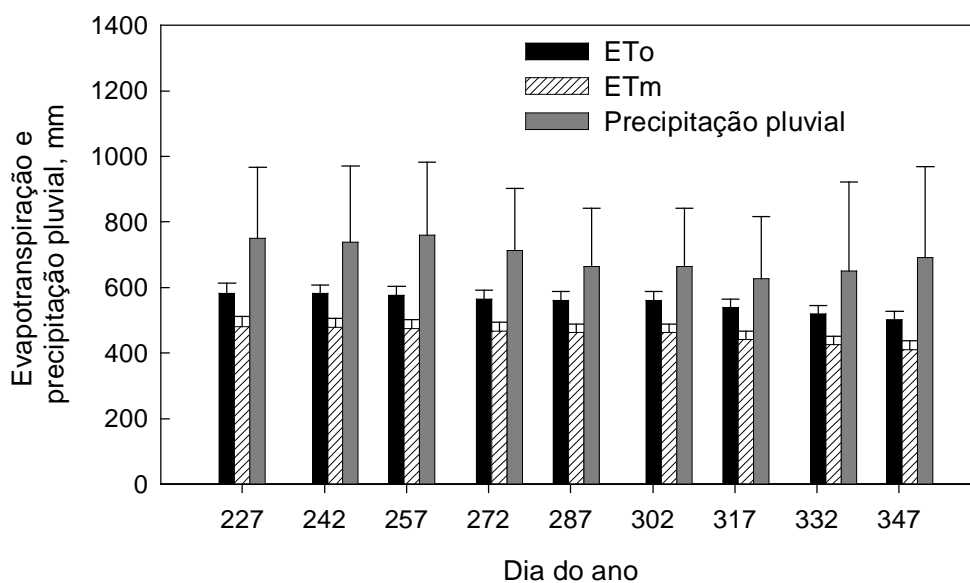


Figura 29. Valores médios de evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração máxima da cultura (ETm) e precipitação pluvial para as semeaduras do milho realizadas entre os dias 227 e 347 do ano, no Baixo Vale do Uruguai. As barras verticais menores representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

A redução na lâmina de irrigação requerida pela soja com o retardamento da semeadura de 15 de outubro (288 DDA) para 01 de dezembro (335 DDA) foi de 29% (Figura 30). De acordo com Ávila et al. (1996), nas principais regiões produtoras de grãos no Estado (Planalto Médio, Missões, Vale do Uruguai e Depressão Central), há grande probabilidade de ocorrência de déficit hídrico nos meses de janeiro e fevereiro. Esse fato reduz as chances de proporcionar um aumento na produtividade através do planejamento da data de semeadura, visando não coincidir o período de maior exigência da cultura com épocas favoráveis à deficiência hídrica no solo. Entretanto, o uso da irrigação pode aumentar o potencial produtivo das principais culturas de primavera-verão nessa região do Estado.

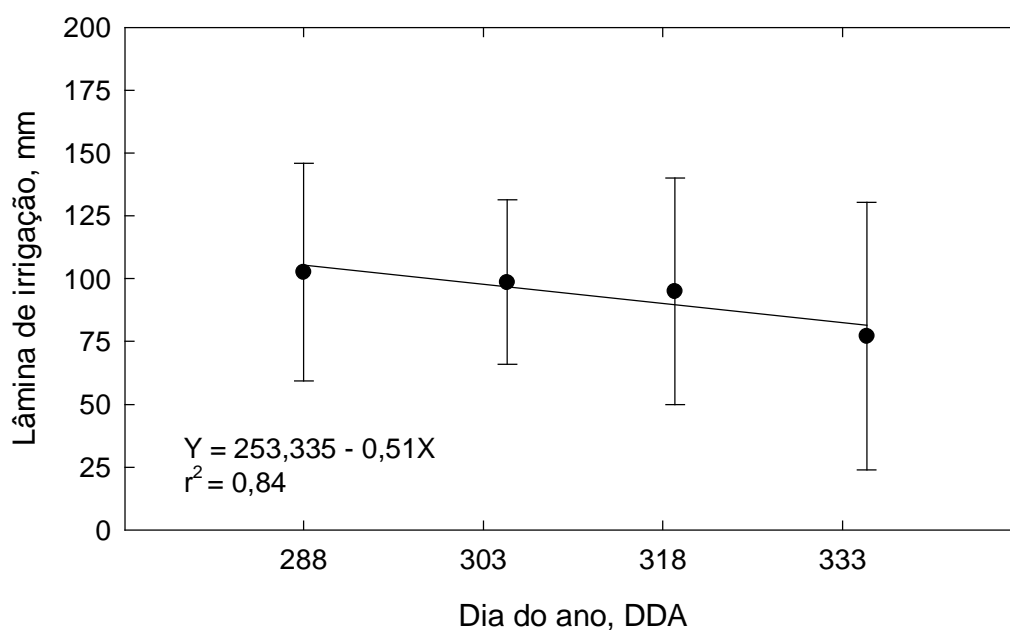


Figura 30. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja, para semeaduras realizadas entre os dias 288 e 333 do ano, no Baixo Vale do Uruguai, RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2003.

A lâmina de irrigação para a complementação das necessidades hídricas da cultura da soja por época de semeadura para a Região do

Baixo Vale do Uruguai é apresentada na figura 31. Seguindo a tendência da necessidade de irrigação para a soja verificada para as demais regiões, maiores lâminas de irrigação foram recomendadas nos anos agrícolas de 1990/01, 1995/06 e 1999/00. Em todos os anos agrícolas (média de 10 anos) e todas as datas de semeadura realizadas, houve a necessidade de complementação das necessidades hídricas da soja através das irrigações.

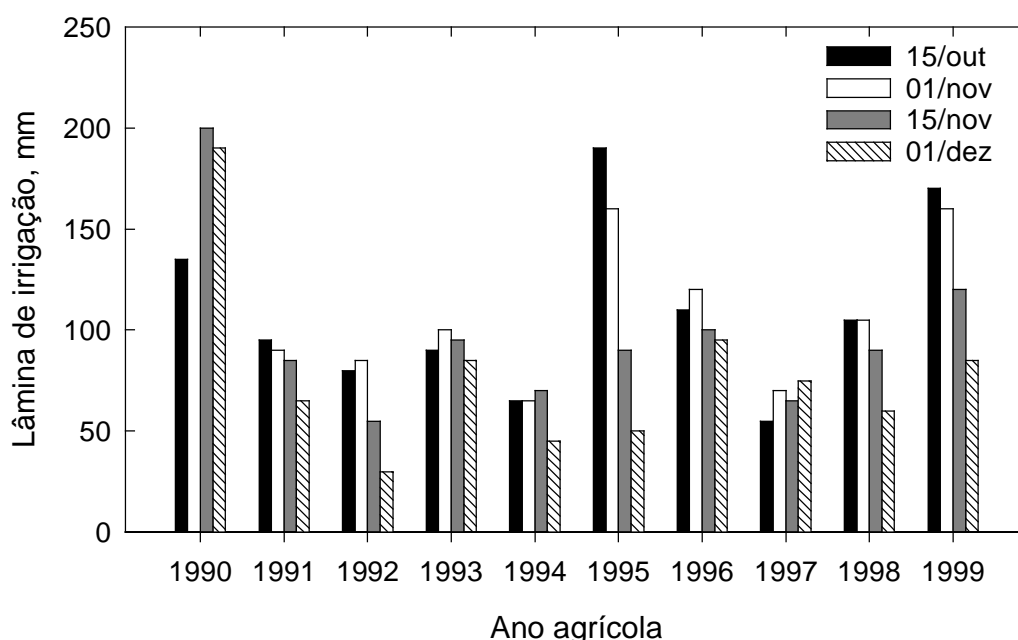


Figura 31. Lâmina de irrigação necessária acumulada por época de semeadura da soja, no Baixo Vale do Uruguai, RS. Santa Maria, RS, 2004.

A necessidade de irrigação para a cultura do feijão na safra é apresentada na figura 32. A maior média de lâmina de irrigação necessária foi de 114 mm, determinada para a semeadura simulada em 01 de novembro (305 DDA). Observa-se que, para a semeadura realizada em 15 de novembro (319 DDA) e 01 de dezembro (335 DDA), a variabilidade entre a lâmina requerida, na média de 10 anos de dados meteorológicos foi menor, evidenciando que, durante o ciclo da cultura

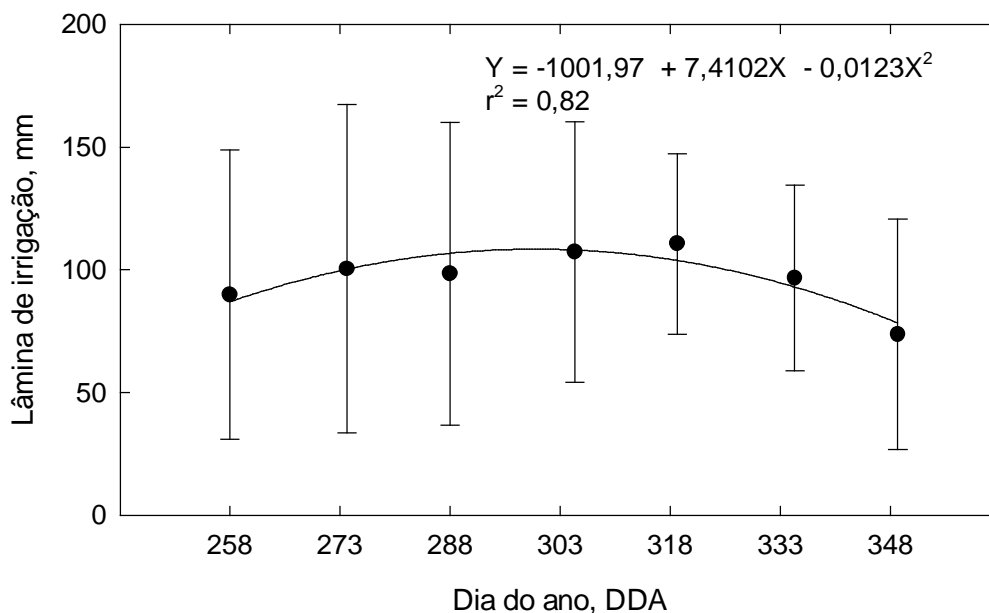


Figura 32. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a complementação das necessidades hídricas da cultura do feijão, para semeaduras realizadas entre os dias 258 e 348 do ano, em 10 anos agrícolas, no Baixo Vale do Uruguai, RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

semeada nessas épocas ocorreu melhor distribuição das precipitações pluviais entre os anos. No caso do Baixo Vale do Uruguai, esse foi o período de menor disponibilidade hídrica.

Para o feijão safrinha (Figura 33) a necessidade de aplicação de irrigação foi menor em relação à safra, sendo que a maior parte da lâmina de irrigação foi aplicada no início do ciclo de desenvolvimento (estabelecimento e estádios iniciais). De uma maneira geral, nas três primeiras épocas de semeadura a necessidade de irrigação foi similar (Figura 33) e, na última época, a necessidade de irrigação (lâmina) foi menor. Porém, quanto mais tarde for realizada a semeadura nessa região, menor é a produtividade e maior é o risco de perda de safra, por excesso de umidade no final do ciclo e ocorrência de geadas.

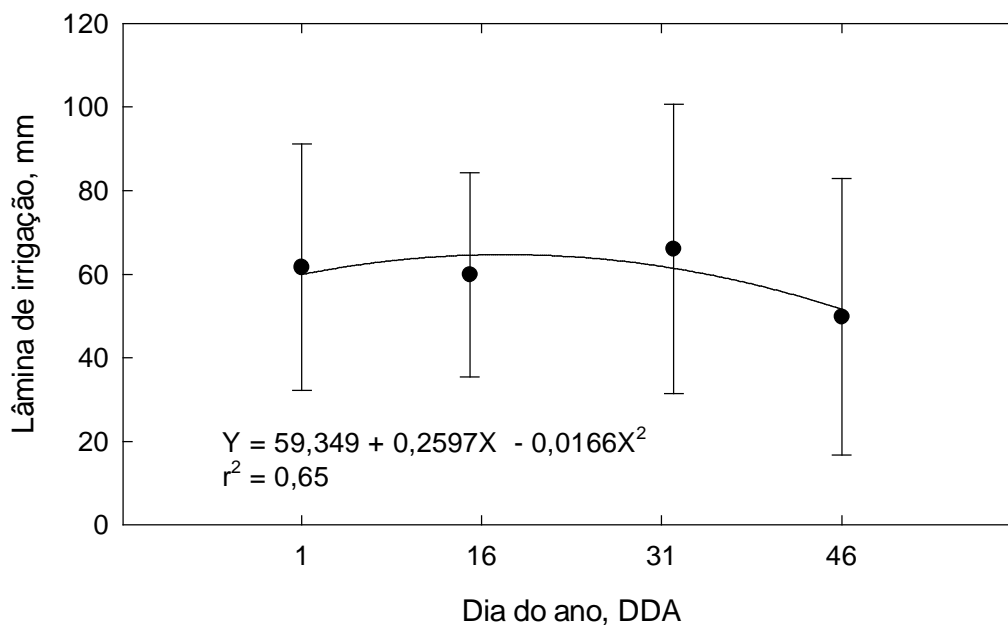


Figura 33. Lâmina de irrigação necessária acumulada para a cultura do feijão safrinha, para sementeiras realizadas entre os dias 1 e 46 do ano, em 10 anos agrícolas, no Baixo Vale do Uruguai, RS. As barras verticais representam o desvio padrão. Santa Maria, RS, 2004.

6.2 - Lâmina máxima, média e mínima de irrigação por região agroecológica e cultura

6.2.1 - Milho

Os valores da lâmina de irrigação máxima, média e mínima para atender as necessidades hídricas da cultura do milho (média de 10 anos para o Baixo Vale do Uruguai e 13 anos para as demais regiões), para as diferentes regiões estudadas, são apresentadas na figura 34. A lâmina máxima de irrigação necessária foi de 222, 242, 167, 164 e 186 mm, para sementeiras realizadas em 01 de outubro (274 DDA), 15 de agosto (227 DDA), 01 de setembro (244 DDA), 15 de outubro (288 DDA) e 01 de outubro (274 DDA), para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, respectivamente. Para Matzenauer et al. (2000), a evapotranspiração diária de cada espécie

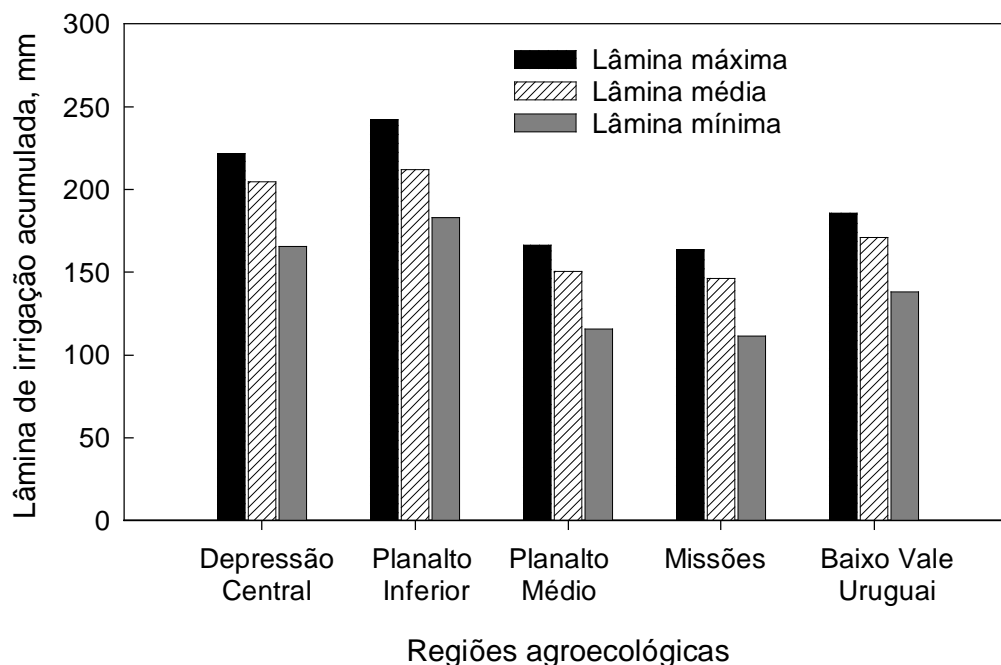


Figura 34. Lâmina máxima, média e mínima de irrigação necessária para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, para diferentes épocas de semeadura do milho. Santa Maria, RS, 2004.

depende do estágio de desenvolvimento, da disponibilidade de água no solo e da demanda evaporativa da atmosfera. Portanto, os valores absolutos estão em função das condições meteorológicas de cada região, do ano e época de semeadura na mesma região.

A maior diferença entre a lâmina de irrigação máxima e mínima necessária foi verificada para a região do Planalto Inferior e Depressão Central, enquanto a menor diferença ocorreu para o Baixo Vale do Uruguai. Observa-se que a lâmina de irrigação mínima recomendada para o Planalto Inferior é maior que a lâmina máxima de irrigação necessária para o Planalto Médio e Missões e semelhante a máxima do Baixo Vale do Uruguai.

A diferença entre a lâmina necessária para as cinco regiões estudadas deve-se a maior probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica no Planalto Inferior e Depressão Central, comparado com o Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai (Cunha et al., 1998 e

Prela & Ribeiro, 2002). Geralmente, o consumo de água entre as diferentes épocas de semeadura, para uma mesma região, varia menos que entre regiões. Isso ocorre porque, na ausência de precipitação pluvial, há maior número de dias claros e, conseqüentemente, maior radiação solar, temperaturas mais elevadas e maior demanda evaporativa da atmosfera.

O total de precipitação pluvial por época de semeadura do milho, nas diferentes regiões agroecológicas estudadas, bem como a precipitação pluvial média entre as regiões por época de semeadura são apresentados na figura 35. Apesar de muitos trabalhos na literatura terem registrado diferenças entre o total das precipitações pluviais para diferentes locais no Rio Grande do Sul (Berlato, 1992; Ávila et al., 1996, Fontana & Almeida, 2002), as variações espacial e temporal deste elemento observadas neste trabalho foram pequenas, possivelmente devido a utilização de um período relativamente curto de dados meteorológicos (13 anos). Entretanto, seguindo a tendência da distribuição das precipitações pluviais durante o ano, maiores valores e maior desvio padrão foram verificados para as semeaduras realizadas em agosto e setembro e na segunda quinzena de dezembro (ciclo mais longo), em relação às semeaduras realizadas em outubro e novembro (274 e 319 DDA). A partir dos dados apresentados nas figuras 34 e 35 pode-se inferir que as frustrações de safra das principais culturas agrícolas de primavera-verão no Estado devem-se mais à variabilidade interanual das precipitações pluviais, do que a sua variação intra-anual, atribuindo-se pelo menos parte dessas variações aos fenômenos El-Niño e La Niña (Fontana & Almeida, 2002).

Na comparação da precipitação pluvial entre as diferentes regiões (figura 35 a), verificou-se que o total de precipitação pluvial no Planalto Médio foi 15, 18, 19 e 22% superior aos valores observados para o Planalto Inferior, Baixo Vale do Uruguai e Missões, respectivamente.

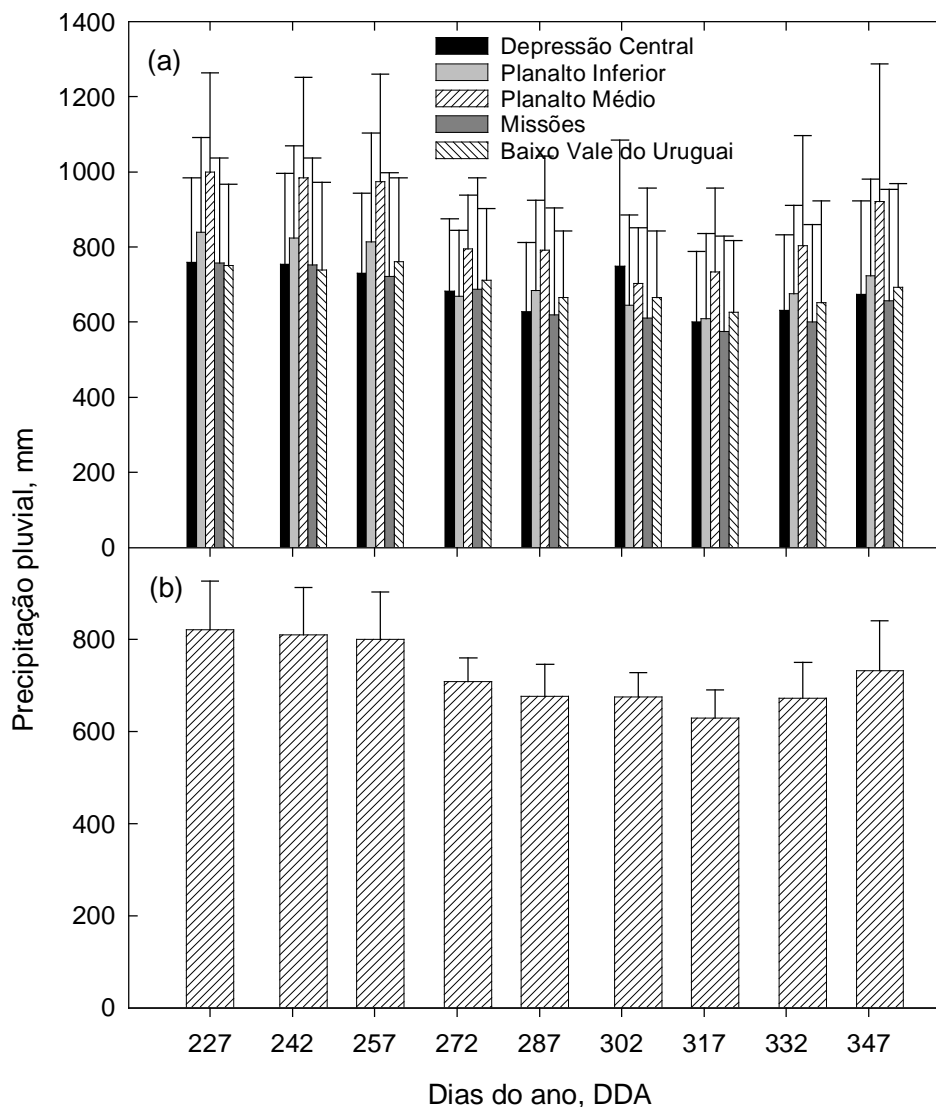


Figura 35. Precipitação pluvial média por região (a) e média das precipitações (b) entre as diferentes regiões para a semeadura do milho entre 227 e 347 dias do ano. As barras verticais menores representam o desvio padrão entre as médias. Santa Maria, RS, 2004.

6.2.2 - Soja

A lâmina máxima, média e mínima de irrigação requerida nas diferentes regiões pela cultura da soja é apresentada na figura 36. A lâmina máxima de irrigação recomendada foi de 131, 132, 87, 100 e 106 mm, para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões

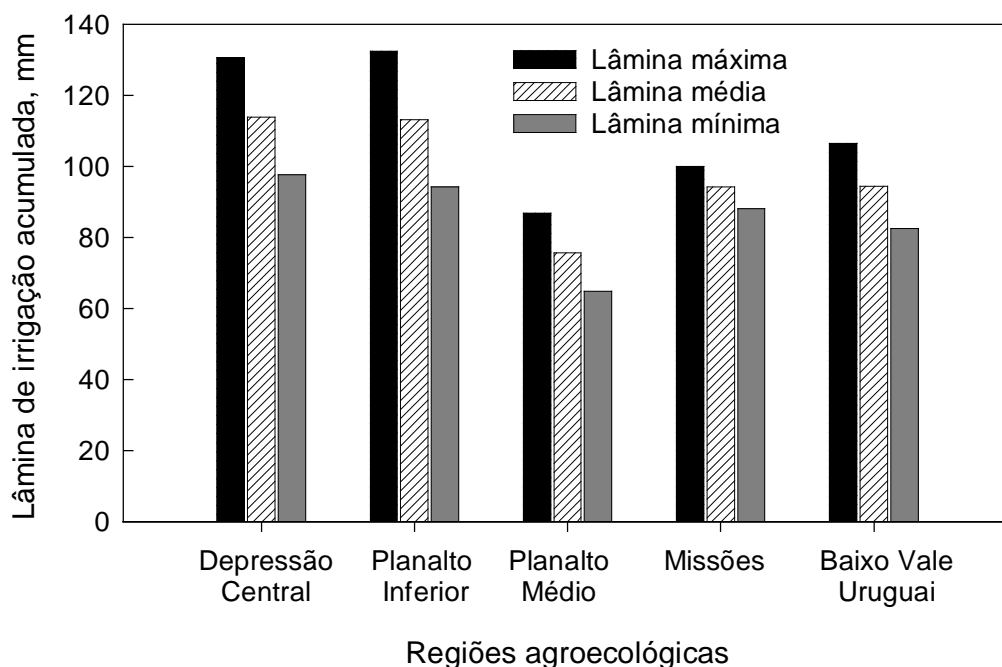


Figura 36. Lâmina máxima, média e mínima de irrigação necessária para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, para diferentes épocas de semeadura da soja. Santa Maria, RS, 2004.

e Baixo Vale do Uruguai, respectivamente, para a época de semeadura de 15 outubro (288 DDA) em todas as regiões (com exceção das Missões, que ocorreu em 01 de novembro – 305 DDA). As lâminas recomendadas para a Depressão Central, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai correspondem a 99, 66, 75 e 80% da lâmina recomendada para o Planalto Inferior, respectivamente.

A cultura da soja apresenta maior tolerância à deficiência hídrica no solo, principalmente quando o déficit ocorre no estágio vegetativo (Boerma & Ashley, 1982), em relação às culturas do milho e feijão. A tolerância ao déficit hídrico diminui drasticamente na fase de formação de vagens e enchimento de grãos. Nesse período, de acordo com Buriol et al. (1977), para condições do Rio Grande do Sul, a probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica é menor. Segundo os autores, as deficiências mensais de água no solo diminuem consideravelmente nos

meses de março e abril, período que culmina com o estágio de formação de vagens e enchimento de grãos da cultura da soja.

6.2.3 – Feijão

Na figura 37 são apresentadas as lâminas máxima, média e mínimas de irrigação recomendadas para atender as necessidades hídricas do feijão safra, nas cinco regiões estudadas. As lâminas máximas de irrigação necessárias foram de 125, 133, 93, 90 e 114 mm, para as épocas de semeadura de 01 de novembro (305 DDA), 01 de outubro (274 DDA), 15 de outubro (288 DDA), 15 de novembro (319 DDA) e 01 de novembro (305 DDA), na Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, respectivamente.

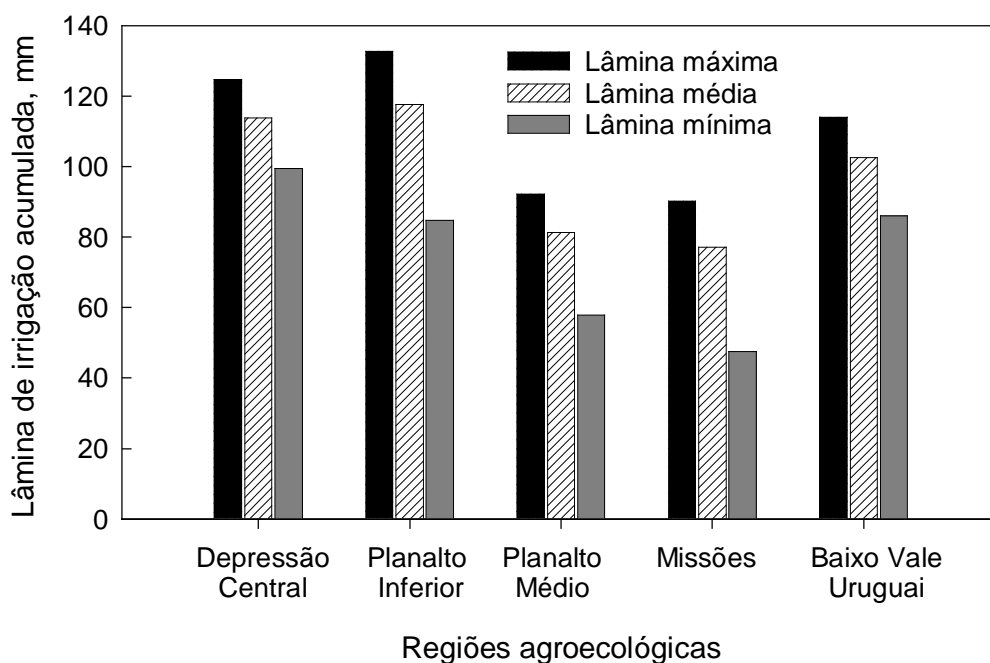


Figura 37. Lâmina máxima, média e mínima de irrigação necessária para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, para diferentes épocas de semeadura do feijão safra. Santa Maria, RS, 2004.

A diferença nas lâminas recomendadas entre as diferentes regiões está em função da distribuição das precipitações pluviais em cada uma

das regiões recomendadas. Foram verificados valores semelhantes entre as lâminas máxima, média e mínima de irrigação necessárias para a Depressão Central e Planalto Inferior e, entre o Planalto Médio e Missões, com valores intermediários para o Baixo Vale do Uruguai. A lâmina máxima de irrigação necessária para o feijão safra no Planalto Médio e Missões foi semelhante a lâmina mínima de irrigação necessária para o Planalto Inferior e Depressão Central, indicando que há maior probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nessas regiões.

Na figura 38 são apresentadas as lâminas de irrigação recomendadas para a complementação das necessidades de irrigação do feijão safrinha, por região de estudo. A necessidade de irrigação suplementar para o feijão safrinha no Planalto Inferior é semelhante ao do feijão safra para o Planalto Médio e Missões. As lâminas máximas de irrigação requeridas foram de 67, 90, 67, 62 e 60 mm, respectivamente para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai.

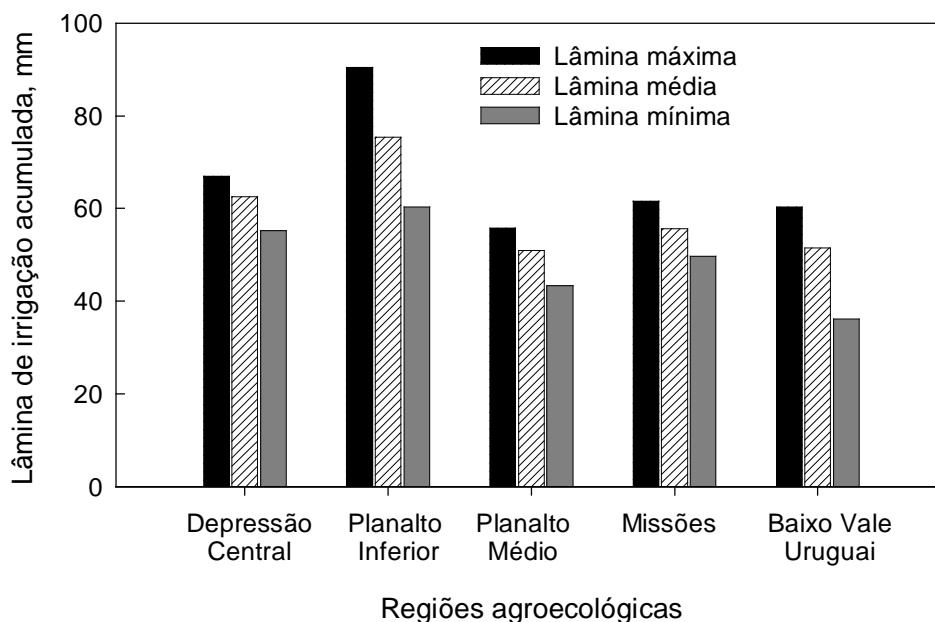


Figura 38. Lâmina máxima, média e mínima de irrigação necessária para a Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai, para diferentes épocas de semeadura do feijão safrinha. Santa Maria, RS, 2004.

6.3 - Custos de produção unitários de áreas não irrigadas

Na figura 39 é apresentado o custo unitário para produzir uma saca de milho, para áreas de 50 a 1600 hectares, considerando um preço médio de comercialização do produto de R\$ 20,00 (vinte reais). Observa-se que o custo unitário para produzir 100 sacas de milho, numa área de 50 hectares é 58% menor que o custo para produzir 33 sacas, considerando-se a mesma área plantada. À medida que aumenta a produtividade e a área plantada os custos unitários tendem ao equilíbrio. Assim como foi observado por Rosa (2000), a redução no custo unitário com o aumento da área cultivada foi menor que a redução no custo com o aumento no rendimento de grãos.

O custo unitário para o milho não irrigado, em áreas de 50 a 1600 ha e preço médio de R\$ 16,00 e 24,00 é apresentado nos Anexos I e II.

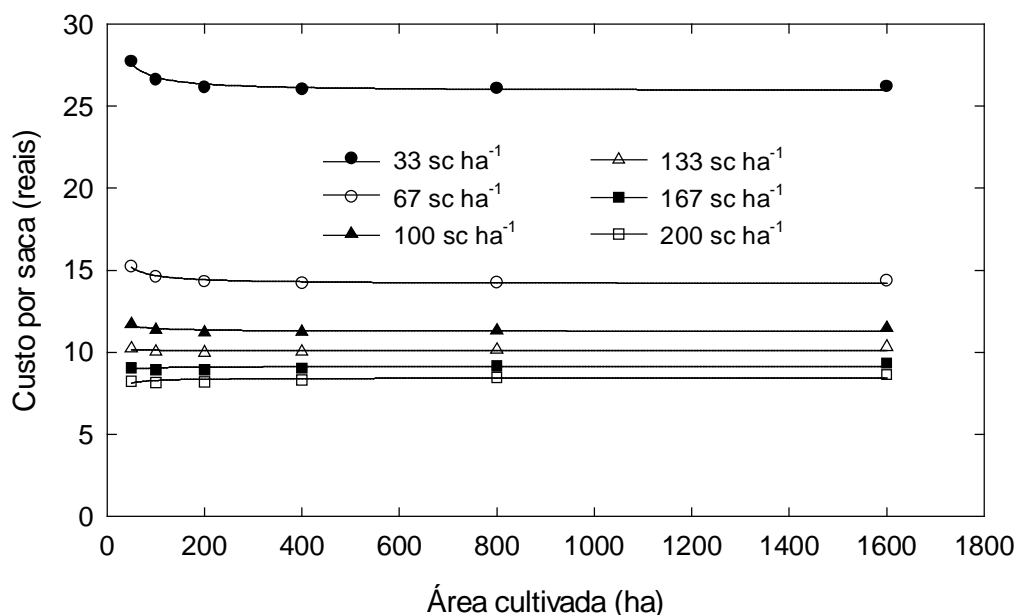


Figura 39. Custo operacional para produzir uma saca de milho em diferentes áreas e preço médio de comercialização de R\$ 20,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004.

O custo de produção unitário (saca) para a cultura do feijão, considerando um preço médio de comercialização R\$ 70,00 é

apresentado na figura 40. Seguindo a mesma tendência que o milho, o custo de produção unitário para rendimentos menores (9 e 17 sc ha⁻¹) é significativamente maior que os custos para rendimentos de grãos acima de 25 sc ha⁻¹. Por outro lado, o custo unitário entre as diferentes áreas varia minimamente, ocorrendo uma tendência de elevação desse custo para áreas maiores, possivelmente devido ao aumento no número de aplicações no controle fitossanitário, na realização dos tratos culturais e aumento na mão-de-obra necessária. O custo de produção unitário para áreas de 50 a 1600 ha e preço do produto de R\$ 50,00 e 90,00 é apresentado nos Anexos III e IV.

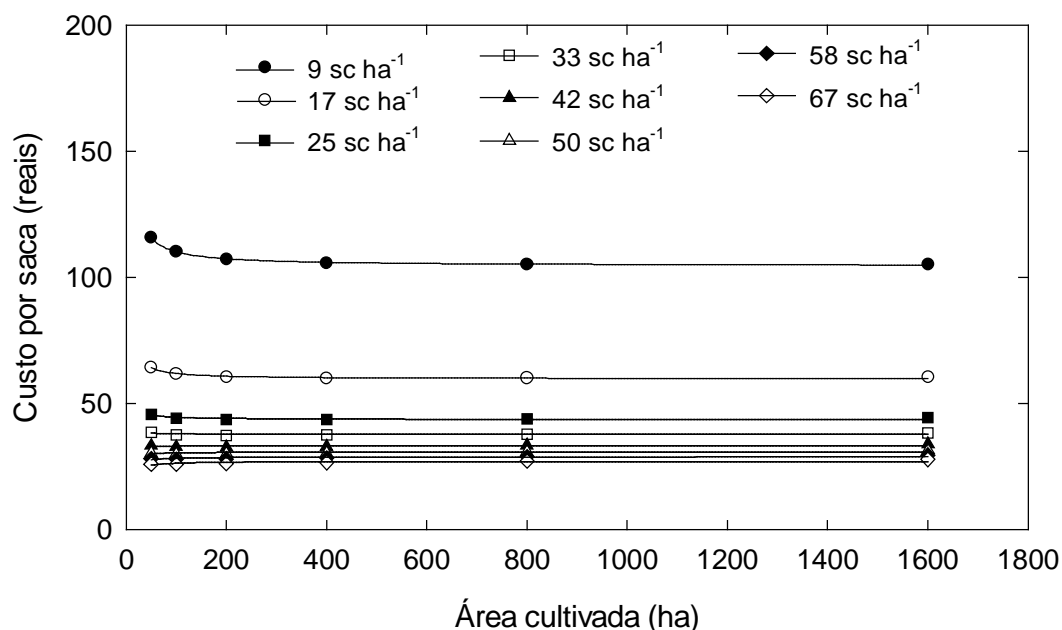


Figura 40. Custo operacional para produzir uma saca de feijão em diferentes áreas e preço médio de comercialização de R\$ 70,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linhas). Santa Maria, RS, 2004.

O custo unitário para diferentes rendimentos de grãos e áreas de 50 a 1600 hectares para a soja, considerando um preço de comercialização de R\$ 40,00 por saca é apresentado na figura 41 (e Anexos V e VI). Diferentemente do feijão e do milho, a redução no custo

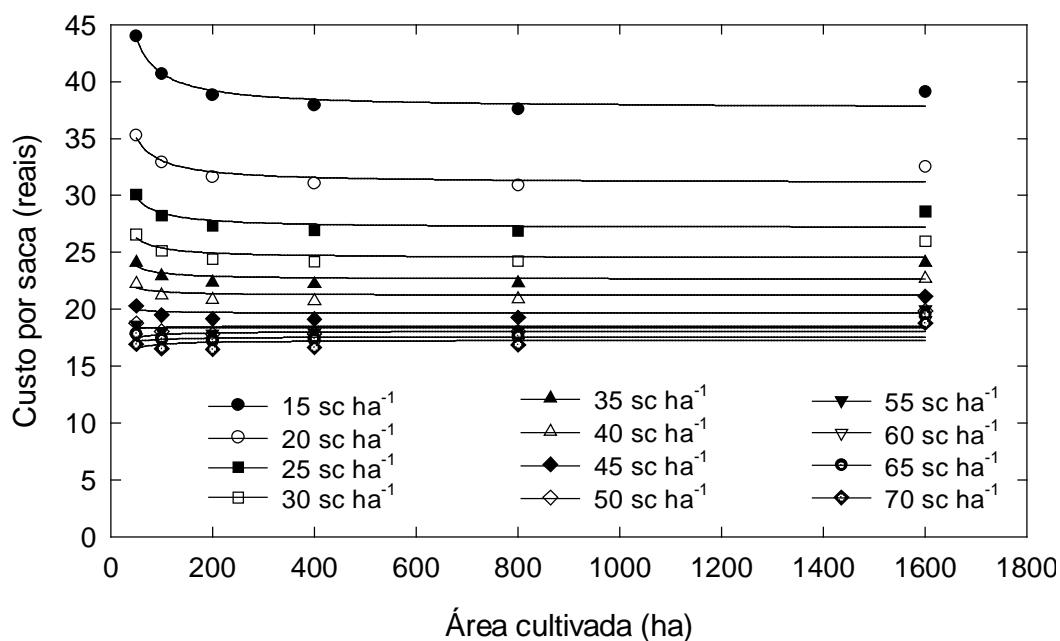


Figura 41. Custo operacional para produzir uma saca de soja em diferentes áreas e preço médio de comercialização de R\$ 40,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linhas). Santa Maria, RS, 2004.

unitário (sacas) com o aumento no rendimento de grãos da soja foi de aproximadamente 10%, para rendimentos menores que 25 sc ha⁻¹. Para rendimentos acima de 25 sc ha⁻¹, o custo unitário varia minimamente, apresentando uma pequena elevação para áreas maiores (800 e 1600 hectares).

6.4 - Custos de produção de áreas irrigadas

Na tabela 10 são apresentados os custos de produção para a cultura do milho irrigado, considerando preço médio de comercialização do produto de R\$ 20,00. Observa-se que ocorre uma redução no custo de produção por hectare cultivado com o aumento da área irrigada de 20 para 640 hectares. Isso se deve, em grande parte, devido a redução nos custos relacionados à irrigação, onde ocorre uma redução nos custos para aplicação da lâmina com o aumento da área. Esses dados estão em

Tabela 10. Custos de produção do milho irrigado, considerando diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 20,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Área irrigada | Produtividade esperada (sc ha ⁻¹) | | | | |
|---------------|---|--------|--------|---------|---------|
| | 67 | 100 | 133 | 167 | 200 |
| 20 | *31,74 | 34,51 | 38,09 | 40,89 | 43,31 |
| 40 | 52,51 | 58,47 | 66,04 | 72,11 | 77,37 |
| 80 | 97,78 | 110,13 | 125,70 | 138,29 | 149,23 |
| 160 | 191,12 | 216,25 | 247,79 | 273,43 | 295,74 |
| 320 | 377,80 | 428,47 | 491,99 | 543,71 | 588,76 |
| 640 | 751,15 | 852,93 | 980,37 | 1084,27 | 1174,81 |

* (multiplicado por 1000).

concordância com os observados por Rosa (2000) para a região de Cruz Alta, que encontrou uma redução no custo de produção com o aumento da área irrigada e redução no custo por saca produzida com o aumento no rendimento de grãos.

Na tabela 11 são apresentados os custos de produção de áreas irrigadas para a cultura do feijão, considerando um preço médio de comercialização de R\$ 70,00. Os resultados demonstram que, para uma produtividade média de 42 sc ha⁻¹, houve uma redução de 9%, em média, no custo de produção unitário (por hectare), de 20 para 40 hectares, e de 3,7% de 40 para 80 hectares.

Tabela 11. Custos de produção do feijão irrigado, considerando diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 70,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Área irrigada | Produtividade esperada (sc ha ⁻¹) | | | | | |
|---------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 25 | 33 | 42 | 50 | 58 | 67 |
| 20 | *31,5 | 33,9 | 36,1 | 38,2 | 40,2 | 42,1 |
| 40 | 55,2 | 60,5 | 65,7 | 70,6 | 74,9 | 79,6 |
| 80 | 104,8 | 115,9 | 126,9 | 137,2 | 146,7 | 156,6 |
| 160 | 206,1 | 229,0 | 251,7 | 272,9 | 292,3 | 312,9 |
| 320 | 408,7 | 455,2 | 501,2 | 544,2 | 583,7 | 625,6 |
| 640 | 813,9 | 907,5 | 1000,1 | 1086,8 | 1166,4 | 1250,9 |

* (multiplicado por 1000).

Os custos de produção para a soja irrigada são apresentados na tabela 12. A redução no custo por hectare da soja é mais significativo que das outras culturas, uma vez que o nível de tecnologia utilizado para o cultivo da soja é menor que o do milho e feijão. Além disso, na soja não se utiliza adubação de cobertura (uréia), a qual é responsável por grande cerca de 12% dos custos de produção de lavouras de aproximadamente 6% dos custos de produção do feijão.

Tabela 12. Custos de produção da soja irrigada, considerando diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 40,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Área irrigada | Produtividade esperada (sc ha ⁻¹) | | | | | |
|---------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 25 | 33 | 42 | 50 | 58 | 67 |
| 20 | *27,73 | 28,08 | 29,69 | 30,03 | 32,07 | 32,41 |
| 40 | 46,71 | 47,64 | 51,11 | 52,04 | 56,35 | 57,28 |
| 80 | 87,71 | 89,81 | 96,99 | 99,09 | 107,96 | 110,06 |
| 160 | 172,28 | 176,72 | 191,32 | 195,76 | 213,74 | 218,18 |
| 320 | 341,41 | 350,54 | 379,98 | 389,10 | 425,31 | 434,43 |
| 640 | 679,68 | 698,18 | 757,29 | 775,78 | 848,44 | 866,93 |

- (multiplicado por 1000).

6.5 - Receita líquida de áreas irrigadas

Na figura 42 é apresentada a receita líquida para áreas irrigadas, considerando rendimentos de grãos de 100, 133, 167 e 200 sacas de milho por hectare e preço do produto de R\$ 16,00, 20,00 e 24,00. Exemplificando: para uma produtividade de 100 sc ha⁻¹ e preço de R\$ 16,00, calculou-se a área mínima a ser irrigada para compensar a frustração de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%, nos rendimentos de grãos de 33, 67, 100, 133, 167 e 200 sc ha⁻¹, em áreas não irrigadas de 50 a 1600 hectares.

A receita líquida para áreas irrigadas de 20, 40, 80, 160, 320 e 640 ha de soja e rendimentos de grãos entre 45 e 70 sc ha⁻¹ é apresentada na figura 43. O preço de comercialização considerado para a soja foi de R\$ 30,00, 40,00 e 50,00.

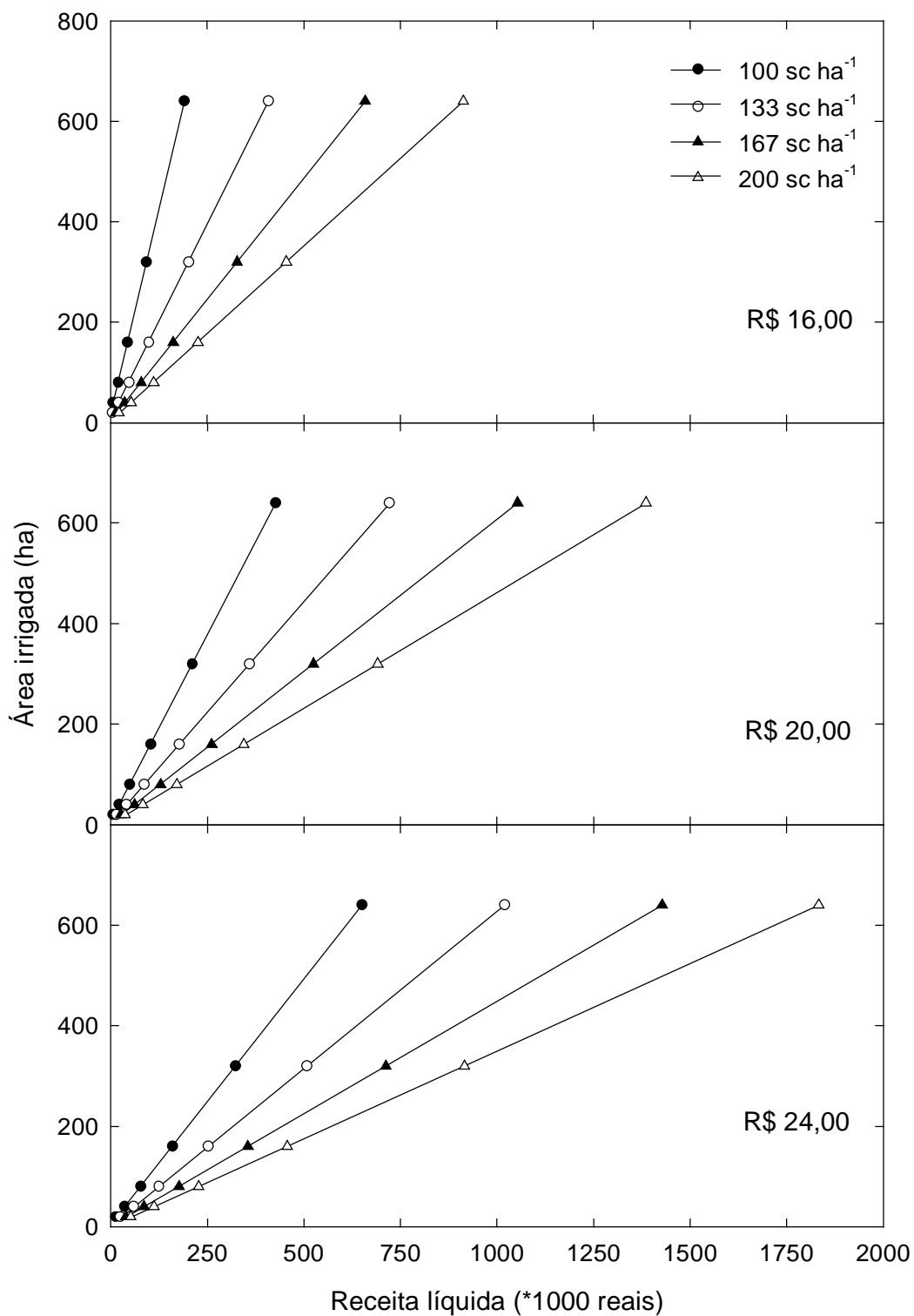


Figura 42. Receita líquida (R\$ ha⁻¹) versus área cultivada irrigada para rendimentos de grãos de 100, 133, 167 e 200 sc ha⁻¹ de milho e três preços de comercialização do produto. Santa Maria, RS, 2004.

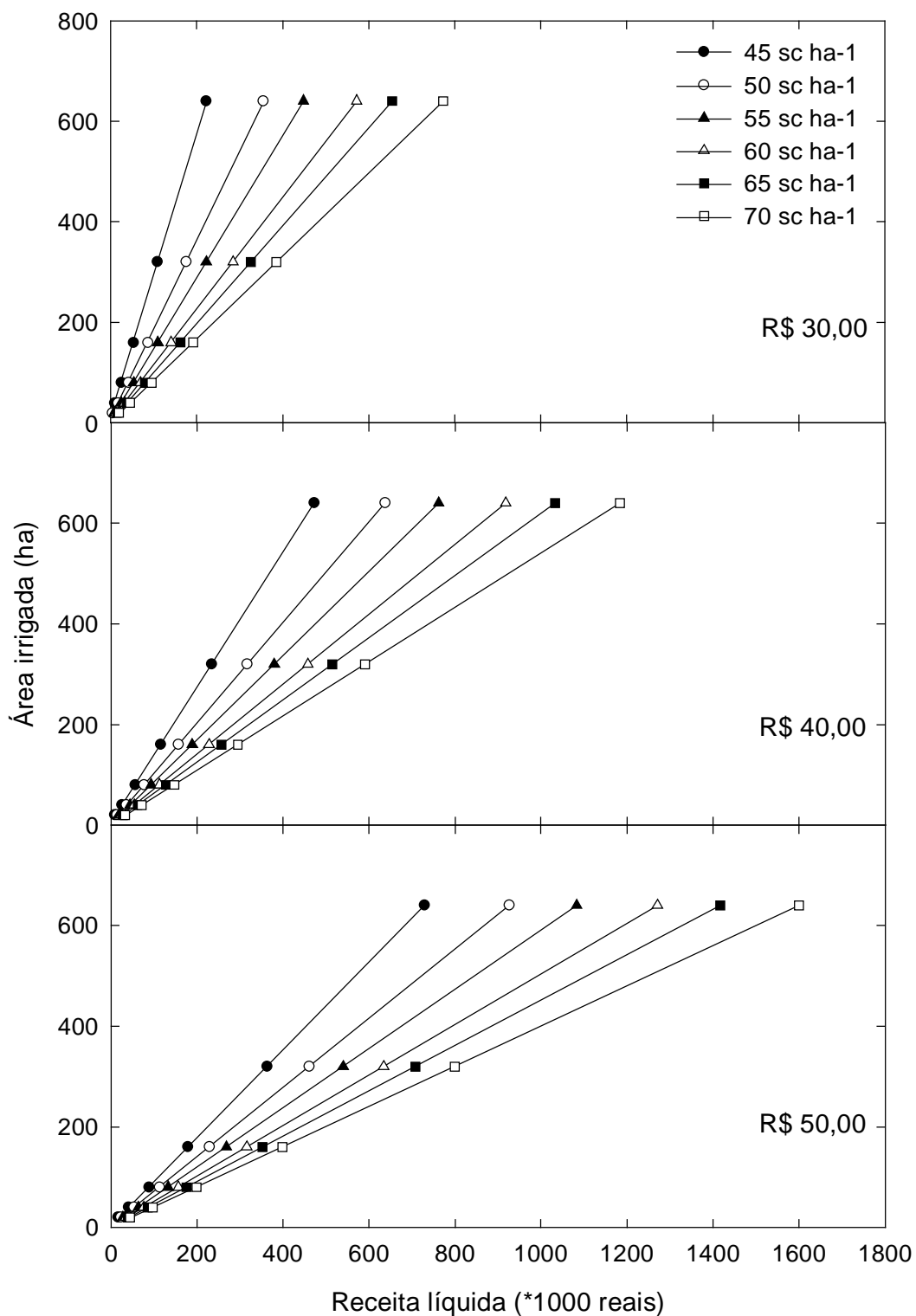


Figura 43. Receita líquida (R\$ ha⁻¹) versus área cultivada irrigada para rendimentos de grãos de 45, 50, 55, 60, 65 e 70 sc ha⁻¹ de soja e três preços de comercialização do produto. Santa Maria, RS, 2004.

Na figura 44 é apresentada a receita líquida para áreas irrigadas de 20, 40, 80, 160 e 320 ha de feijão e rendimentos de grãos de 25, 33, 42, 50, 58 e 67 sc ha⁻¹, para preços de comercialização de R\$ 50,00, 70,00 e 90,00. Observa-se que, para as três culturas avaliadas, a receita líquida aumentou linearmente com o aumento na expectativa de rendimento de grãos e preço do produto.

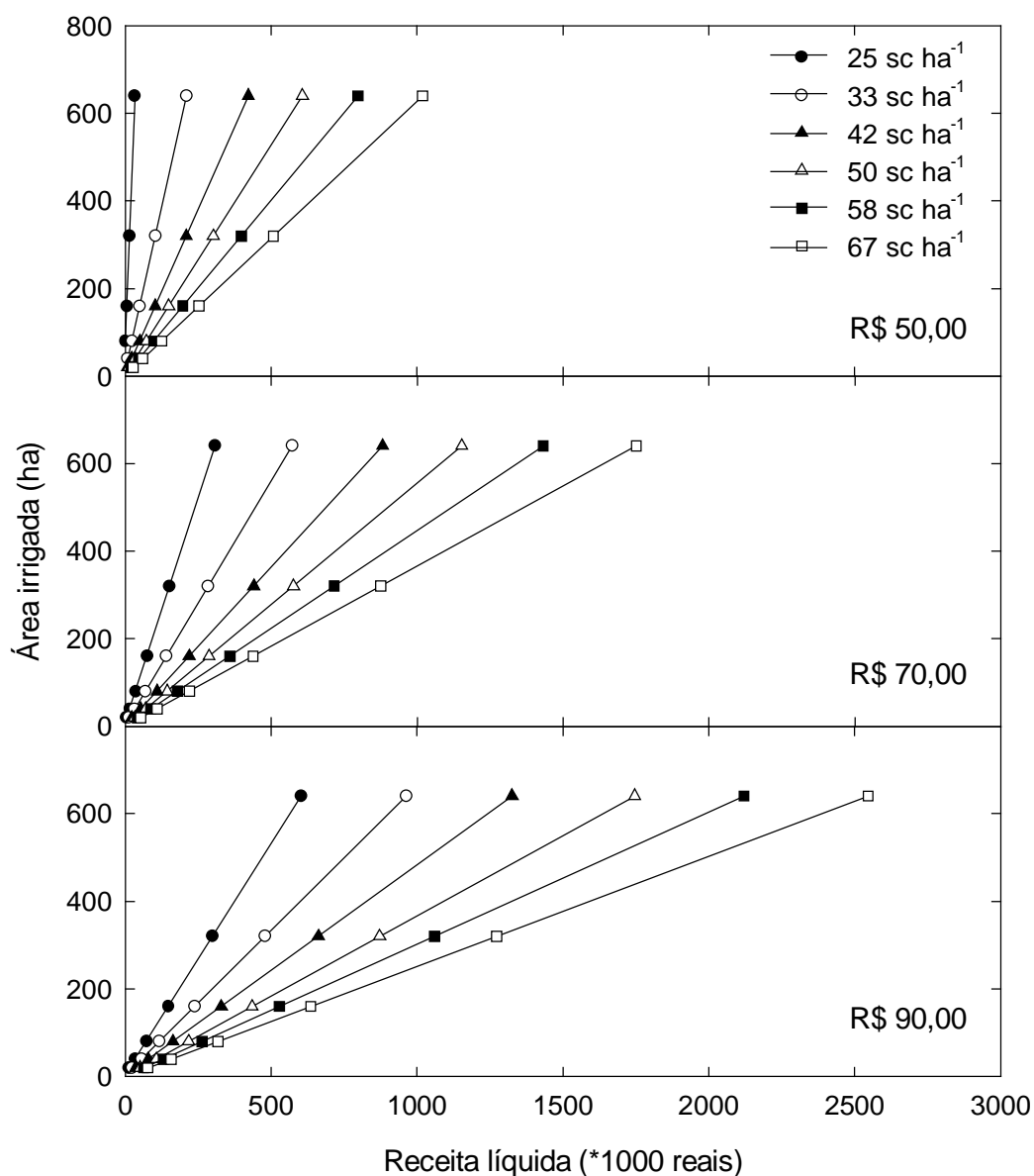


Figura 44. Receita líquida (R\$ ha⁻¹) versus área cultivada irrigada para rendimentos de grãos de 25, 33, 42, 50, 58 e 67 sc ha⁻¹ de feijão e três preços de comercialização do produto. Santa Maria, RS, 2004.

6.6 - Receita líquida de áreas não irrigadas

Na tabela 13 é apresentada a receita líquida para uma área de 100 hectares de milho, considerando rendimentos de grãos de 33 a 200 sc ha⁻¹ e níveis de frustração de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%. Observa-se que a produtividade de 33 sc ha⁻¹ não cobre os custos de mesmo na ausência de frustração de safra. Neste trabalho, a produtividade de 33 sc de milho por hectare foi insuficiente para pagar os custos de produção, considerando preços de R\$ 16,00, 20,00 e 24,00. Os resultados demonstram ainda que, para um rendimento esperado de 67 sc ha⁻¹, somente frustrações de safra da ordem de 30% resultam em receitas negativas.

Tabela 13. Receita líquida de 100 hectares de milho, para diferentes rendimentos de grãos (sc ha⁻¹) e preço médio de comercialização do produto de R\$ 20,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Rendimento de grãos | Níveis de frustração (%) | | | | |
|---------------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 33 | -22,34 | -35,54 | -48,74 | -61,94 | -75,14 |
| 67 | 35,67 | 8,87 | -17,93 | -44,73 | -71,53 |
| 100 | 85,47 | 45,47 | 5,47 | -34,53 | -74,53 |
| 133 | 130,81 | 77,61 | 24,41 | -28,79 | -81,99 |
| 167 | 182,71 | 115,91 | 49,11 | -17,69 | -84,49 |
| 200 | 234,26 | 154,26 | 74,26 | -5,74 | -85,74 |

* (multiplicado por 1000).

A receita líquida para áreas de 400 e 1600 hectares e preços de comercialização do produto de R\$ 16,00 e R\$ 24,00, respectivamente, são apresentados nos Anexos VII e VIII.

Considerando que existe uma probabilidade anual de ocorrência de deficiência hídrica no solo durante o ciclo de desenvolvimento das principais culturas de primavera-verão de aproximadamente 20% (Berlato, 1992 e Ávila et al., 1996), principalmente nos meses de dezembro à fevereiro, os riscos de futuros retornos ao investimento são elevados. A

magnitude desses riscos está em função do nível tecnológico adotado e da expectativa de preço de comercialização do produto.

A receita líquida para uma área de 100 hectares de feijão é apresentada na tabela 14. Produções menores que 17 sc ha⁻¹ são insuficientes para pagar os custos de produção, considerando preços de comercialização do feijão de R\$ 50,00, 70,00 e 90,00.

Tabela 14. Receita líquida de 100 hectares de feijão, para diferentes rendimentos de grãos (kg ha⁻¹) e preço médio de comercialização do produto de R\$ 70,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Rendimento de grãos | Níveis de frustração (%) | | | | |
|------------------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 9 | -36,14 | -48,74 | -61,34 | -73,94 | -86,54 |
| 17 | 13,73 | -10,07 | -33,87 | -57,67 | -81,47 |
| 25 | 63,51 | 28,51 | -6,49 | -41,49 | -76,49 |
| 33 | 105,48 | 59,28 | 13,08 | -33,12 | -79,32 |
| 42 | 154,68 | 95,88 | 37,08 | -21,72 | -80,52 |
| 50 | 197,73 | 127,73 | 57,73 | -12,27 | -82,27 |
| 58 | 241,87 | 160,67 | 79,47 | -1,73 | -82,93 |
| 67 | 292,34 | 198,54 | 104,74 | 10,94 | -82,86 |

- (multiplicado por 1000).

Na comparação com o milho, o feijão é mais sensível ao déficit hídrico, principalmente devido ao seu sistema radicular pouco profundo (Guimarães et al., 1996) e ao ciclo curto. Entretanto, os níveis de frustração de safras são mais facilmente contornados devido ao maior preço do produto.

A receita líquida para áreas de 200 e 800 ha e preços médios de comercialização do produto de R\$ 50,00 e 90,00, respectivamente, são apresentados nos Anexos IX e X.

A receita líquida para 100 hectares de soja é apresentada na tabela 15. Observa-se que a receita com a cultura da soja é maior em relação ao milho e feijão, principalmente em função do menor custo de produção e

Tabela 15. Receita líquida de 100 hectares de soja, para diferentes rendimentos de grãos (kg ha^{-1}) e preço médio de comercialização do produto de R\$ 40,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Rendimento de grãos | Níveis de frustração (%) | | | | |
|---------------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 15 | 0,90 | -11,10 | -23,10 | -35,10 | -47,10 |
| 20 | 16,56 | 0,56 | -15,44 | -31,44 | -47,44 |
| 25 | 32,21 | 12,21 | -7,79 | -27,79 | -47,79 |
| 30 | 47,87 | 23,87 | -0,13 | -24,13 | -48,13 |
| 35 | 63,53 | 35,53 | 7,53 | -20,47 | -48,47 |
| 40 | 79,18 | 47,18 | 15,18 | -16,82 | -48,82 |
| 45 | 96,95 | 60,95 | 24,95 | -11,05 | -47,05 |
| 50 | 114,73 | 74,73 | 34,73 | -5,27 | -45,27 |
| 55 | 126,15 | 82,15 | 38,15 | -5,85 | -49,85 |
| 60 | 143,92 | 95,92 | 47,92 | -0,08 | -48,08 |
| 65 | 153,23 | 101,23 | 49,23 | -2,77 | -54,77 |
| 70 | 171,00 | 115,00 | 59,00 | 3,00 | -53,00 |

* (multiplicado por 1000).

do preço atual da soja no mercado. Somente frustrações significativas de safra e rendimentos de grãos menores resultam em receita líquida negativa. A receita líquida para áreas de 50 e 200 ha e preços médios de comercialização do produto de R\$ 30,00 e 50,00, respectivamente, são apresentados nos Anexos XI e XII.

A irrigação na cultura da soja justifica-se tecnicamente (Franke & Dorfman, 2000), principalmente para as regiões do Planalto Médio e Missões; entretanto, há discordância por parte dos pesquisadores quanto à viabilidade econômica dessa prática (Rosa, 2000). Maehler et al. (2003), no entanto, verificaram uma redução de 34% no rendimento de grãos de soja não irrigada em relação ao tratamento irrigado, para uma deficiência hídrica de 85 mm, no estágio de formação de legumes e enchimento de grãos, atribuindo essa redução a limitação no suprimento de fotoassimilados, provocada pelo déficit hídrico.

Comparando-se os resultados de deficiência hídrica na soja verificados neste trabalho e os resultados apresentados pelos autores acima citados, pode-se inferir que frequência de ocorrência de

deficiências hídricas no solo de 85 mm é quase anual, pelo menos em uma data de semeadura, em todas as regiões estudadas e média de 13 anos de dados meteorológicos. Assim, a suplementação de água à cultura através das irrigações, além de evitar perdas no rendimento de grãos devido à deficiência hídrica, pode ser um recurso técnico fundamental para aumentar a produtividade da soja no Estado.

6.7 - Área irrigada necessária para cobrir os custos de produção de áreas não irrigadas

6.6.1 - Milho

Na figura 45 são apresentadas as áreas irrigadas necessárias para compensar frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%, para um rendimento de grãos de 67 sc ha⁻¹ não irrigados, considerando uma produtividade de 100 sc ha⁻¹ em áreas irrigadas. Os resultados demonstram que, para uma frustração de safra de 20% e preço de comercialização do milho a R\$ 16,00, a área irrigada necessária para estabelecer o equilíbrio entre receita e custo é de 3,74, 13,26, 32,30, 70,38, 146,53 e 298,85 hectares, considerando áreas não irrigadas de 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 hectares, respectivamente. Esses valores correspondem a 7,48, 13,26, 16,15, 17,59, 18,32 e 18,68% respectivamente, da área não irrigada. Isso significa que, se em 50 hectares de milho ocorrer uma frustração de 20% e a expectativa de rendimento era de 67 sc ha⁻¹, seria necessário irrigar 3,74 ha (7,48% da área) para equilibrar os custos de produção.

Aumentando-se o preço do milho de R\$ 16,00 para 20,00, somente frustrações de safra de 40% ou superiores, implicariam na necessidade de irrigação para compensar o custo de implantação da lavoura e, mesmo assim, para áreas de 1600 hectares. Para preços do milho de R\$ 24,00, somente frustrações de safra acima de 60% necessitariam de irrigação numa parte da área total plantada ou rendimentos de grãos mais elevados para compensar (equilibrar) os custos de produção.

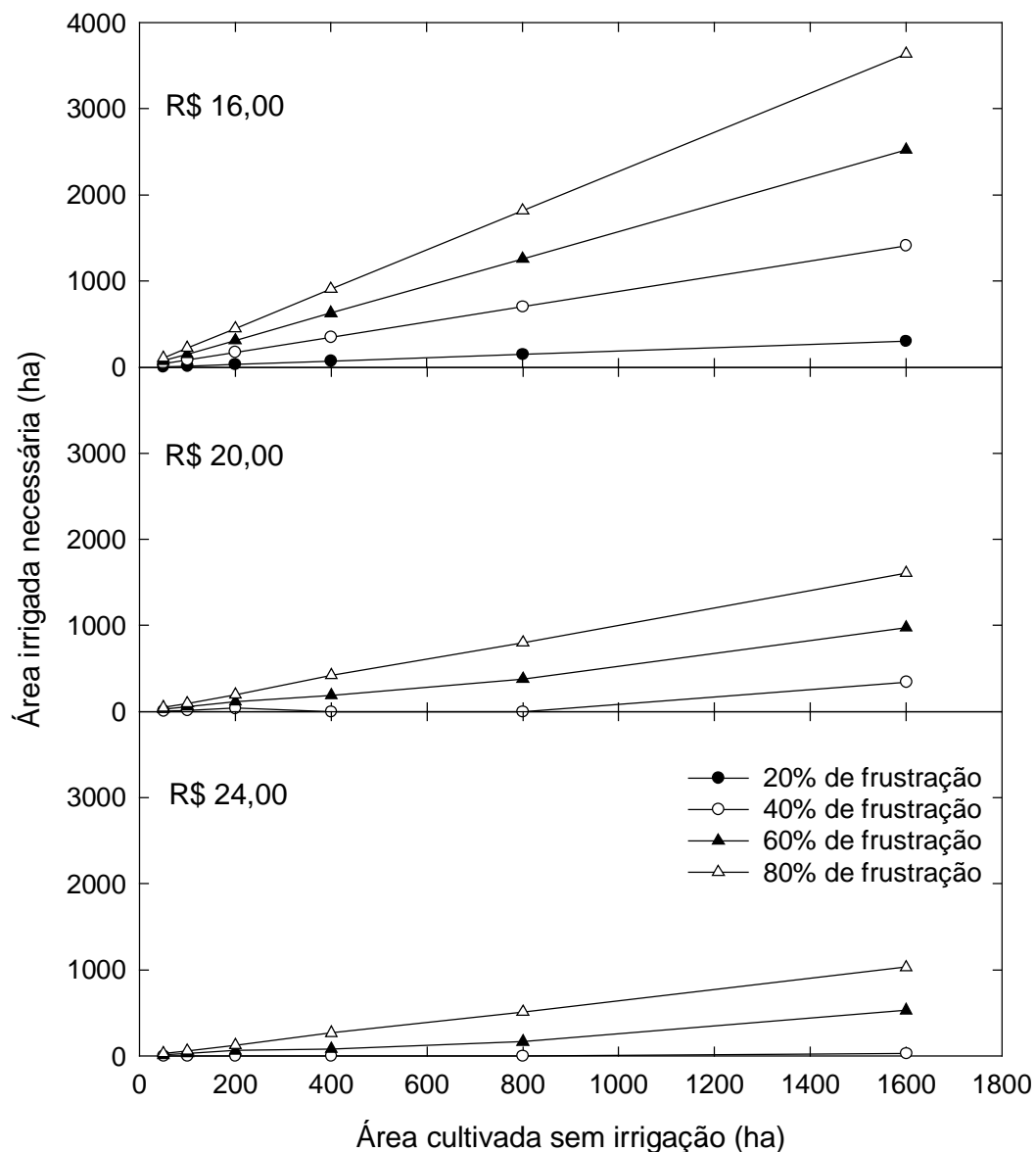


Figura 45. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 100 sc ha⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 67 sc ha⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

Nas figuras 46 e 47 são apresentadas as áreas irrigadas necessárias para frustrações de 0, 20, 40, 60 e 80% e um rendimento de grãos de 67 sc ha⁻¹, considerando produtividades de 133 e 167 sc ha⁻¹ em áreas irrigadas. O aumento no rendimento de grãos de 100 sc ha⁻¹ (Figura 45) para 133 sc ha⁻¹ (Figura 46) em áreas irrigadas e preço de

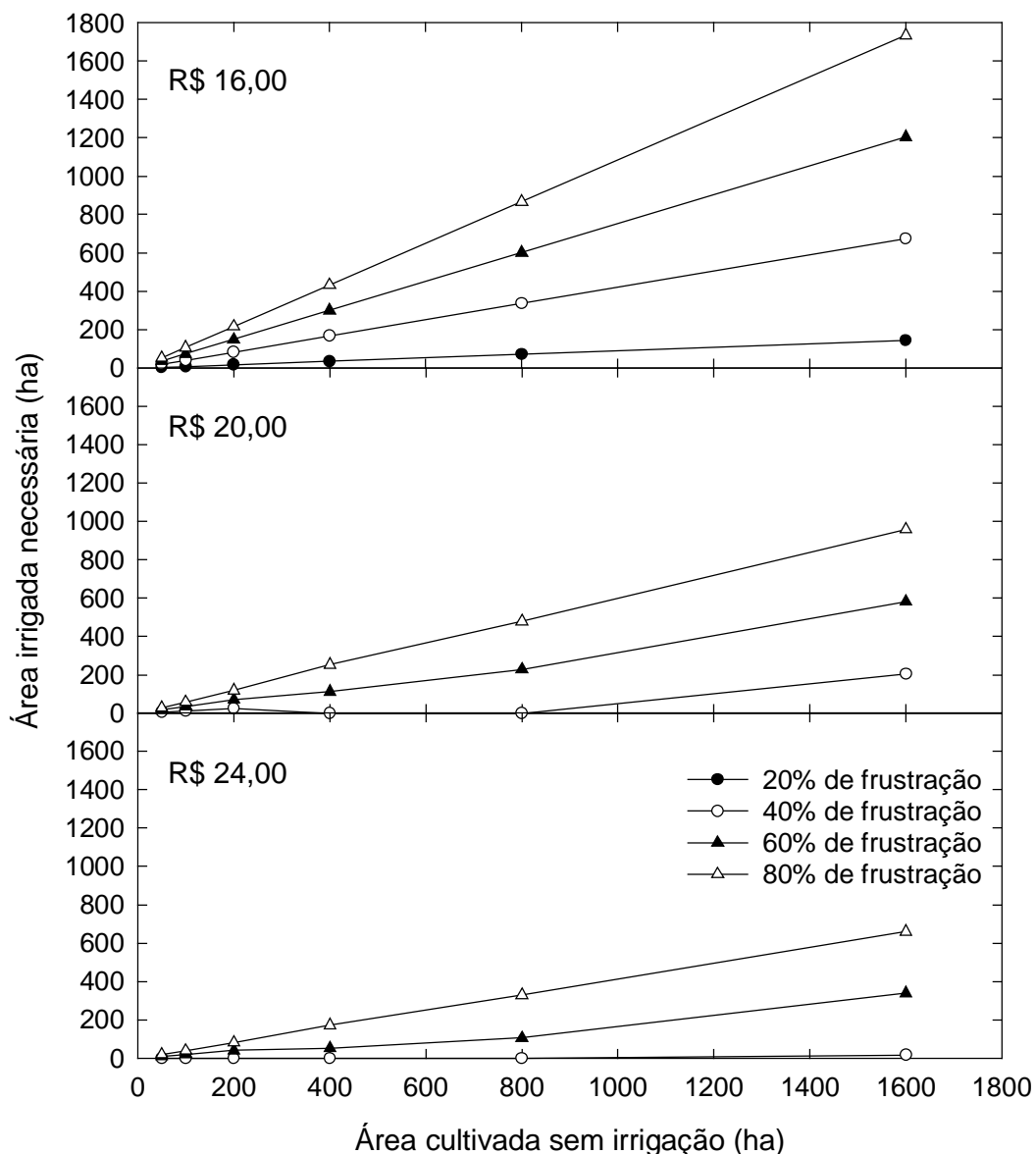


Figura 46. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 133 sc ha^{-1}) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 67 sc ha^{-1} de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

comercialização de R\$ 16,00, resulta numa diminuição na área irrigada necessária de 56, 99, 102, 106, 108 e 109%, para áreas irrigadas de 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 hectares, respectivamente.

Aumentando-se o rendimento de grãos para 167 sc ha^{-1} , a redução na área irrigada necessária é ainda mais significativa (figura 47),

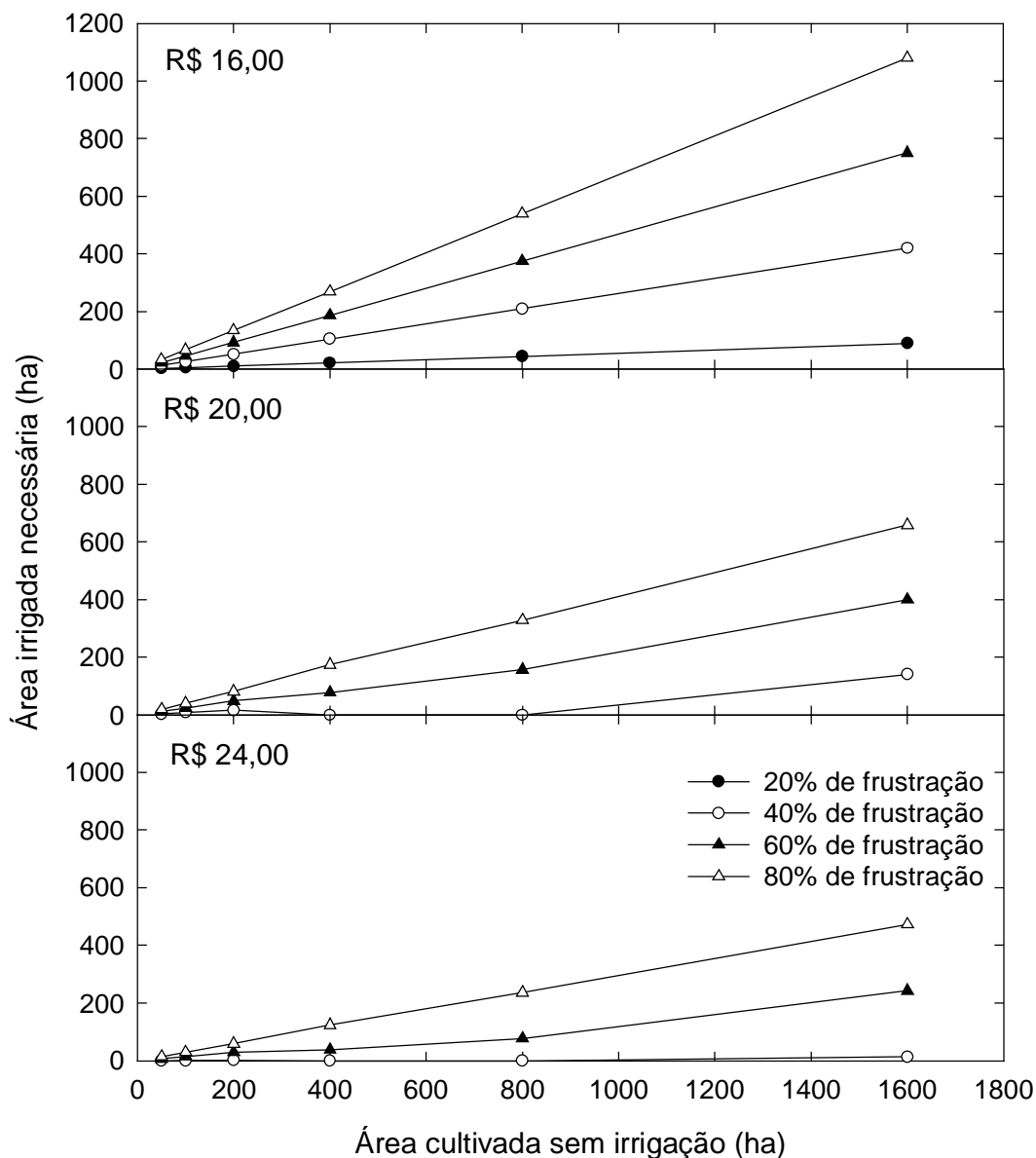


Figura 47. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 167 sc ha^{-1}) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 67 sc ha^{-1} de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

em relação àquela observada na figura 45. O mesmo comportamento é observado com a elevação do preço do produto de R\$ 16,00 para R\$ 24,00.

Nas figuras 48, 49 e 50 são apresentadas as áreas mínimas irrigadas necessárias para compensar frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80% para rendimento de grãos de 100 sc ha^{-1} em áreas não

irrigadas. O rendimento de grãos das áreas irrigadas é de 100, 133 e 167 sc ha⁻¹. Os resultados demonstram que, para expectativas de rendimentos de grãos de 100 sc ha⁻¹ em área não irrigadas, somente frustrações de safra maiores que 60% necessitariam de áreas irrigadas com rendimentos de grãos de 100, 133 e 167 sc ha⁻¹ para compensar os custos de produção.

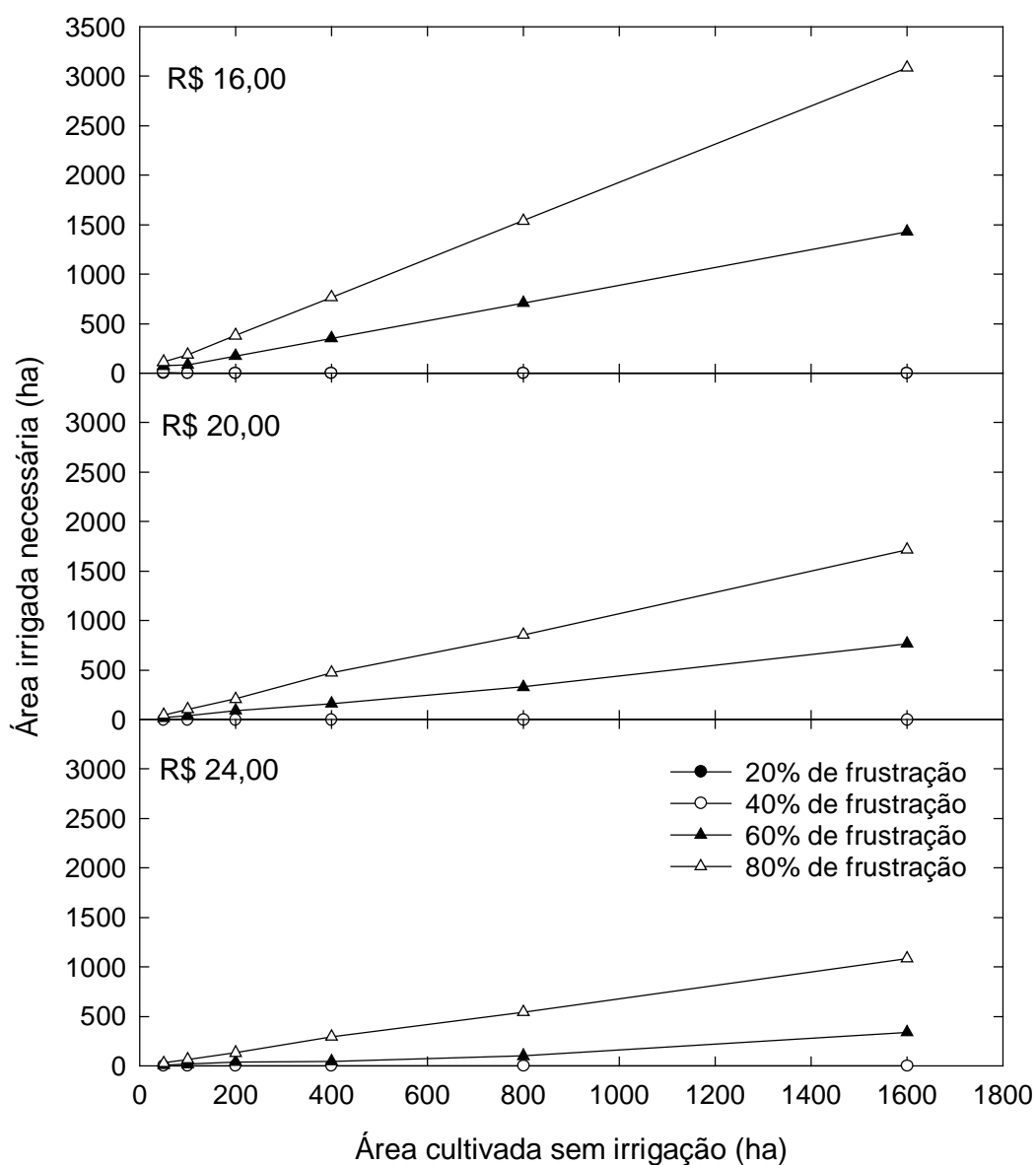


Figura 48. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 100 sc ha⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 100 sc ha⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

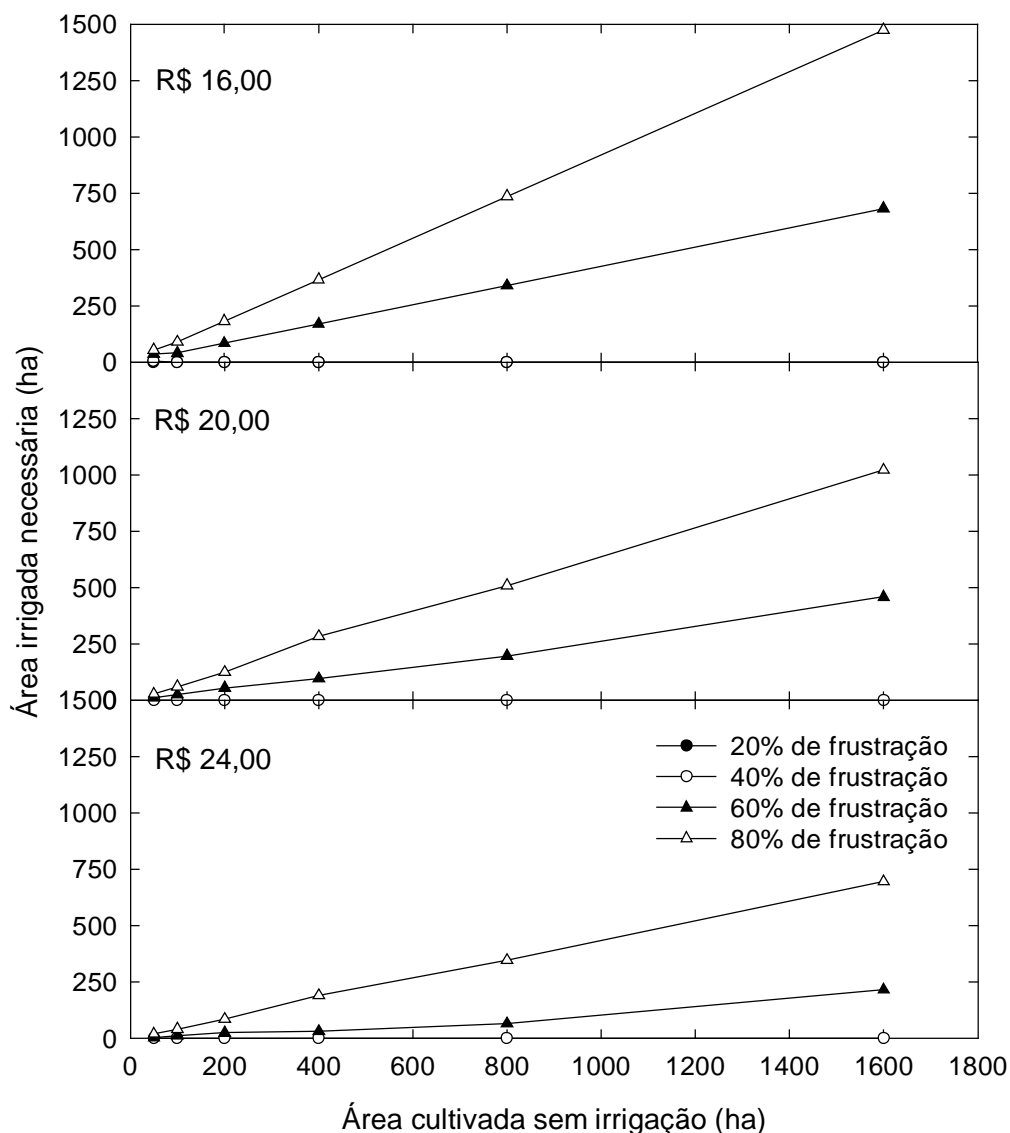


Figura 49. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 133 sc ha⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 100 sc ha⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

Para áreas cultivadas sem irrigação de 50 hectares e preço de comercialização do milho a R\$ 16,00, com uma frustração de safra de 40% sobre o rendimento esperado de 100 sc ha⁻¹, as áreas irrigadas necessárias foram de 8,87 (Figura 47), 4,86 (Figura 48) e 3,43 (Figura 49) ha, considerando rendimentos de grãos de 100, 133 e 167 sc ha⁻¹ em áreas irrigadas, respectivamente. Esses valores correspondem a 17,74, 9,72 e 6,86% da área não irrigada de 50 hectares, respectivamente.

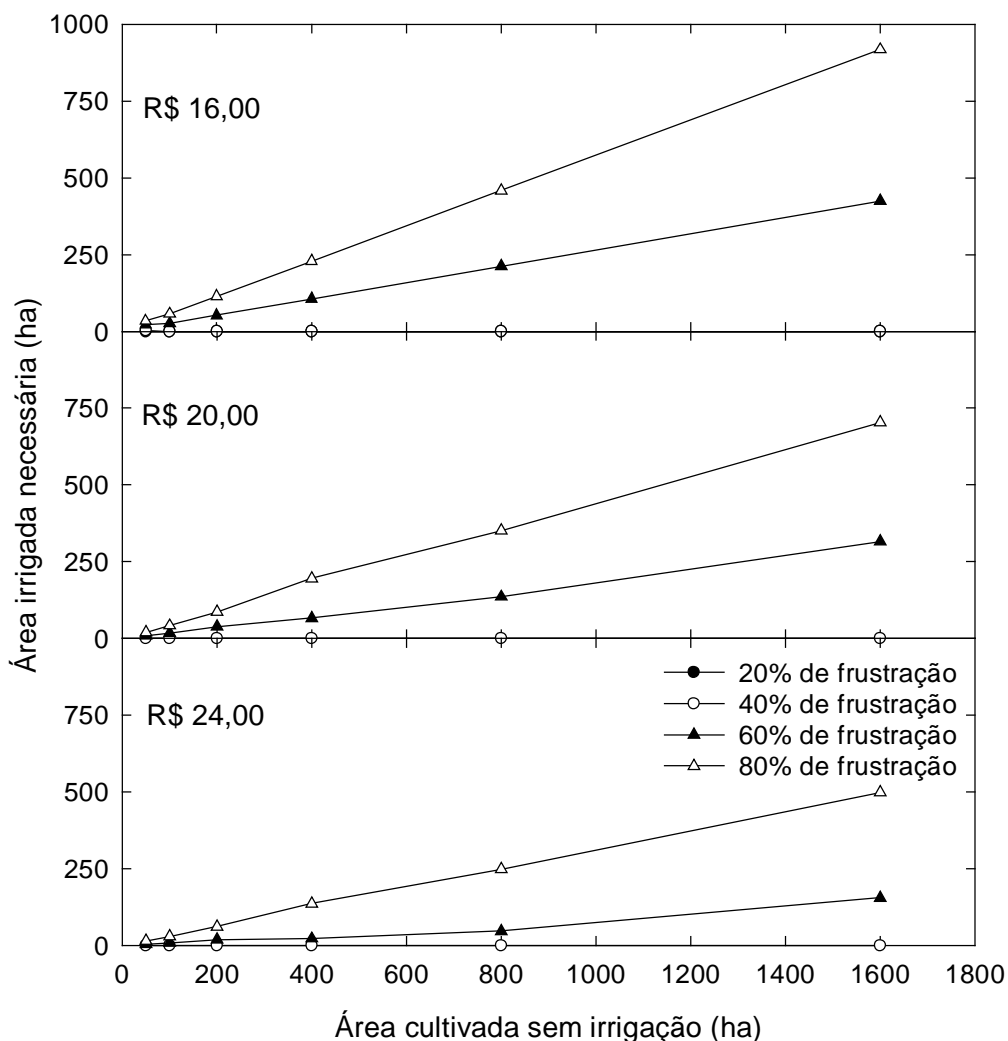


Figura 50. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 167 sc ha^{-1}) para compensar a frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 100 sc ha^{-1} de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

Pelos resultados apresentados nas figuras 48, 49 e 50 observa-se que, para frustrações de safra de 60 e 80% e rendimentos de grãos de 100 sc ha^{-1} em áreas irrigadas (Figura 48), a necessidade de área irrigada para compensar os custos de produção foi superior a área total não irrigada. Isso significa que o rendimento de grãos inferiores a 100 sc ha^{-1} em áreas irrigadas é inviável, economicamente, levando em consideração o custo de produção, de aplicação da lâmina e depreciação do equipamento.

Nas figuras 51, 52 e 53 são apresentadas as áreas mínimas irrigadas necessárias para compensar frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%, considerando um rendimento de grãos de 133 sc ha⁻¹ de milho em áreas não irrigadas. O rendimento de grãos das áreas irrigadas é de 100, 133 e 167 sc ha⁻¹.

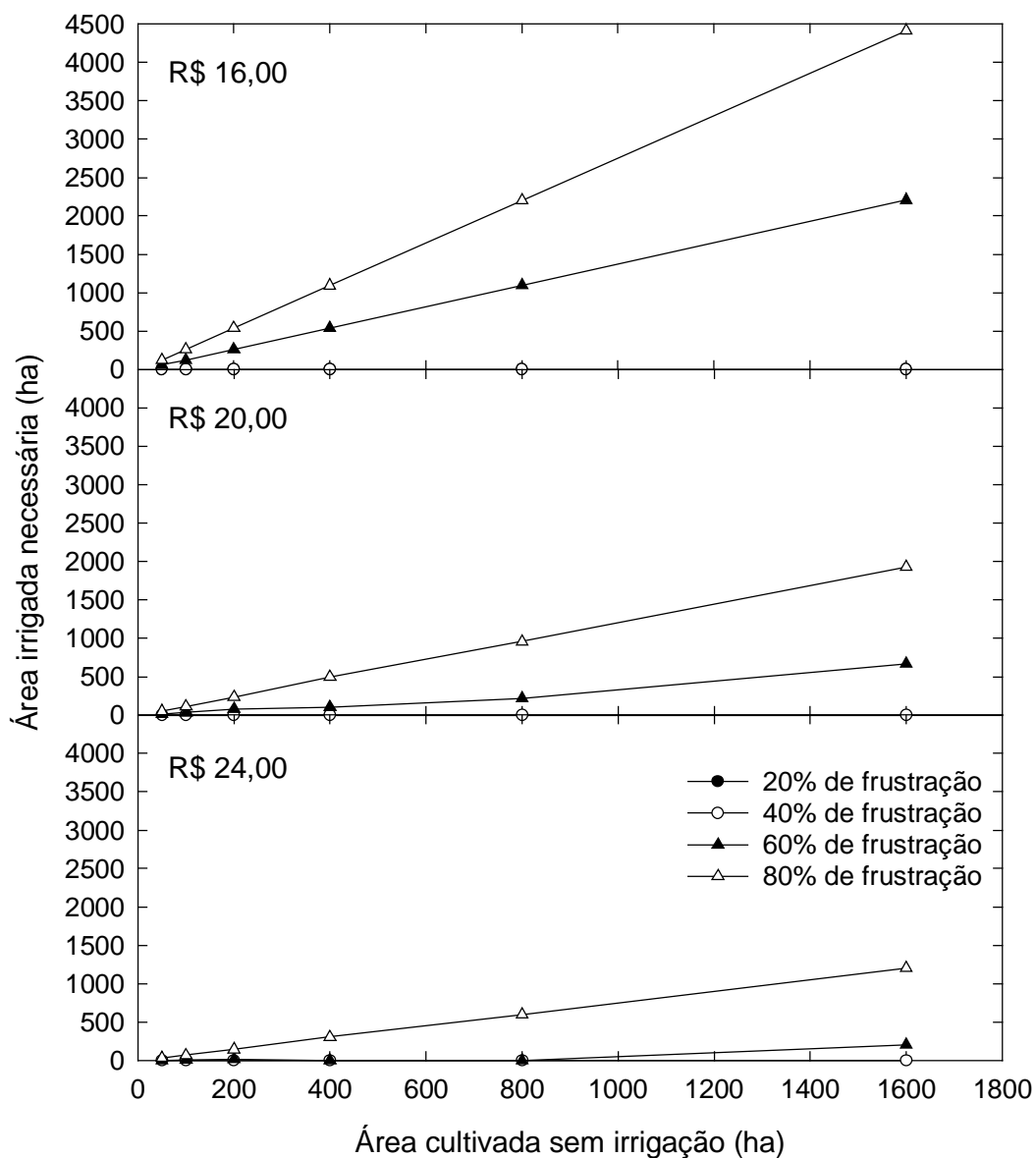


Figura 51. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 100 sc ha⁻¹) para compensar a frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 133 sc ha⁻¹ de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

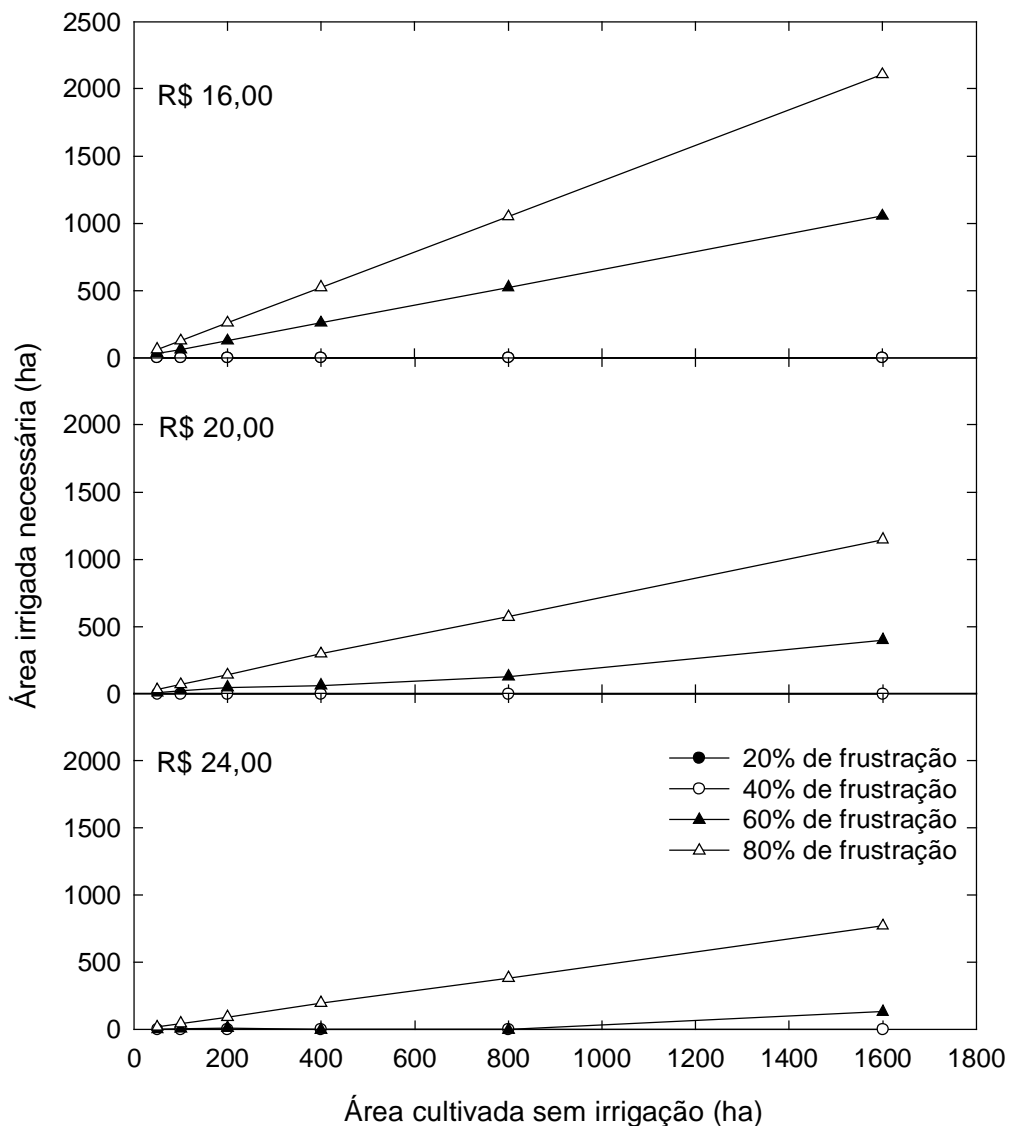


Figura 52. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 133 sc ha^{-1}) para compensar a frustração de safra com rendimento de 133 sc ha^{-1} de milho em áreas não irrigadas de 50 a ha. Santa Maria, RS, 2004.

Comparando-se a área irrigada necessária com o rendimento de grãos de 100 e 133 sc ha^{-1} em áreas não irrigadas, observa-se que a necessidade mínima de irrigação é maior para o rendimento de grãos de 133 sc ha^{-1} sem irrigação (figura 51). Isso se deve à elevação dos custos de produção para expectativas de rendimentos de grãos maiores que 100 sc ha^{-1} , principalmente àqueles relacionados a adubação de base e cobertura.

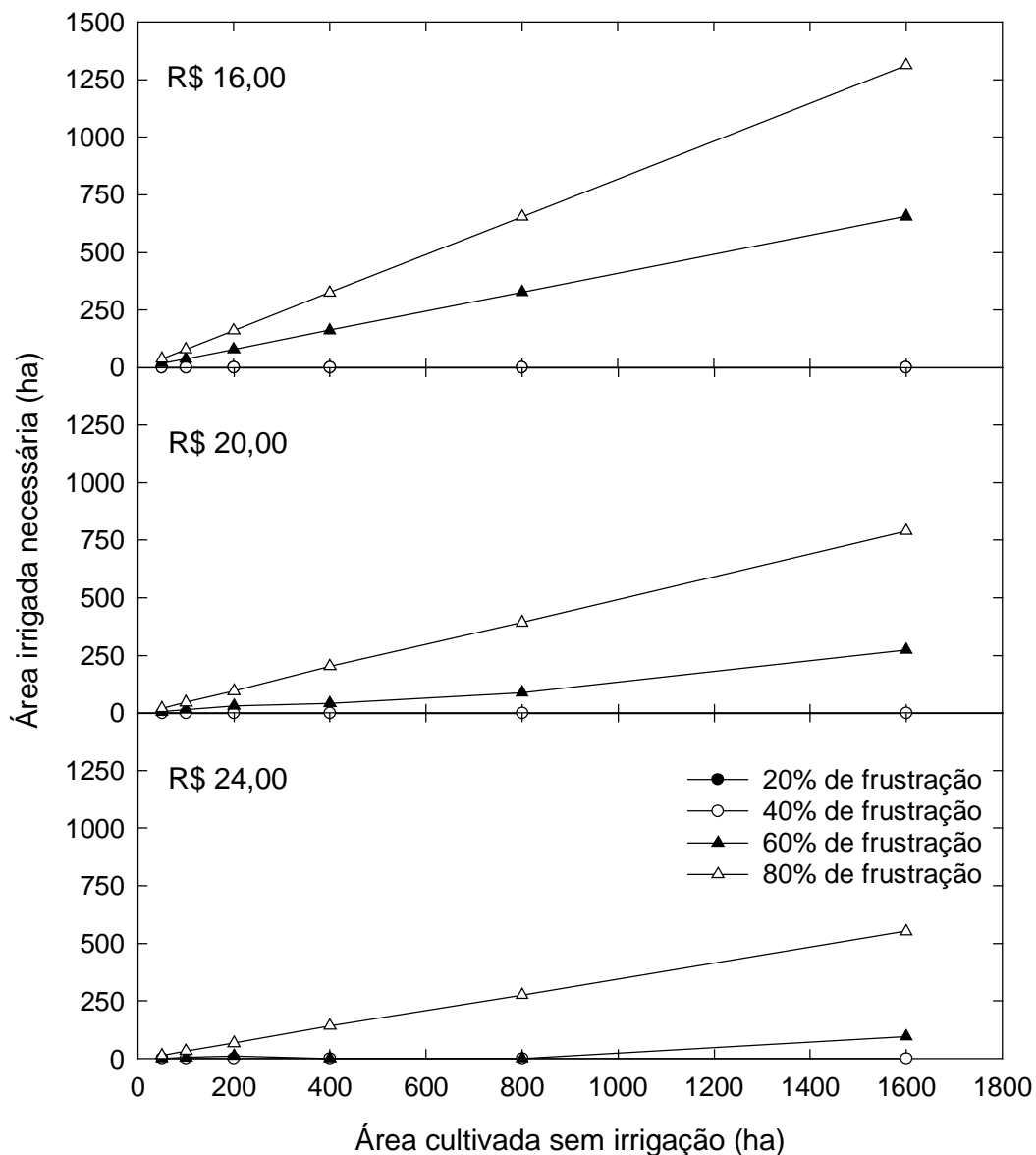


Figura 53. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 167 sc ha^{-1}) para compensar a frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 133 sc ha^{-1} de milho em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

A redução da área mínima irrigada necessária é mais significativa com o aumento do preço de comercialização do milho de R\$ 16,00 para R\$ 24,00 (91%), para um determinado rendimento de grãos em áreas irrigadas (Figura 53), do que o aumento do rendimento de grãos de 100 para 167 sacos, considerando o mesmo preço de comercialização do produto. Entretanto, o preço de comercialização está em função da oferta

do produto, onde o produtor tem pouca ou nenhuma influência. Isso significa que o produtor poderá decidir sobre o aumento de produtividade, mas não sobre o preço do produto.

6.6.2 - Feijão

Nas figuras 54 e 55 são apresentadas as áreas irrigadas necessárias para um rendimento de grãos de 17 sc ha⁻¹ em áreas não irrigadas e frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%. O rendimento de grãos considerado para as áreas irrigadas foi de 33 e 42 sc ha⁻¹. Para uma frustração de safra de 20% em áreas não irrigadas e um rendimento de grãos de 17 sc ha⁻¹, a área mínima irrigada necessária para cobrir os custos de produção foi de 41, 84, 170, 342, 682 e 1375 hectares (para uma produtividade esperada de 33 sc ha⁻¹ em área irrigada). Isso corresponde a mais de 80% das respectivas áreas não irrigadas. Para uma frustração de safra de 40% e um rendimento de 17 sc ha⁻¹ (42 sc ha⁻¹ em área irrigada), a área irrigada necessária foi de 34, 68, 137, 274, 550 e 1101 hectares, para áreas não irrigadas de 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 hectares, respectivamente, aproximadamente 68% da área total não irrigada.

O aumento no preço de comercialização do produto para R\$ 70,00 provocou uma redução de 210%, na média, na área irrigada necessária para equilibrar os custos de produção da lavoura de feijão (Figura 55).

A área irrigada necessária para um rendimento de grãos de 17 sc ha⁻¹ em áreas não irrigadas, considerando uma expectativa de rendimento de 50 sc ha⁻¹ em áreas irrigadas é apresentada na figura 56. Para uma área de 100 ha e frustração de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%, a área irrigada necessária foi de 13, 30, 48, 66 e 83%, respectivamente. Aumentando-se a área não irrigada para 200, 400, 800 e 1600 ha, a área irrigada necessária aumenta em 100, 303, 706 e 1513%, em relação a área de 100 ha, independente do nível de frustração de safra considerado.

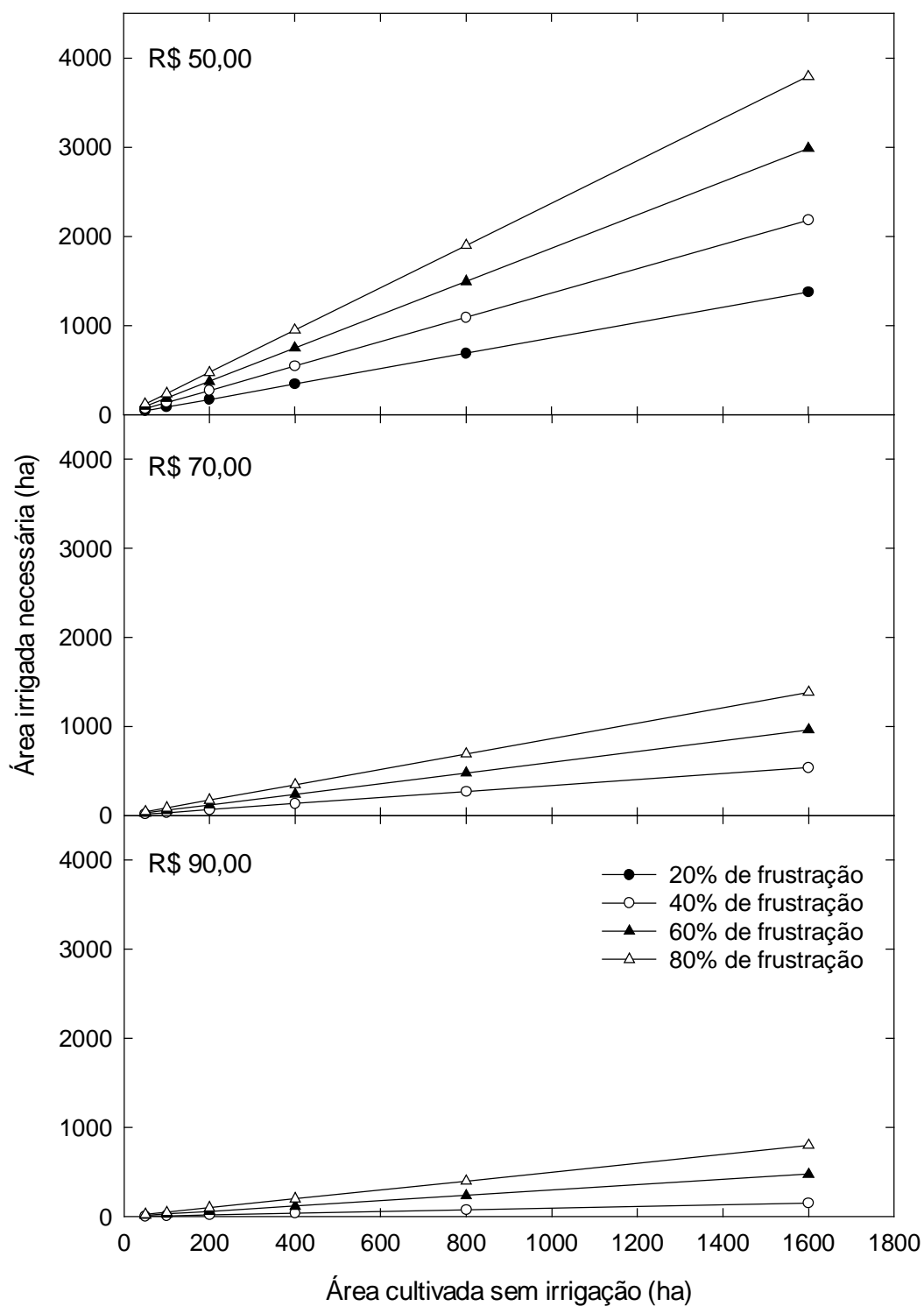


Figura 54. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 33 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 17 sc ha⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

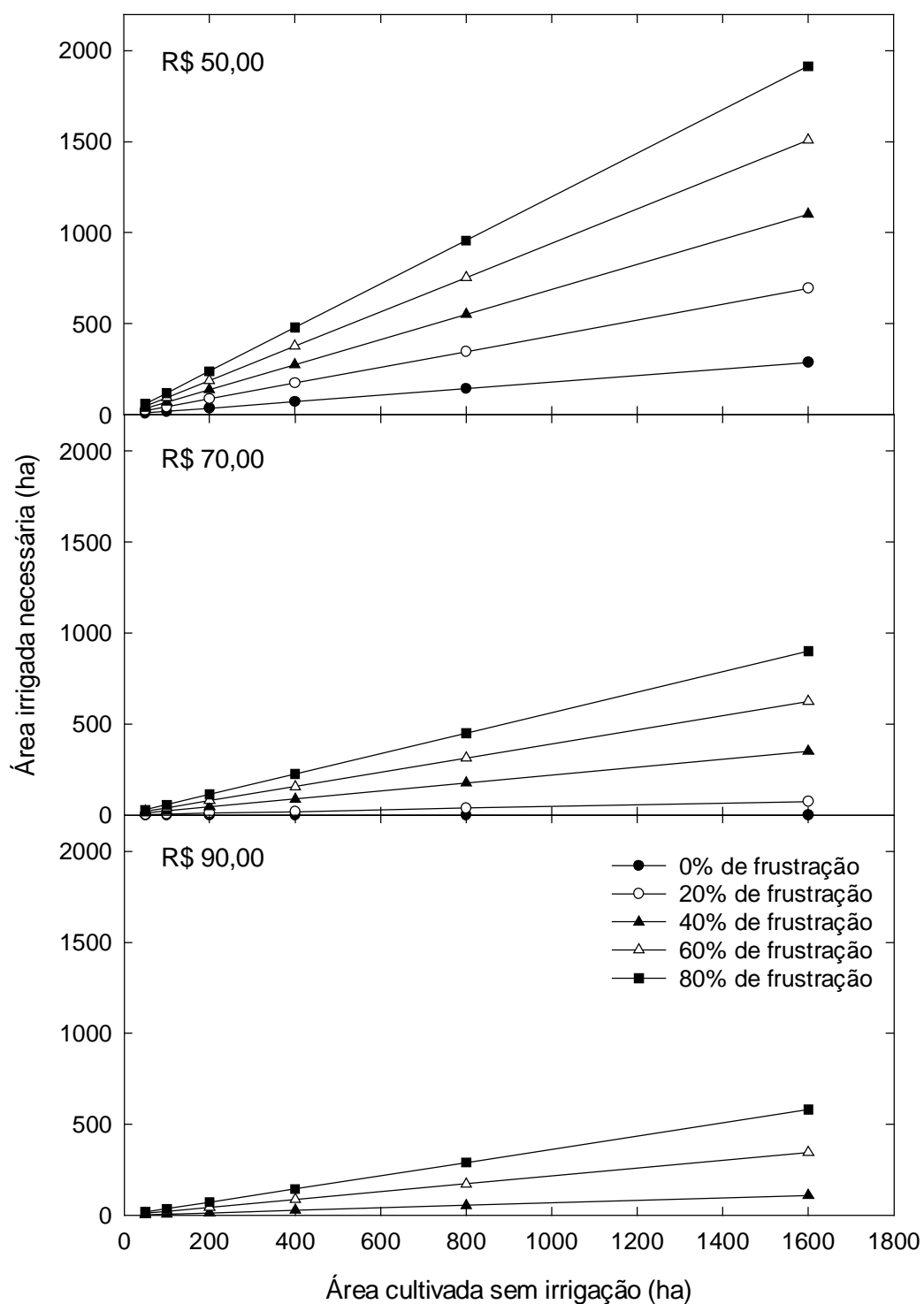


Figura 55. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80%, com rendimento de 17 sc ha⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

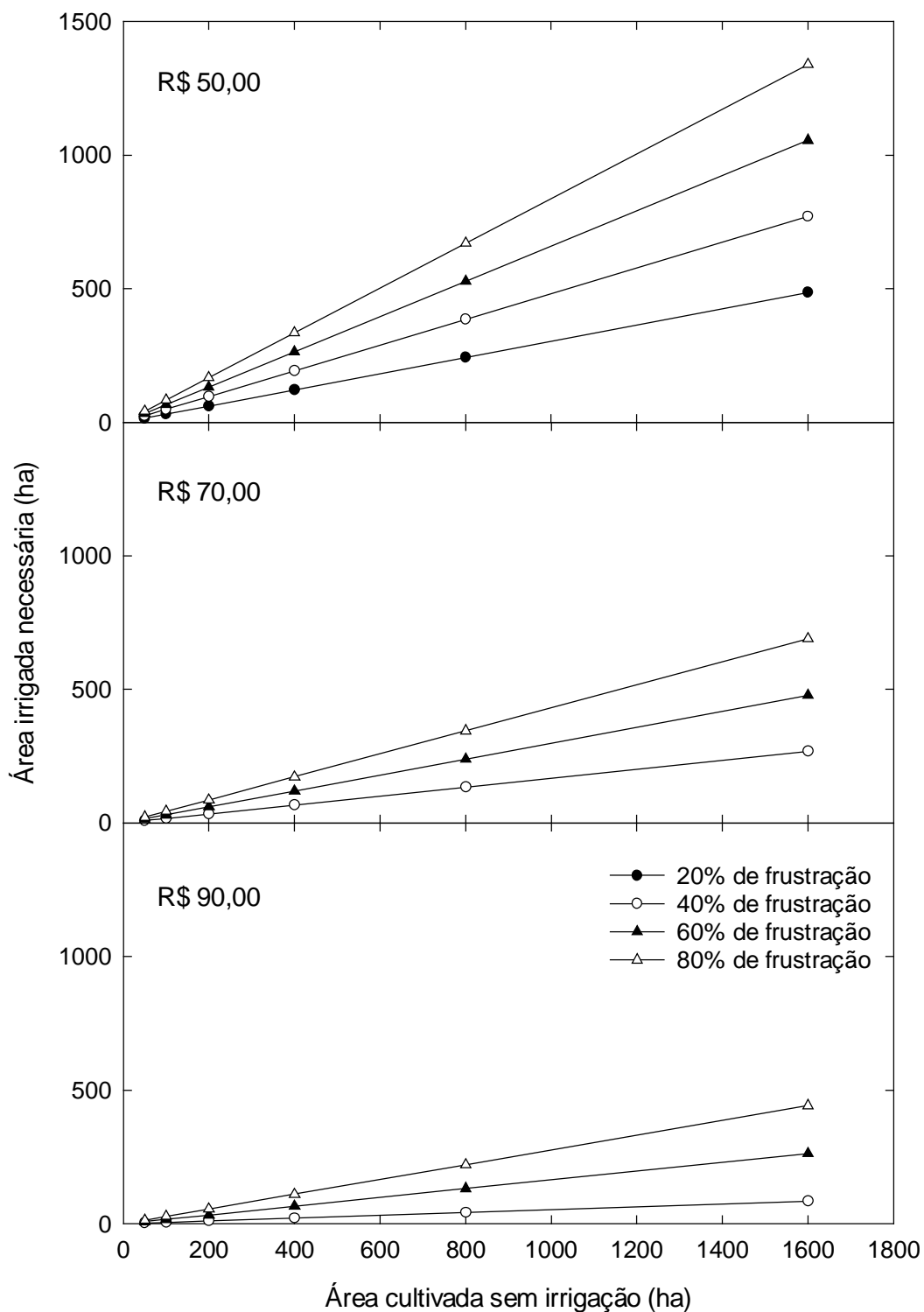


Figura 56. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 50 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 17 sc ha⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

Para um rendimento de grãos de 58 sc ha^{-1} em área irrigada, a necessidade de irrigação apresentou uma redução de 69, 78, 83, 85, 86 e 87%, considerando áreas não irrigadas de 50 a 1600 hectares, respectivamente (Figura 57).

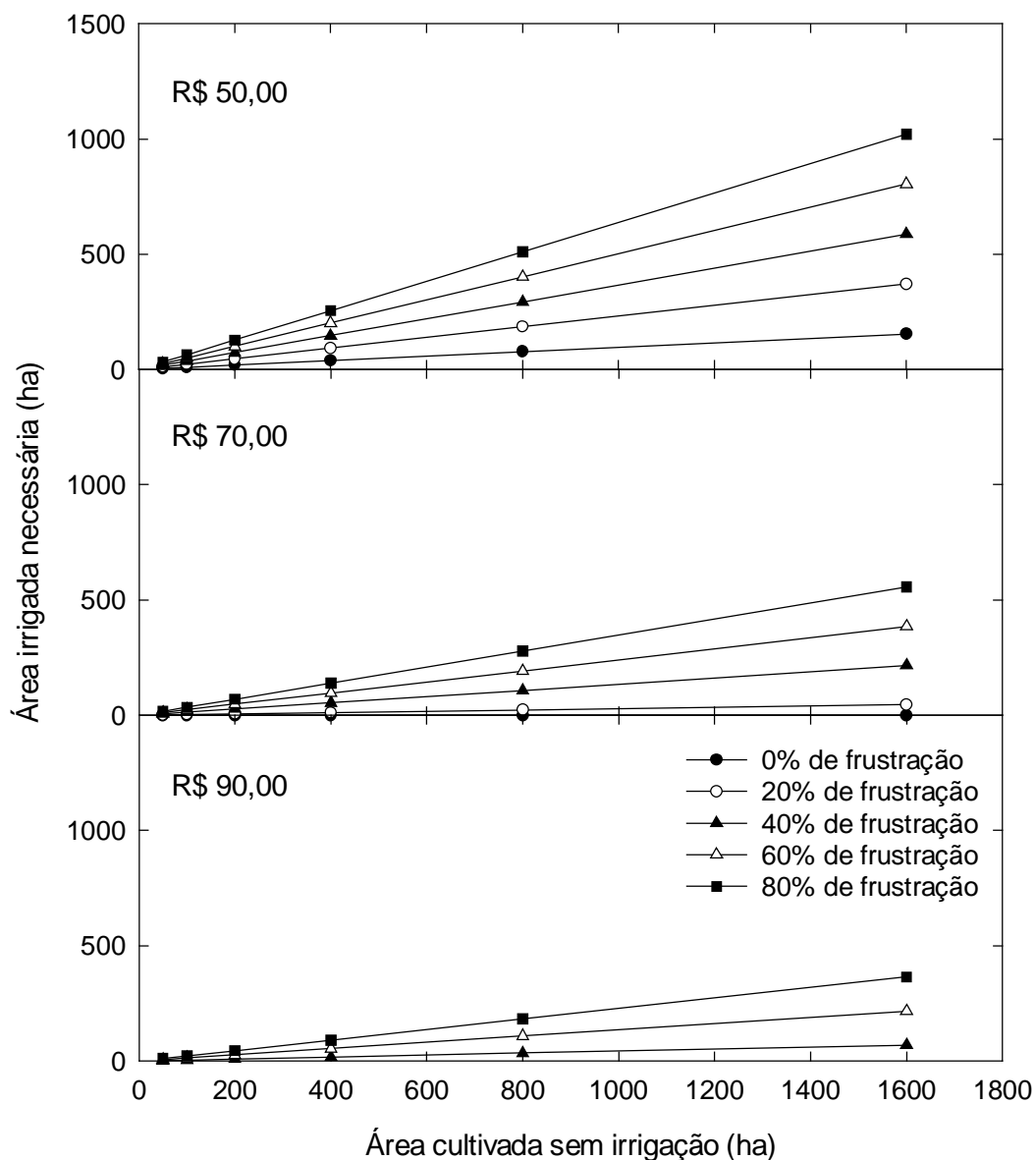


Figura 57. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 58 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80%, com rendimento de 17 sc ha^{-1} de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

A área irrigada necessária (produtividade de 42 sc ha⁻¹) para compensar frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80% para rendimentos de grãos de feijão de 25 sc ha⁻¹ em áreas não irrigadas de 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 é apresentada na tabela 16. Para um preço de comercialização do feijão de R\$ 70,00, somente frustrações de safras maiores que 40% causam receita líquida negativa, havendo a necessidade de implementação da irrigação para compensar as perdas econômicas.

Na figura 58 é apresentada a área irrigada necessária de feijão (produtividade de 50 sc ha⁻¹) para compensar frustrações de safra de 0 a 80% em e rendimento de grãos de 25 sc ha⁻¹ em áreas não irrigadas. A área irrigada necessária aumentou linearmente com o aumento da área não irrigada e decresceu com o incremento no preço do feijão de R\$ 50,00 para R\$ 70,00 e R\$ 90,00. Para uma frustração de safra de 40%, o aumento no preço de comercialização de R\$ 50,00 para R\$ 70,00 reduziu a área irrigada necessária em 92%; por outro lado, a redução na área irrigada necessária com o aumento no rendimento de grãos de 17 sc ha⁻¹ (Figura 55), para 25 sc ha⁻¹ (Figura 58) em área não irrigadas foi de 45%, indicando que a alteração no preço do produto foi mais significativa para o equilíbrio receita-despesa do que o aumento no rendimento de grãos e na área cultivada.

A área irrigada necessária para compensar a frustração de safra para um rendimento de grãos de 33 sc ha⁻¹ de feijão, considerando produtividades em áreas irrigadas de 42 e 58 sc ha⁻¹ é apresentada nas figuras 59 e 60. Considerando um rendimento de 42 sacas em áreas irrigadas e frustração de 80% sobre a expectativa de rendimento de 33 sc ha⁻¹ em áreas não irrigadas, a área mínima irrigada necessária foi maior que a área não irrigada, considerando um preço do feijão de R\$ 50,00. Da mesma forma que para o milho, o aumento no preço do produto provocou maior redução na área irrigada necessária, em relação à maior produtividade obtida em áreas irrigadas.

Tabela 16. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc há-1) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80% com rendimento de 25 sc há-1 de feijão em área não irrigada. Os valores entre parênteses correspondem a porcentagem de área irrigada necessária em relação a área total. Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Níveis de frustração (%) | | | | |
|--------------|--------------------------|--------------|----------------|-----------------|------------------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| | R\$ 50,00 | | | | |
| 50 | 0,00 | 0,00 (0,0) | 18,51 (37,01) | 37,21 (74,42) | 55,91 (111,82) |
| 100 | 0,00 | 1,65 (1,65) | 39,06 (39,06) | 76,46 (76,46) | 113,86 (113,86) |
| 200 | 0,00 | 5,35 (2,68) | 80,16 (40,08) | 154,96 (77,48) | 229,77 (114,88) |
| 400 | 0,00 | 12,75 (3,19) | 162,36 (40,59) | 311,97 (77,99) | 461,58 (115,40) |
| 800 | 0,00 | 27,55 (3,44) | 326,77 (40,85) | 625,99 (78,25) | 925,21 (115,65) |
| 1600 | 0,00 | 57,14 (3,57) | 655,58 (40,97) | 1254,02 (78,38) | 1852,46 (115,78) |
| | R\$ 70,00 | | | | |
| 50 | 0,00 | 0,00 | 0,76 (1,51) | 13,41 (26,81) | 26,06 (52,11) |
| 100 | 0,00 | 0,00 | 2,26 (2,26) | 27,56 (25,56) | 52,86 (52,86) |
| 200 | 0,00 | 0,00 | 5,27 (2,63) | 55,87 (27,93) | 106,47 (53,24) |
| 400 | 0,00 | 0,00 | 11,28 (2,82) | 112,48 (28,12) | 213,69 (53,42) |
| 800 | 0,00 | 0,00 | 23,30 (2,91) | 225,72 (28,21) | 428,13 (53,52) |
| 1600 | 0,00 | 0,00 | 47,35 (2,96) | 452,18 (28,26) | 857,00 (53,56) |
| | R\$ 90,00 | | | | |
| 50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,01 (10,02) | 15,83 (31,67) |
| 100 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,23 (11,23) | 32,88 (32,88) |
| 200 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 23,66 (11,83) | 66,97 (32,49) |
| 400 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 23,66 (5,92) | 66,97 (10,74) |
| 800 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 98,28 (12,29) | 271,52 (33,94) |
| 1600 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 197,78 (12,36) | 544,24 (34,02) |

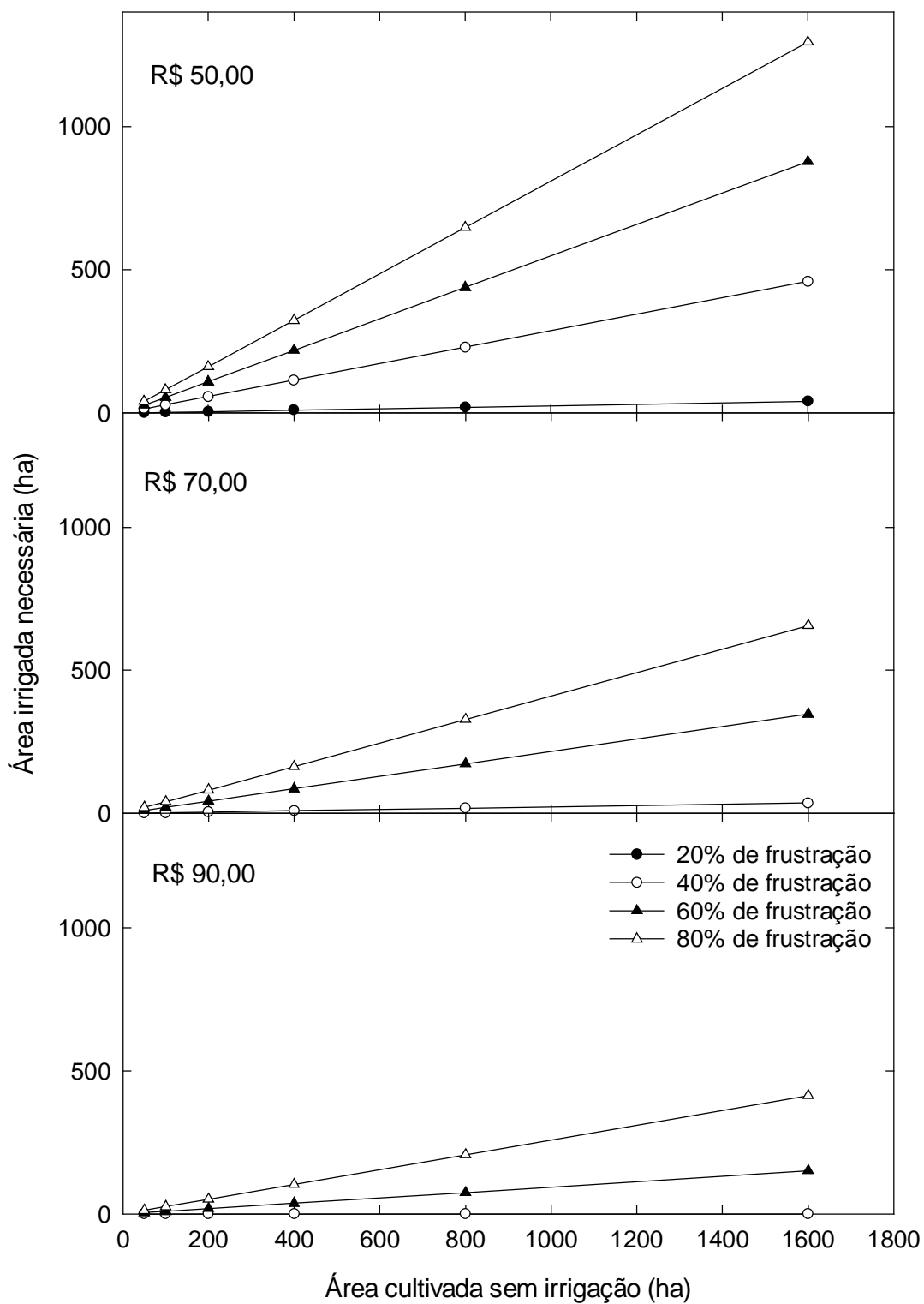


Figura 58. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 50 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80% com rendimento de 25 sc ha⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

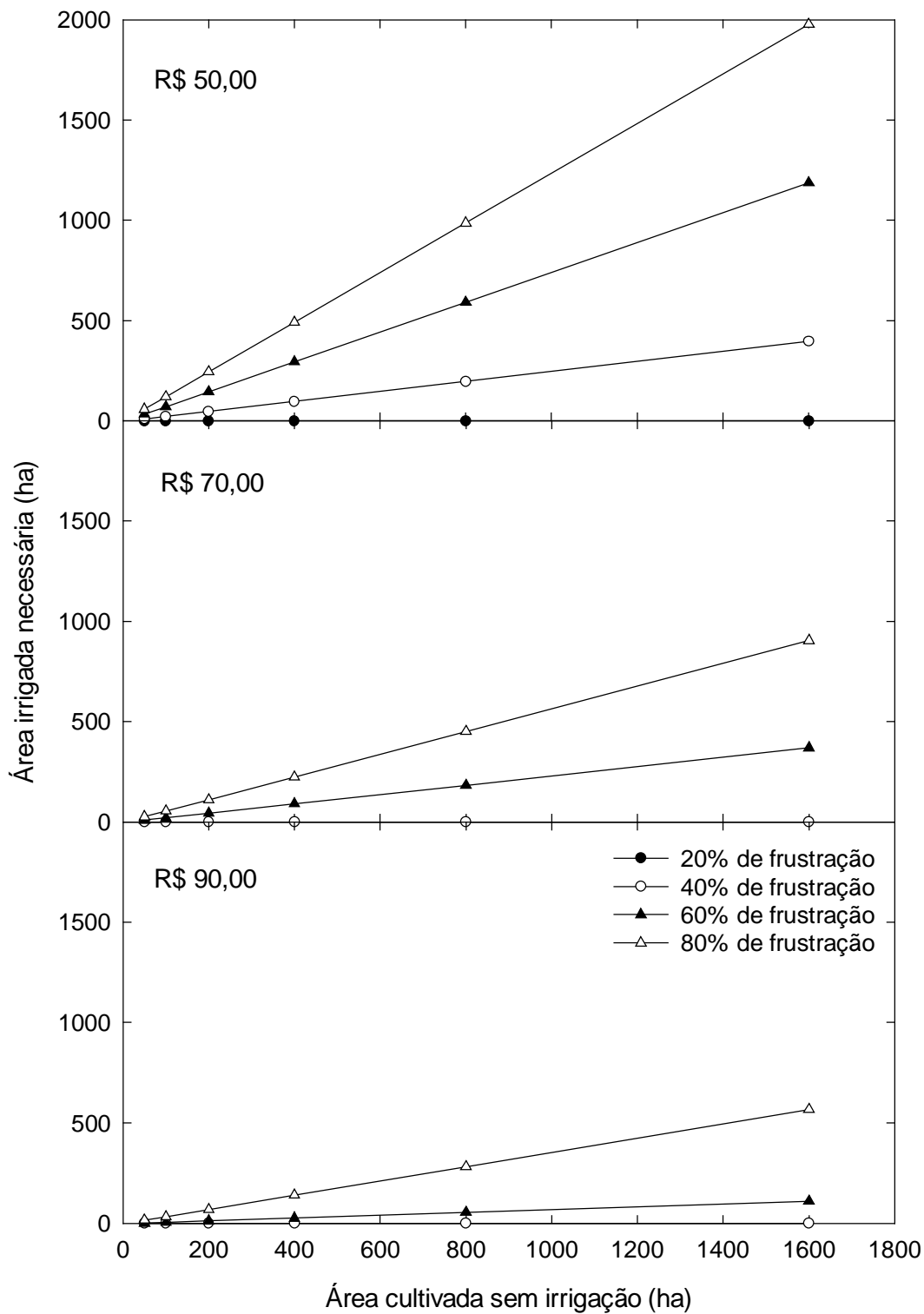


Figura 59. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 33 sc ha⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

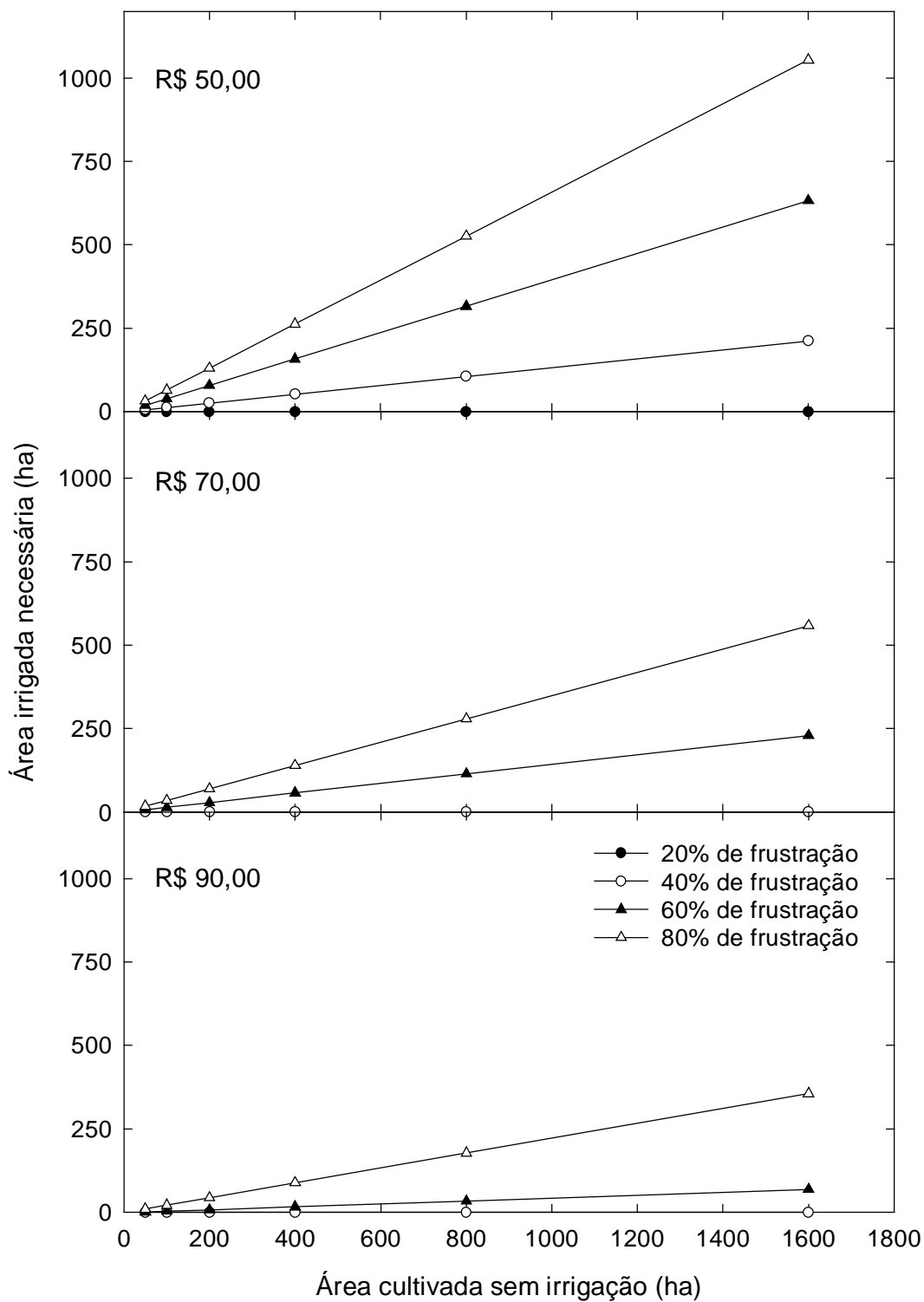


Figura 60. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 58 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 33 sc ha⁻¹ de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

Para um rendimento de grãos do feijão de 42 sc ha^{-1} em área não irrigada e produtividade de 42 sc ha^{-1} em áreas irrigadas, observou-se a necessidade de utilização de irrigação a partir de 40% de frustração em área maiores que 200 hectares (Tabela 17). Para rendimentos de grãos superiores a 42 sc ha^{-1} em áreas não irrigadas, o uso da irrigação somente foi necessário para frustrações de safra acima de 60% e, nesse caso, a necessidade em área irrigada supera a área não irrigada em mais de 100% (Figura 61), devido ao elevado custo de produção dessas áreas.

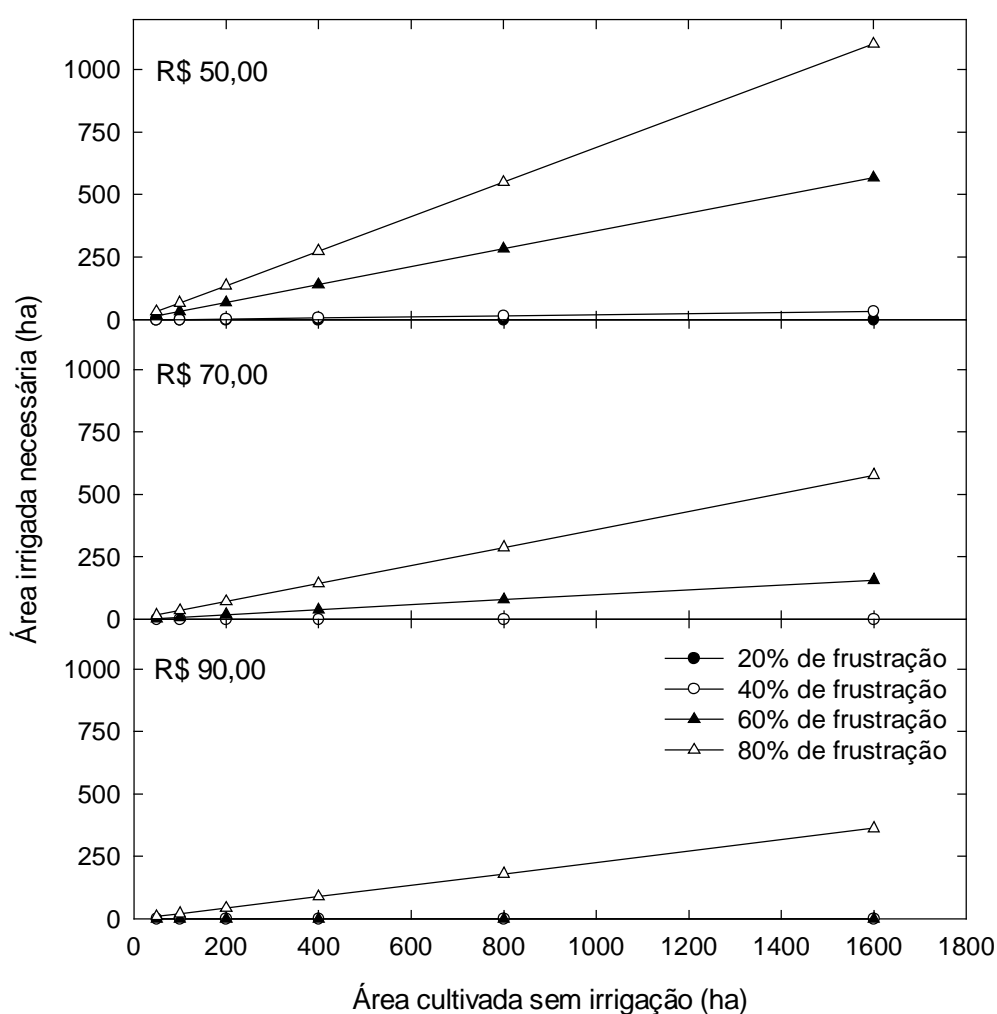


Figura 61. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 58 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra de 20 a 80%, com rendimento de 42 sc ha^{-1} de feijão em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

Tabela 17. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 42 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80% com rendimento de 42 sc ha⁻¹ de feijão em área não irrigada. Os valores entre parênteses correspondem a porcentagem de área irrigada necessária em relação a área total. Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Níveis de frustração (%) | | | | |
|--------------|--------------------------|------|--------------|-----------------|------------------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| | R\$ 50,00 | | | | |
| 50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 28,27 (56,55) | 59,69 (119,38) |
| 100 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 61,67 (61,67) | 124,50 (124,50) |
| 200 | 0,00 | 0,00 | 2,78 (1,39) | 128,45 (64,23) | 254,12 (127,06) |
| 400 | 0,00 | 0,00 | 10,68 (2,67) | 262,02 (65,51) | 513,37 (128,34) |
| 800 | 0,00 | 0,00 | 26,47 (3,31) | 529,16 (66,15) | 1031,85 (128,98) |
| 1600 | 0,00 | 0,00 | 58,07 (3,63) | 1063,45 (66,47) | 2068,83 (129,30) |
| | R\$ 70,00 | | | | |
| 50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,22 (10,45) | 26,48 (52,95) |
| 100 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 13,27 (13,27) | 55,78 (55,78) |
| 200 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,37 (14,69) | 114,39 (57,19) |
| 400 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 61,58 (15,39) | 231,60 (57,90) |
| 800 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 125,98 (15,75) | 466,03 (58,25) |
| 1600 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 254,79 (15,92) | 934,89 (58,43) |
| | R\$ 90,00 | | | | |
| 50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 15,18 (30,36) |
| 100 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 33,35 (33,35) |
| 200 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 69,68 (34,84) |
| 400 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 69,68 (17,42) |
| 800 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 287,68 (35,96) |
| 1600 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 578,35 (36,15) |

6.6.3 - Soja

Na figura 62 é apresentada a área mínima irrigada necessária para compensar frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80%, sobre rendimentos de grãos de 15 sc ha⁻¹ em áreas não irrigadas, e produtividade de 42 sc ha⁻¹ em área irrigadas. Para um preço mínimo da soja de R\$ 30,00 (o preço histórico da soja no Rio Grande do Sul, segundo a CONAB (2003) é de U\$ 11.58 saca⁻¹, mesmo em anos sem deficiência hídrica (0% de frustração), a receita líquida determinada foi negativa, sendo necessário a utilização de irrigação para compensar as perdas econômicas.

Aumentando-se a expectativa de rendimento de grãos de 15 para 30 sc ha⁻¹ em áreas não irrigadas, a necessidade de área irrigada para equilibrar os custos de produção da soja (produtividade de 45 sc ha⁻¹ em áreas irrigadas) decresceu consideravelmente (Figura 63), principalmente para frustrações de safra inferiores que 20%.

Reduções maiores foram observadas com o aumento no preço de comercialização de R\$ 30,00 para R\$ 50,00, em relação ao aumento na área cultivada. A maior lucratividade da soja em relação ao milho e feijão pode ser parcialmente explicada pela redução no custo de produção dessa cultura, atribuída principalmente à incorporação de variedades transgênicas nos cultivos no Rio Grande do Sul. Segundo dados do IBGE/Fecotrig (2001), o Rio Grande do Sul registrou uma diminuição de 48% nos custos de produção da soja, desde o ano agrícola 1994/95 até 2001/02.

Nas figuras 64 e 65 são apresentadas as áreas irrigadas necessárias para compensar frustrações de safras de 0, 20, 40, 60 e 80% e rendimento de grãos esperado de 30 sc ha⁻¹ de soja. O rendimento de grãos estimado para áreas irrigadas é de 55 e 65 sc ha⁻¹. Os resultados demonstram que somente frustrações de safra superiores a 40% provocaram uma receita líquida negativa. Isso ocorre em função do menor

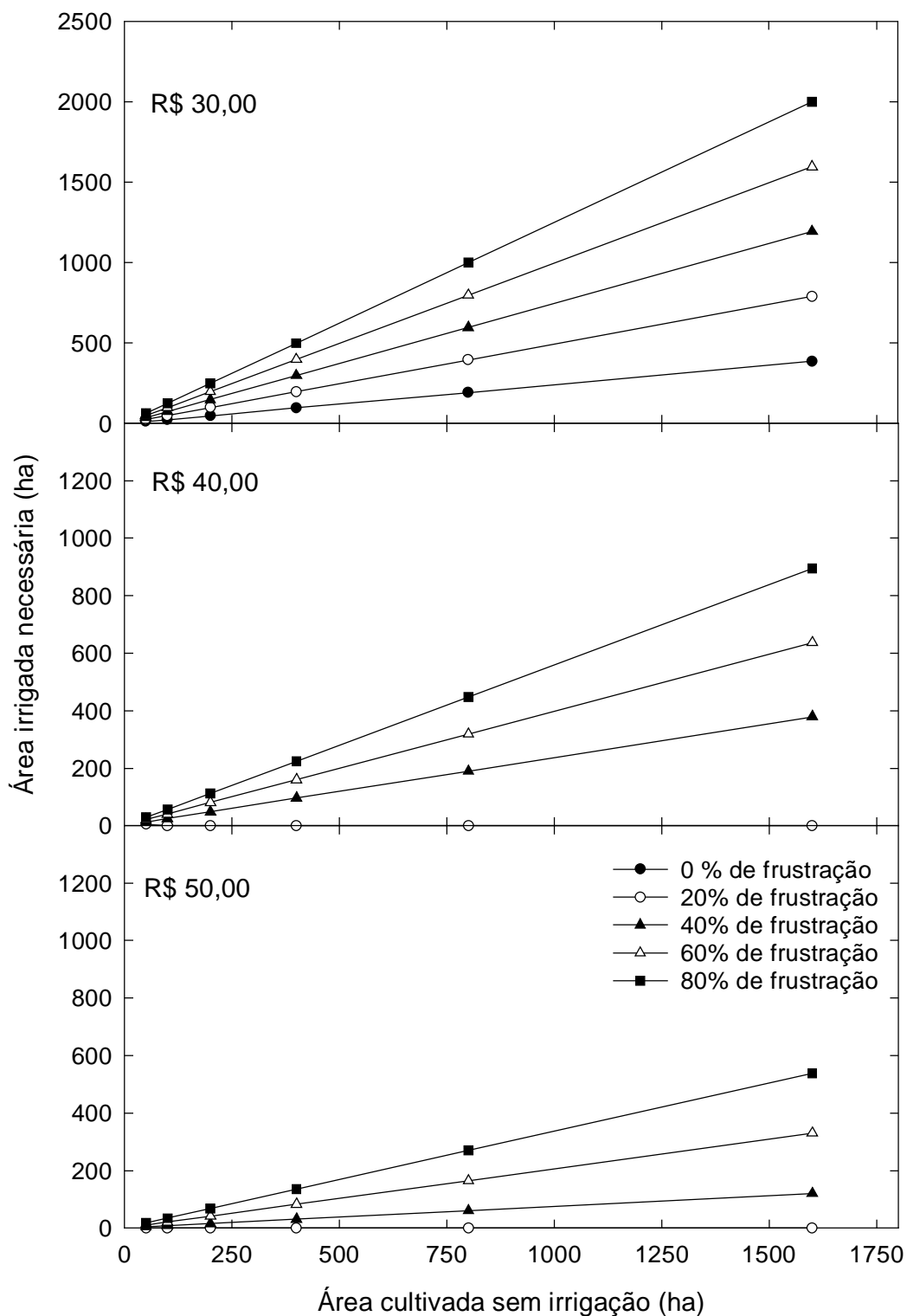


Figura 62. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 45 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80%, com rendimento de 15 sc ha^{-1} de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

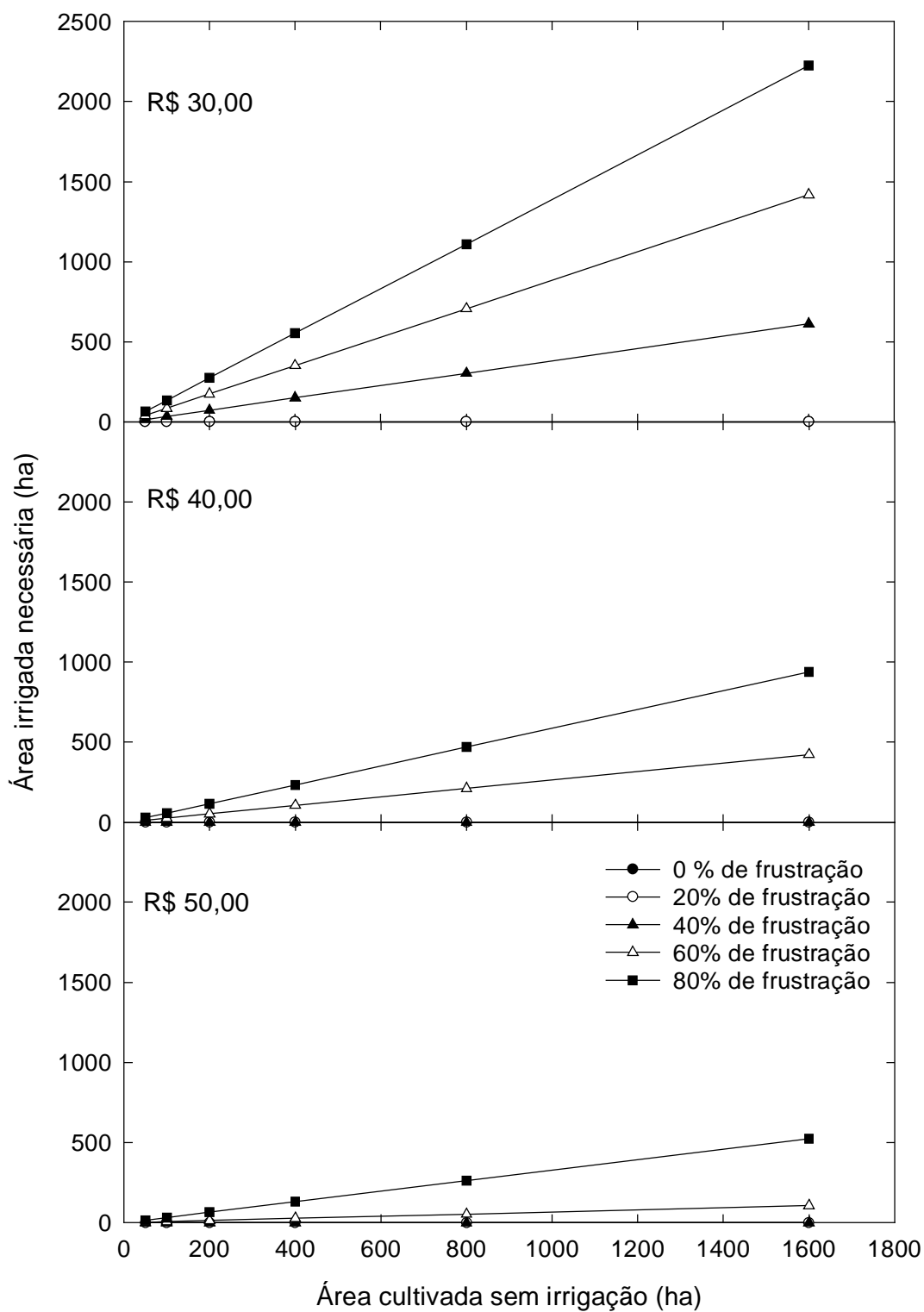


Figura 63. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 45 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra de 40 a 80%, com rendimento de 30 sc ha^{-1} de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

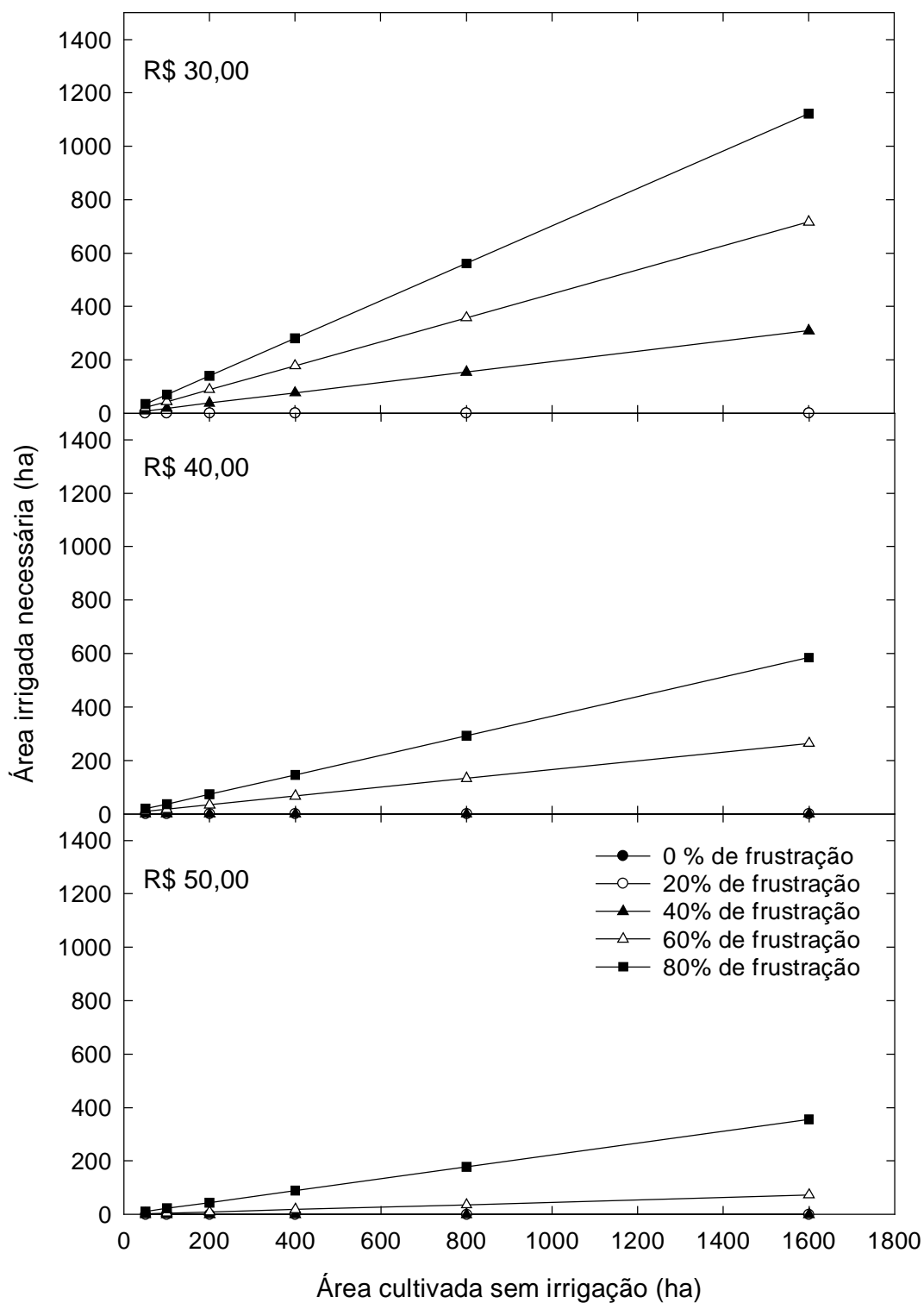


Figura 64. Área irrigada necessária (produtividade estimada de 55 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 40 a 80%, com rendimento de 30 sc ha⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

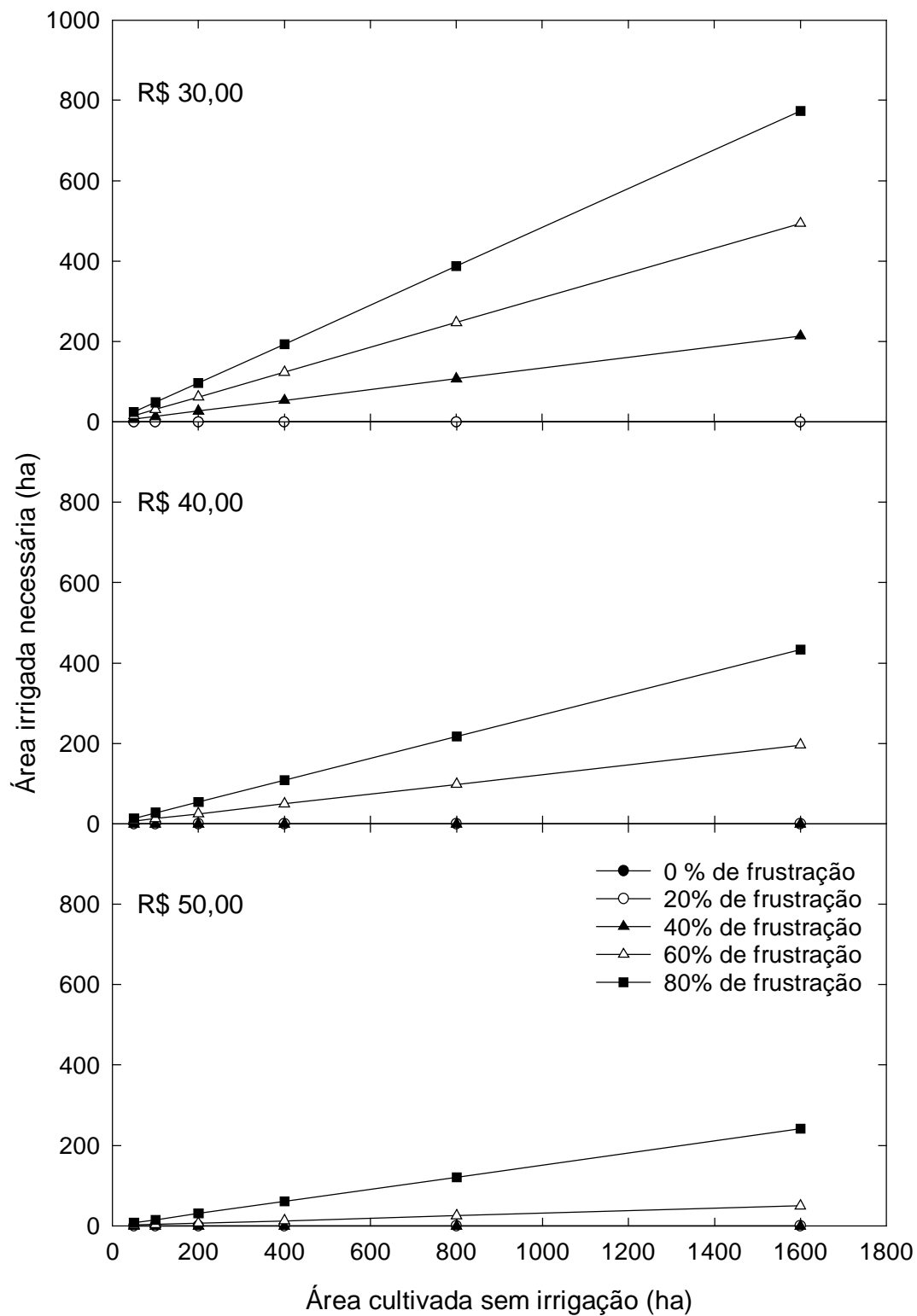


Figura 65. Área irrigada necessária (produtividade estimada de 65 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra de 40 a 80%, com rendimento de 30 sc ha^{-1} de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

custo de produção para lavouras de soja, principalmente devido à ausência de aplicação de N, principalmente em cobertura. O N corresponde a aproximadamente 12% do custo de produção do milho, com rendimento estimado de 100 sc ha⁻¹ e 6% do custo de produção do feijão, com rendimento estimado em 42 sc ha⁻¹.

As áreas irrigadas necessárias para frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80% em áreas não irrigadas e rendimento esperado de 45 sc ha⁻¹ em áreas não irrigadas são apresentadas nas figuras 66, 67 e 68. Para rendimentos de grãos maiores em áreas não irrigadas (45 sc ha⁻¹), somente frustrações superiores a 60% causaram uma receita líquida negativa. Entretanto, a área irrigada necessária também foi elevada, superando a área total não irrigada nas produtividades de 45 sc ha⁻¹ irrigadas e preço de comercialização do produto de R\$ 30,00 (Figura 66).

Para rendimentos de grãos de soja de 55 e 65 sc ha⁻¹ e frustrações de safra superiores a 60%, a área mínima irrigada necessária foi inferior que a área total não irrigada, para todos os preços de produto considerado (Figuras 67 e 68).

A área irrigada necessária para compensar frustrações de safra de 0, 20, 40, 60 e 80% em áreas não irrigadas de soja e rendimento de grãos de 60 sc ha⁻¹ é apresentada na tabela 18. Observa-se que, na adoção de tecnologias de produção que possibilitam o aumento na produtividade da cultura soja em áreas não irrigadas, somente a ocorrência de déficit hídricos severos resultaram em receita líquida negativa. Além disso, o aumento no preço do produto de R\$ 30,00 para R\$ 50,00 diminui significativamente a necessidade de utilização de irrigação para compensar a frustração de safra por deficiência hídrica dessa cultura.

As áreas irrigadas necessárias para compensar frustrações de safra de 0 a 80% para rendimentos de grãos da cultura de 60 sc ha⁻¹ em áreas não irrigadas, considerando rendimentos de grãos de 55 e 65 sc ha⁻¹, são apresentados nas figuras 69 e 70. Para uma mesma frustração de safra (60%) a redução na área mínima irrigada necessária

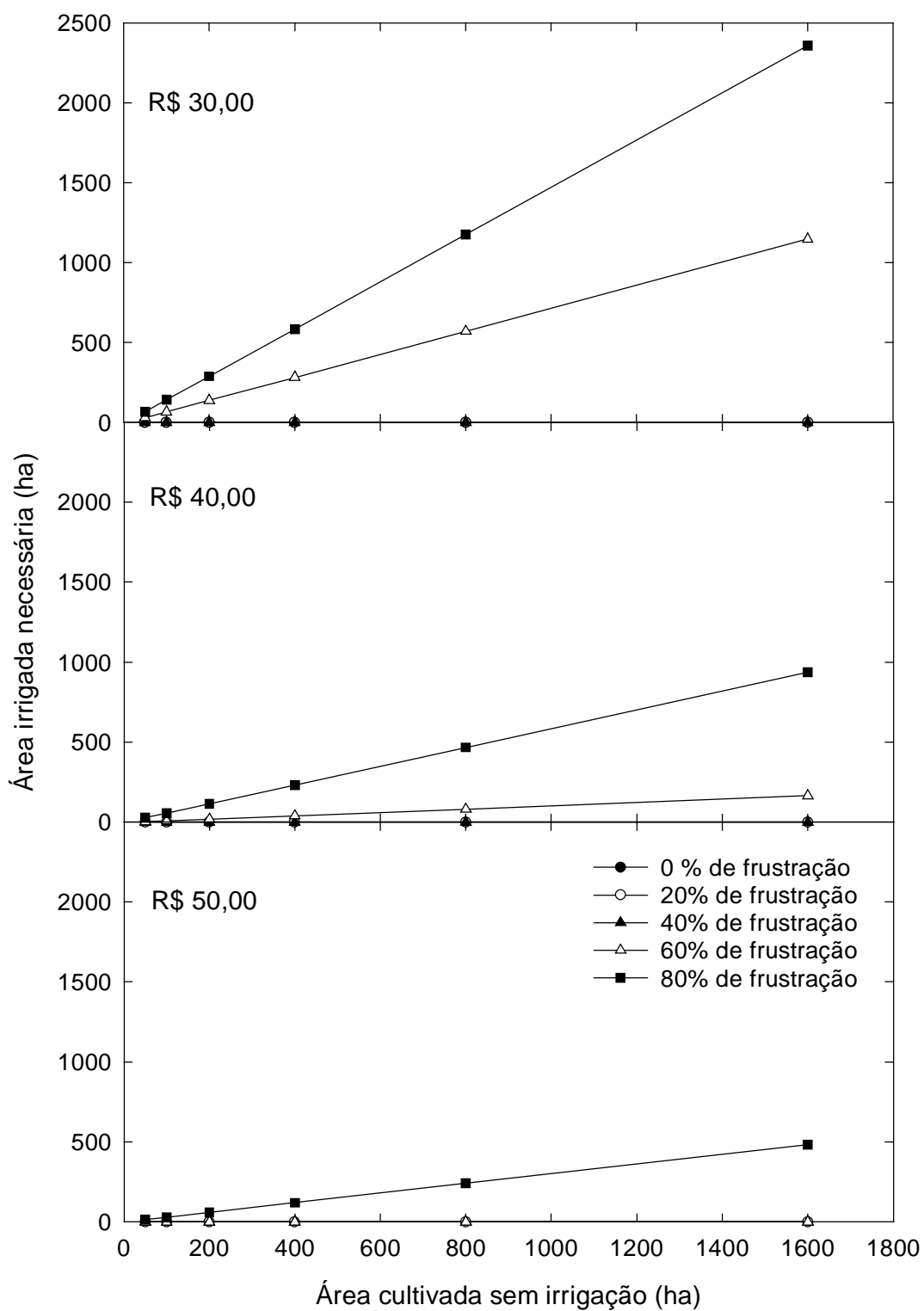


Figura 66. Área irrigada necessária (produtividade estimada de 45 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra de 40 a 80%, com rendimento de 45 sc ha^{-1} de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

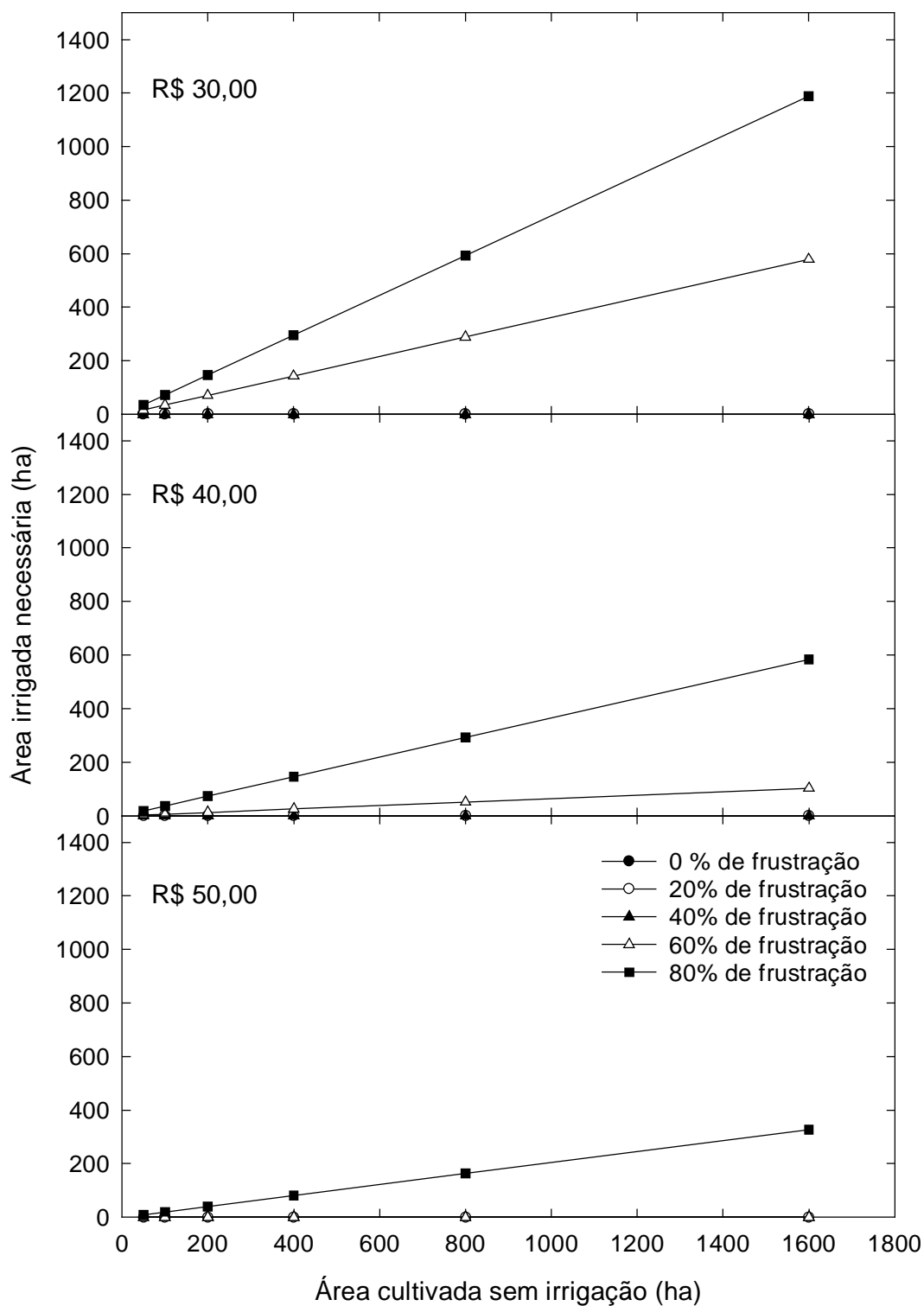


Figura 67. Área irrigada necessária (produtividade estimada de 55 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 60 e 80%, com rendimento de 45 sc ha⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

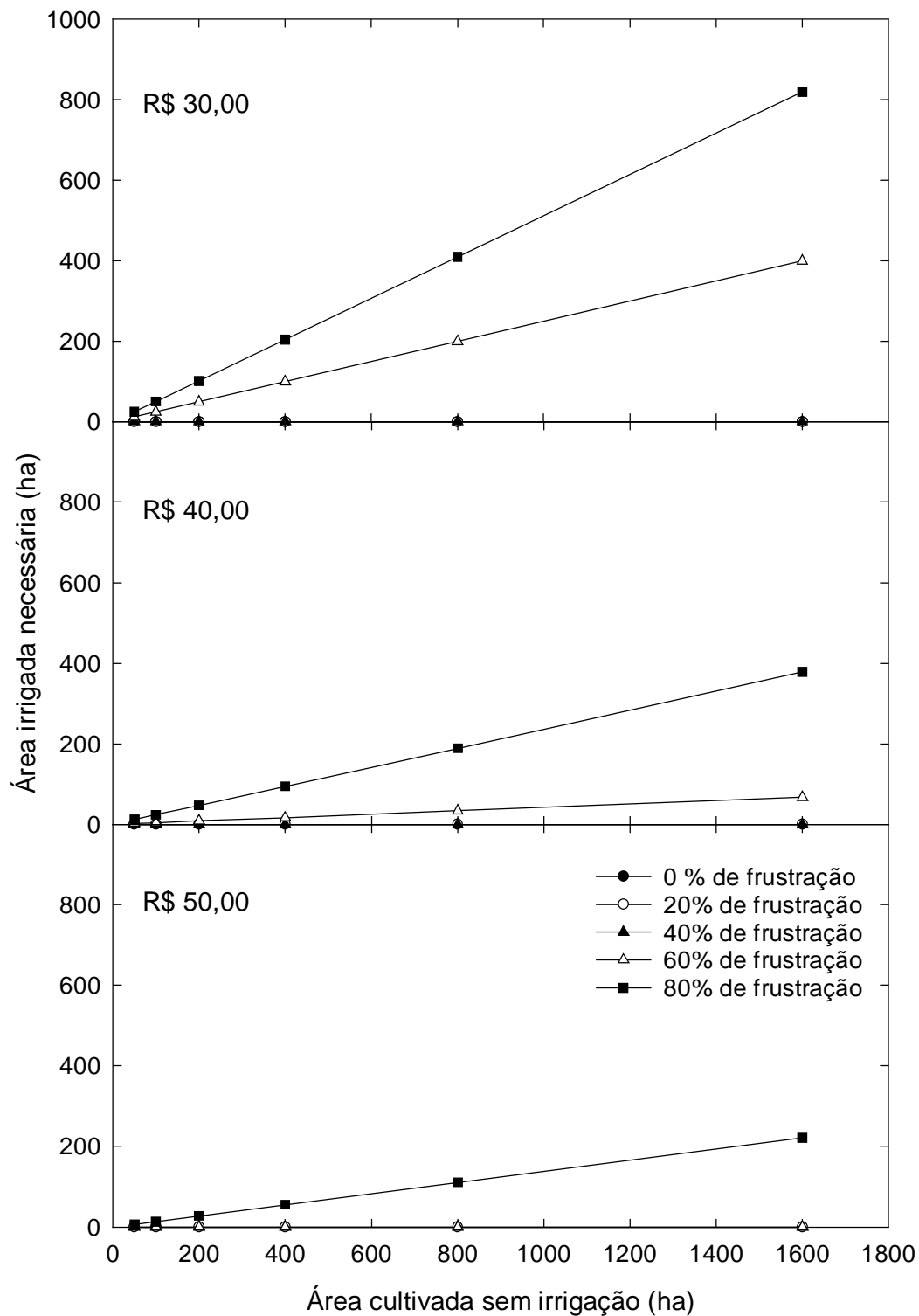


Figura 68. Área irrigada necessária (produtividade estimada de 65 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra de 60 e 80%, com rendimento de 45 sc ha^{-1} de soja em áreas não irrigadas de 50 a e 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

Tabela 18. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 45 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra de 0 a 80% com rendimento de 60 sc ha⁻¹ de soja em área não irrigada. Os valores entre parênteses correspondem a porcentagem de área necessária em relação a área total. Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Níveis de frustração (%) | | | | |
|--------------|--------------------------|------|------|----------------|------------------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| | R\$ 30,00 | | | | |
| 50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 20,71 (41,42) | 71,11 (142,22) |
| 100 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 51,33 (51,33) | 152,13 (152,12) |
| 200 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 112,56 (56,28) | 314,16 (157,08) |
| 400 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 235,03 (58,76) | 638,23 (159,56) |
| 800 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 479,96 (60,00) | 1286,36 (160,79) |
| 1600 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 969,82 (60,61) | 2582,62 (161,41) |
| | R\$ 40,00 | | | | |
| 50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 27,55 (55,10) |
| 100 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 58,29 (58,29) |
| 200 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 119,77 (59,88) |
| 400 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 242,74 (60,68) |
| 800 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 488,67 (61,08) |
| 1600 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 980,53 (61,28) |
| | R\$ 50,00 | | | | |
| 50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 12,28 (24,56) |
| 100 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 27,03 (27,03) |
| 200 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 56,54 (28,27) |
| 400 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 115,56 (28,89) |
| 800 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 233,60 (29,20) |

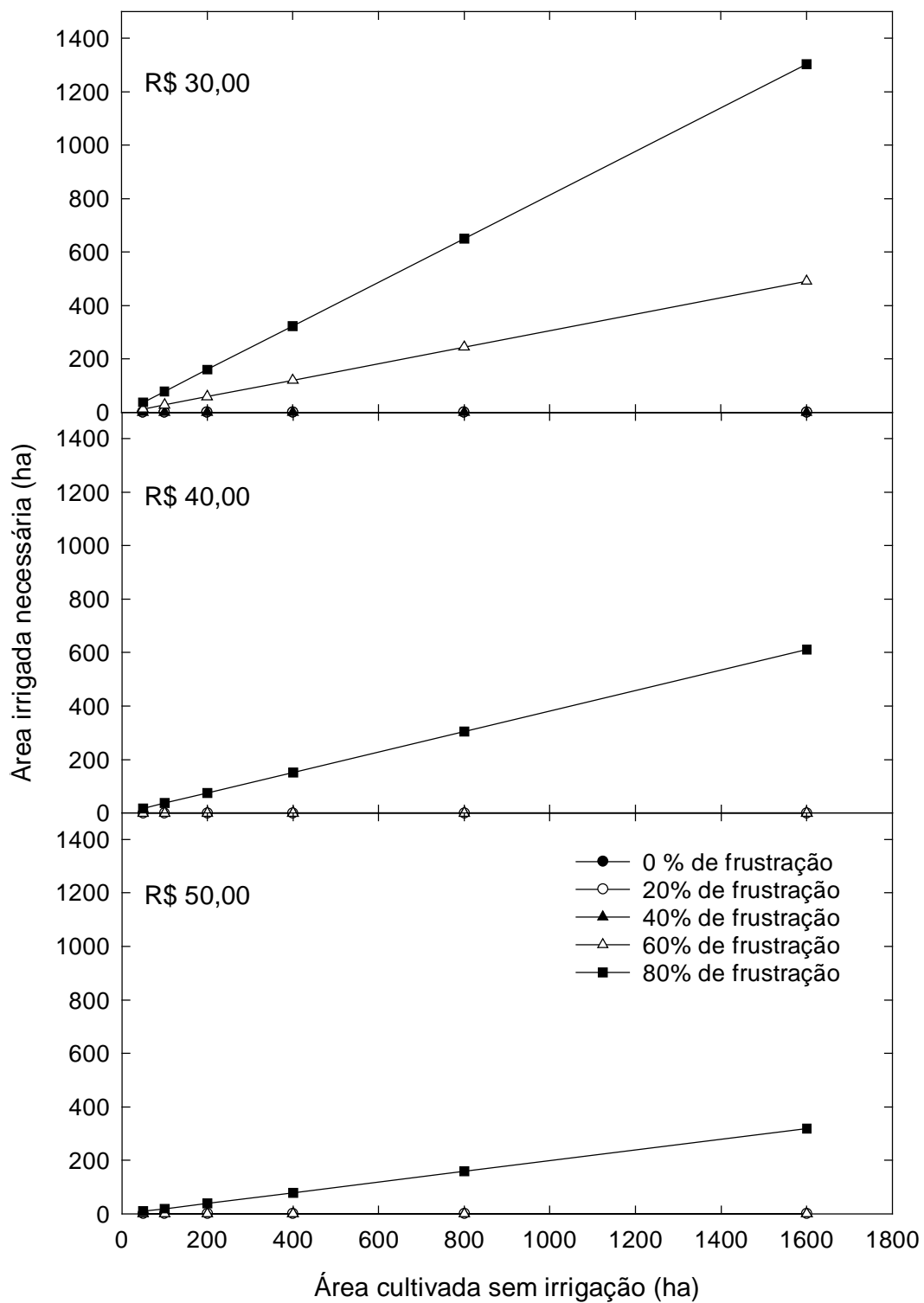


Figura 69. Área irrigada necessária (produtividade esperada de 55 sc ha⁻¹) para compensar uma frustração de safra 60 e 80%, com rendimento de 60 sc ha⁻¹ de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

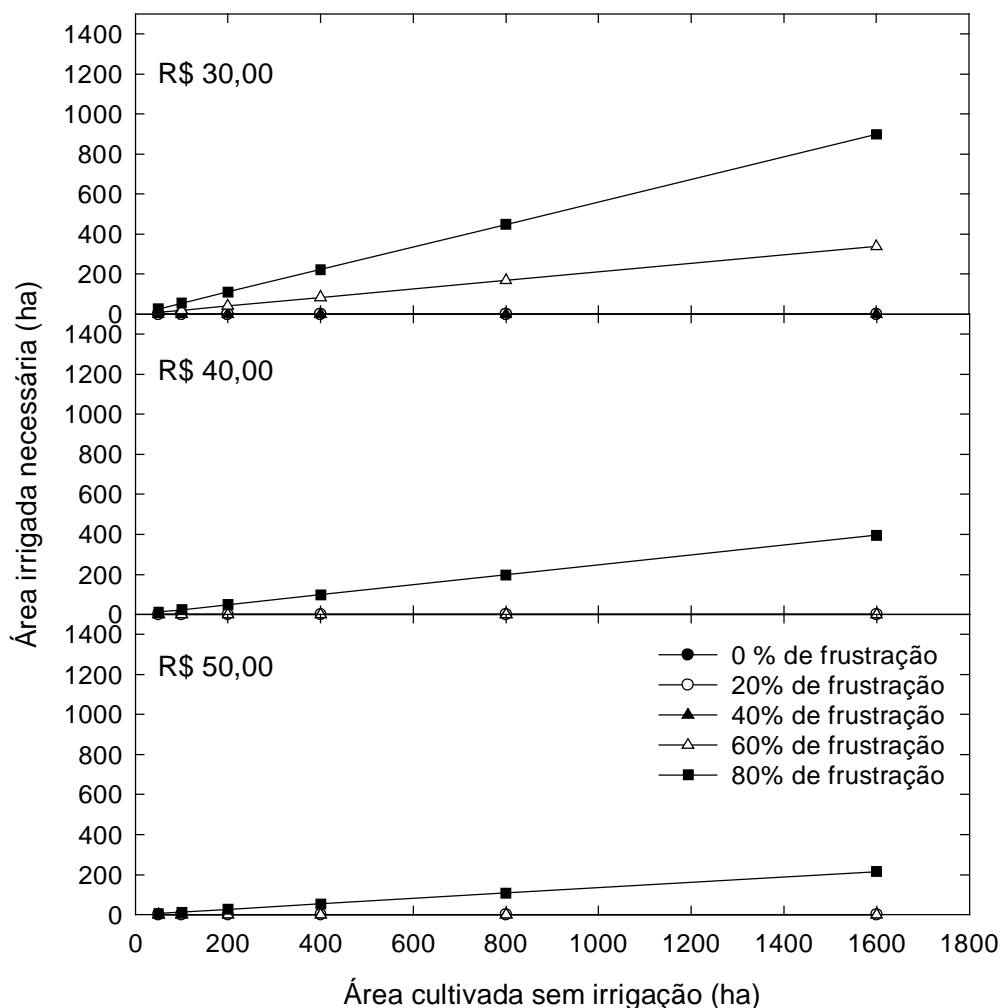


Figura 70. Área irrigada necessária (produtividade estimada de 65 sc ha^{-1}) para compensar uma frustração de safra 60 e 80%, com rendimento de 60 sc ha^{-1} de soja em áreas não irrigadas de 50 a 1600 ha. Santa Maria, RS, 2004.

para equilibrar receita-despesa com uma produtividade de 60 sc ha^{-1} em áreas não irrigadas é maior (49%) do que aumentar a expectativa de rendimento de grãos em áreas não irrigadas em 5 sc ha^{-1} . Por exemplo, aumentando-se o rendimento de grãos em áreas não irrigadas de 50 para 60 sc ha^{-1} e uma frustração de safra de 60%, a redução na área irrigada necessária foi de 11%, evidenciando que o aumento na expectativa de rendimento de grãos em áreas não irrigadas é menos significativo que o aumento no rendimento de grãos em áreas irrigadas de 45, para 55 e 65 sc ha^{-1} (Tabela 18 e Figuras 69 e 70).

7 - CONCLUSÕES

A lâmina de irrigação acumulada necessária a complementação das necessidades hídricas das culturas do milho, feijão e soja variou com a época de semeadura e região de cultivo.

A lâmina máxima de irrigação necessária para o milho, feijão e soja variou mais entre as regiões do que entre as diferentes épocas de semeadura.

A maior lâmina de irrigação necessária para a cultura do milho foi verificada para o Planalto Inferior; a lâmina de irrigação necessária para a soja foi semelhante para a Depressão Central e Planalto Inferior, com valores intermediários para a região do Baixo Vale do Uruguai.

A menor lâmina de irrigação necessária acumulada para o milho, feijão e soja foi verificada para a região do Planalto Médio.

Houve variação entre o total de precipitação pluvial entre as diferentes regiões estudadas; entretanto, maiores diferenças entre as regiões por época de semeadura do milho, feijão e soja não foram observadas nesse trabalho.

Maiores valores da ETo foram observados para a região do Planalto Inferior. A ETo para a Depressão Central, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai foi 6, 9,3, 33 e 6,6% inferior àquela estimada para o Planalto Inferior.

Os custos de produção unitários para as culturas do milho, feijão e soja diminuíram com o aumento na expectativa de rendimento, área plantada e preço de comercialização do produto.

A redução da necessidade de área mínima irrigada para compensar frustrações de safra em áreas não irrigadas foi mais significativa com o aumento no preço de comercialização do produto do que com o aumento na expectativa de rendimento de grãos e aumento da área cultivada.

A utilização da irrigação numa fração da área total da propriedade pode compensar a frustração de safra em até 80%, dependendo da

estimativa de rendimento de grãos em áreas irrigadas e do preço de comercialização do produto.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAGARSWAMY, G. & J.T. RITCHIE. Phasic development in CERES-Sorghum model. Chapter 3, IN: HODGES, T. **Predicting crop phenology**. CRC Press, pg. 143-152. Boca Raton, Florida, 1991.
- ANDRADE, J.G. **Introdução em administração rural**. ESALQ/FAEP, Minas Gerais, 1990.
- ARRUDA, Z.J. **Eficiência econômica na alocação de recursos na agricultura: uma avaliação de dois métodos de estimativa do ponto ótimo, visando sua aplicação prática**. Campo Grande: Embrapa-CNPGC, 1982, 24p. (Embrapa-CNPGC. Circular Técnica, 7).
- AVILA, A.M.H., BERLATO, M.A., SILVA, J.B. & FONTANTA, D.C. Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para a estação de crescimento das culturas de primavera-verão no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesq. Agrop. Gaúcha**, v.2, n.2, p.149-154, 1996.
- BEGG, J.E. & TURNER, N.C. Crop water deficits. **Adv. Agron.**, San Diego, v.28, p.161-217, 1976.
- BERLATO, M.A., & MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO. 1981. 95p.
- BERLATO, M.A., MATZENAUER, R. & BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman: evaporação do tanque "classe A" e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**. Porto Alegre, v.22, n.2, p.251-259, 1986.
- BERLATO, M.A. & FONTANA, D.C. Previsão climática e sua aplicação na agricultura. In: Carlesso et al. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Imprensa Universitária, p.99-113, 2001.
- BERLATO, M.A. & FONTANA, D.C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.119-125, 1999.

- BERLATO, M.A. As condições de precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola In: BERGAMASCHI et al. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, Ed. Universidade, p.11-24, 1992.
- BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. São José dos Campos: INPE, 1987. 93f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São Paulo, 1987.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. & BONO, L. Tendência temporal da precipitação pluvial anual no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.3, n.1, p.111-113, 1995.
- BOERMA, H.R. & ASHLEY, D.A. Irrigation, row spacing, and genotype effects on late and ultralate planted soybeans. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, n.6. p.995-999, 1982.
- BOOTE, K.J., JONES, W. & PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop model. **Agronomy Journal**, v.88, p.704-716, 1996.
- BORCHARDT, I. Custo de Produção. Novembro, 2003. Disponível no site <http://www.icapa.com.br>.
- BOYER, J.S. Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf water potentials in corn and soybean. **Plant Physiology**., Bethesda, v.46, p.236-239, 1970.
- BOUWER, H. Irrigation and global water outlook. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v.25, p. 221-231, 1994.
- BURIOL, G.A., ESTEFANEL, V., SACCOL, A. V. et al. **Balanço hídrico seriado do Rio Grande do Sul**. Departamento de Fitotecnia, 1977, 216 p. (Publicação Avulsa, n.2).
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.1, p.183-188, 1995.
- CARLESSO, R. Disponibilidade de água em solos arenosos. In: FRIES. M.R. **Plantio direto em solos arenosos: alternativas de manejo para a sustentabilidade agropecuária**. Santa Maria: Pallotti. 1998, p. 21-51.
- CARLESSO, R., PETRY, M.T. & ROSA, G.M. Manejo da irrigação por aspersão visando a redução de custos de produção e de energia. In: Carlesso et al. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Imprensa Universitária, p.84-113, 2001.

- CARLESSO, R., PETRY, M.T., ROSA, G.M. da & ALMEIDA, M.Z. Controle total: o manejo da irrigação usando estações meteorológicas automáticas, computadores e comunicação via internet garante precisão e menos despesas. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v.16, n.3, p.20-23, 2003a.
- CARLESSO, R; ROSA, G.M. da; PETRY, M.T. & ALMEIDA, M.Z. Weather station and computer network to provide evapotranspiration information in Southern Brazil through internet. In: **2003 ANNUAL INTERNATIONAL MEETING**, 2003, Las Vegas. 2003 Annual International Meeting. 2003b.
- CERETTA, C.A. & SILVEIRA, M. J. Manejo da fertilidade do solo para altas produtividades. In: Carlesso et al. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Imprensa Universitária, p.10-19, 2001.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO-RS / SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS – Núcleo Regional Sul/EMBRAPA-CNPT, 1995. 223 p.
- COMISSÃO ESTADUAL DE PESQUISA DE FEIJÃO: recomendações técnicas para o cultivo no Rio Grande do Sul. XXXIII Reunião Técnica Anual, do Feijão e IV Reunião Sul-Brasileira do Feijão. Santa Maria, 2000, 80 p.
- Conab – Companhia Nacional de Abastecimento. Consolidado e Acompanhamento da Safra 2003/2004, 3º Levantamento. Disponível em <http://www.conab.gov.br>. Acessado em Abril de 2004.
- CONTADOR, J.C. **Gestão de Operações**. Ed Edgar Blücher LTDA. São Paulo. 1997, 592p.
- COSTA, J.A. **Cultura da soja**. Porto Alegre. 1998. 233p.
- COSTA, L.C. & BARROS, A.H.C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.1, p.75-82, 2001.
- CROSS, H.Z. & ZUBER, M.S. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. **Agronomy Journal**, Madison, v.64, p.351-355, 1972.
- CUNHA, R.G., HAAS, J.C., DALMAGO, G.A., PASINATO, A. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência

- hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p.111-119, 1998.
- DASTANE, N.G. **Effective rainfall and irrigated water requirements**. Rome: FAO, 68p., 1974. (Irrigation and Drainage Paper, 25).
- DAVIES, W.J. & ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol.**, Stanford, v.42, p.55-76, 1991.
- De SOUZA, P.I., EGLI, D.B., BRUENING, W.P. Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, p. 807-812, 1997.
- DOORENBOS, J., & KASSAN, A.H. **Efectos del agua el rendimiento de los cultivos**. Roma : FAO, 212p., 1979. (Riego y drenage, 33).
- EGLI, D.B., MECKEL, L., PHILLIPS, R.E., RADCLIFFE, D., LEGGESTT, J.E. Moisture stress and N redistribution in soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.75, p.1027-1031, 1983.
- ELLIS, R.H.; SUMMERFIELD, R.J.; EDMEADES, G.O.; ROBERTS, E.H. Photoperiod, temperature and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. **Crop Science**, v. 32, p.1225-1232, 1992.
- EMATER-RS. Informativo Conjuntural. Porto Alegre, RS, 2003/04. Disponível em <http://www.emater.tche.br>. Acessado em Janeiro de 2004.
- FANCELLI, A.L. Ecofisiologia de plantas de lavouras. In: Carlesso et al. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Imprensa Universitária, p.59-83, 2001.
- FONTANA, D.C. & ALMEIDA, T.S. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, n.1, p.135-145, 2002.
- FONTANA, D.C., WEBER, E., DUCATI, J.R., BERLATO, M.A., GUASSELLI, L.A. & GUSSO, A. Monitoramento da cultura da soja no centro-sul do Brasil durante La Niña de 1998/2000. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, n.2, p.343-351, 2002.
- FRANKE, A.E. & DORFMAN, R. Necessidades de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.8, p.1675-1683, 2000.

- FRANKE, A.E. & DORFMAN, R. Viabilidade econômica da irrigação, sob condições de risco, em regiões de clima subtropical. I. Cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.12, p.2003-2013, 1998.
- FRANKE, A.E. **Balço hídrico na cultura da batata (*Solanum tuberosum* L.) sob três níveis de manejo da irrigação**. Santa Maria, RS. 92p. (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, 1990.
- GUIMARÃES, C.M. Efeitos fisiológicos do estresse hídrico. In: ZIMMERMANN, M.J. de O.; ROCHA, M. & YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba:POTAFÓS, p.157-174, 1988.
- GUIMARÃES, C.M.; BRUNINI, O.; STONE, L. F.; Adaptação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca I. Densidade e eficiência radicular. **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, v.31, n.6, p. 393-399, 1996.
- GUIMARÃES, C.M.; BRUNINI, O.; STONE, L.F. Adaptação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. I. Densidade e eficiência radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.6, p.393-399, 1999.
- HARGREAVES, G.H. Food, Water, and Possible World Crisis. In: **Proceedings of the 4th Decennial Symposium - National Irrigation Symposium**, Phoenix, Arizona: 187-194, 2000.
- HATFIELD, J.L. Plant–water interactions. In: WANG, W. et al. **Plants for Environmental Studies**. Lewis Publishers, New York, p.79-103, 1997.
- HAYATI, R., EGLI, D.B., CRAFTS-BRANDNER,S.J. Carbon and nitrogen supply during seed filling and leaf senescence in soybean. **Crop Science**, Madison v.35, p.1063-1069, 1995.
- HEINEMANN, A.B., G. HOOGENBOOM, G.A., GEORGIEV, R.T. de FARIA, and J.A. FRIZZONE. Center Pivot Irrigation Management Optimization of Dry Beans in Humid Areas. **Transaction of ASAE**, 43, p.1507-1516, 2000.
- HILLEL, D. **Applications of soil Physics**. Academic Press, New York, 1980.
- HOOGENBOOM, G., PETERSON, C.M., HUCK, M.G. Shoot growth rate of soybean as affected by drought stress. **Agronomy Journal**, Madison, v.79, p.598-607, 1987.

- IBGE – Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/042004040.sltm>. Acessado em Abril 2004.
- IBGE – **Censo Agropecuário 2000/01**. Aspectos da atividade agropecuária e extração vegetal. <http://www.ibge.gov.br>.
- JADOSKI, S.O. **População, espaçamento de plantas e manejo da irrigação para a cultura do feijão**. Santa Maria, UFSM. 1999. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, 1999.
- JONES, C.A., & J.R., KINIRY. **CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development**. Texas A&M Univ. Press, College Station, Texas, USA, 1986.
- KADHEM, F. A., SPECHT, J.E.; WILLIAMS, J.H. Soybean irrigation serially timed during stages R1 to R6. I. Agronomic responses. **Agronomy Journal** Madison, v.69, p.291-298, 1985.
- KASELE, I.N.; NYIRENDA, F.; SHANAHAN, F.J. et al. Ethephon alters corn growth, water use, and grain yield under drought stress. **Agronomy Journal**, Madison, v.86, p.283-288, 1994.
- KINDLER, J. Modeling derived demand for irrigation water. **Agricultural Water Research**, v.13, p.403-410, 1988.
- KISH, A.J. & OGLE, W.L. Improving the heat unit system in predicting maturity date of snap beans. **Hortscience**, Virginia, v.15, n.2, p.140-141, 1980.
- KORTE, L.L., SPECHT, J.E., WILLIAMS, J.H., SORENSEN, R.C. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny. II. Yield component responses. **Crop Science**, Madison, v.23, p.528-533, 1983a.
- KORTE, L.L., SPECHT, J.E., WILLIAMS, J.H., SORENSEN, R.C. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny. I. Agronomic responses. **Crop Science**, Madison, v.23, p.521-527, 1983b.
- LEVITT, J. **Response of plants to environmental stress. II: Water radiation, salt and other stress**. New York: Academic Press, 1980. 606p.

- MAEHLER, A. R., PIRES, J.L.F., COSTA, J.A. & FERREIRA, F.G. Potencial de rendimento da soja a ontogenia em razão da irrigação e arranjo de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.2, p.225-231, 2003.
- MALUF, J. R. T.; CAIAFFO, M. R. R. Zoneamento agroclimático da cultura de feijão no Estado do Rio Grande do Sul: recomendação de períodos favoráveis de semeadura por região agroecológica. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 6., 1999, Salvador. **Resumos...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. p. 455-458.
- MALUF, J.R.T., MATZENAUER, R. & CAIAFO, M.R. Zoneamento agroclimático da cultura de milho por épocas de semeadura, no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.6, n.1, p.39-54, 2000.
- MARCHETTI, V. **Risco e decisão em investimento produtivo**. Porto Alegre:UFRGS, 1995, 95p.
- MATZENAUER, R. & SUTILI, V.R. **A água na cultura do milho**. IPAGRO Informa, Porto Alegre, n.26m p.17-32, 1983.
- MATZENAUER, R. **Evapotranspiração do milho (*Zea Mays L.*) e suas relações com fórmulas e parâmetros meteorológicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1980. 128 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1980.
- MATZENAUER, R., BEGAMASCHI, H., BERLATO, M.A., RIBOLDI, J. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**., Santa Maria, v.3, p.85-92, 1995.
- MATZENAUER, R., BERGAMASCHI, H., BERLATO, M.A. Evapotranspiração da cultura do milho. II – Relações com a evaporação do tanque classe “A”, com a evapotranspiração de referência e com a radiação solar global, em três épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n.1, p.15-21, 1998.
- MATZENAUER, R., MALUF, J.R.T., BARNI, N.A., MACHADO, F.L. & ROSA, F.S. Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura do milho na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, n.2, p.263-273, 2000.
- MATZENAUER, R., PONS, A.L., MALUF, J.R.T. & BUENO, A.C. Efeito da irrigação, adubação e densidade de plantas de milho. I. Rendimento de grãos e componentes do rendimento. In: **REUNIÃO TÉCNICA**

- ANUAL DO MILHO**, 33. Porto Alegre:IPAGRO/EMATER, p.91-100, 1989.
- MATZENAUER, R., WESTPHALEN, S.L., BERGAMASCHI, H., SUTILI, V.R. Evapotranspiração do milho (*Zea mays* L.) e sua relação com a evaporação do tanque classe A. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.17, n.2, p.273-295. 1981.
- MATZENAUER, R.; MALUF, L.R.T. & BUENO, A .C. Relações entre a evapotranspiração máxima do feijoeiro com a evapotranspiração de referência com a radiação solar global. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.3, p.173-178, 1999.
- McCREE, K.J. & FERNANDEZ, C.J. Simulation model for studying physiological water stress responses of whole plants. **Crop Science**, Madison, v.29, p.353-360, 1989.
- MOMEN, N.N., CARLSON, R.E., SHAW, R.H., ARJMAND, O. Moisture stress effects on the yield components of two soybean cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v.76, p.86-90, 1979.
- MOREIRA, J.A.; SILVEIRA, P.M. & STONE, L.F. Irrigação. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F. & ZIMMERMANN, M.J.O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafós, p.465-522, 1996.
- MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Seção de Geografia, 1961, 46 p.
- MOTA, F.S. da. BEIRSDORF, M.I.C., ACOSTA, M.J.C. MOTTA., W.A. & WESTPHALEN, S.L. **Zoneamento agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Pelotas, IPEAS, 1974, v2. 122p.
- MULLER, B.L. **Rendimento do milho em função da tensão da água no solo**. Santa Maria, RS, 1989. 77p. (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria. 1989.
- NeSMITH, D.S.; HARGROVE, W.L.; RADCLIFFE, E.W.; et al. Tillage and residue management effects on properties of an ultisol and double-cropped soybean production. **Agronomy Journal**, v. 79, p. 570-576, 1987.
- NIED, A.H. **Balanco hídrico diário do solo simulado para diferentes épocas de semeadura do milho em Santa Maria, RS**. Santa Maria, RS. 73 p. (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria. 2003.

- NIELD, R.E.; LOGAN, J. & CARDENAS, A. Growing seasons and phenological response of sorghum as determined from simple climatic data. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.3, p.35-48, 1983.
- NORMAN, M. J. T.; PEARSON, C. J.; SEARLE, P. G. E. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) . In: NORMAN, M. J. T.; PEARSON, C. J.; SEARLE, P. G. E. **The ecology of tropical food crops**. Cambridge: Cambridge University Press, p.208-224, 1995.
- OLIVEIRA, F. A. de; SILVA, J.J.S. Evapotranspiração, índice de área foliar e desenvolvimento radicular do feijão irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, Brasília, v.25, p.317-322, 1990.
- PANDEY, R.K; HERRERA, W.A.T.; PENDLETON, J.W. Drought response of grain legumes under irrigation gradient. I. Yield and yield components. **Agronomy Journal**, v.76, p.549-553, 1984.
- PETRY, **Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja**. Santa Maria, RS. 125 p. (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria. 2000.
- PETRY, M.T. Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja. Santa Maria, RS. 125 p. (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria. 2000.
- PETRY, M.T.; MELO, G.L.; CARLESSO, R.; MICHELON, C.J. & ROSA, G.M. da. Crop growth, development and grain yield of soybean submitted to different irrigation management. In: **2003 ANNUAL INTERNATIONAL MEETING**, 2003, Las Vegas. 2003 Annual International Meeting. 2003.
- POMMERENING, E.H.; **Difusão do vapor d'água e modificações morfológicas em folhas de milho (*Zea mays*, L.) submetida a diferentes tensões de água no solo**. Santa Maria, RS, 1989, (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria. 1989.
- PRELA, A. & RIBEIRO, A.M.A. Determinação de graus-dia acumulados e sua aplicação no planejamento do cultivo de feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) para Londrina – PR. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, n.1, p.83-86, 2002.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. 1 ed. São Paulo, Manole, 1990. 188p.

- REINERT, D.J., REICHERT, J.M. & SILVA, V.R. Propriedades físicas dos solos em sistema plantio direto irrigado. In: Carlesso et al. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Imprensa Universitária, p.114-131, 2001.
- REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL. Recomendações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina 2000/2001. Santa Maria: UFSM, 2000. 148 p.
- RITCHIE, J.T. & NESMITH, D.S. Temperature and crop development. In: HANKS, J. & RITCHIE, J.T. **Modeling plant and soil systems**. Agronomy Monograph, 31. ASA, CSSA & SSSA, Madison, 1991.
- RITCHIE, J.T. Using simulation models for predicting crop performance. **Symposium on the role of soils systems analysis for technology transfer**. August 1986. ISSS Congress, Hamburg, FRG, 1986.
- RITCHIE, J.T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant and Soil**, Dorbrecht, v.58, p.81-96, 1981.
- RODRIGUES. O.; DIDONET, A . D.; LHAMBY, J.C.B.; BERTAGNOLLI, P.F. & LUZ, J.S. Resposta quantitativa dos florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.3, p.431-437, 2001.
- ROSA, G.M. **Viabilidade econômica da implantação de sistemas de irrigação no Planalto Médio do Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS. 125 p. (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Maria. 2000.
- RUBIN, R.B. **Produtividade do feijoeiro irrigado influenciada pelo armazenamento de água no solo e métodos de preparo do solo**. Santa Maria, RS, 82 p. (Mestrado em Agronomia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria, 2003.
- SANTOS, R.F. **Comportamento morfo-fisiológico de plantas submetidas a déficit hídrico em solos de diferentes texturas**. Santa Maria, UFSM, 1997. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, 1997.
- SANTOS, R.F. & CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.287-294, 1999.
- SCHUH, F.E. **Considerações teóricas sobre custos de produção na agricultura**. **Agricultura em São Paulo**. SP. p.97-121, 1976.

- SHUSSLER, J.R. & WESTGATE, M.E. Maize kernel set at low water potential. II. Sensitivity to reduced assimilates during early kernel growth. **Crop Science**, Madison, v.31, p. 1189-1195, 1991.
- SILVA, R.I. da & DHEIN, R.A. Viabilização sócio-econômica da rotação de culturas e da adubação verde na CONTRIJUÍ. In: **REUNIÃO CENTRO-SUL DE ADUBAÇÃO VERDE E ROTAÇÃO DE CULTURAS**. 4., 1993, Passo Fundo, RS. Anais...Passo Fundo:Embrapa-CNPT, 1994, p.15-27.
- SINCLAIR, R.T., HAMMOND, L.C., HARRISON, J. Extractable soil water transpiration rate of soybean on sandy soils. **Agronomy Journal**, Madison, v.90, p.363-368, 1998.
- SMITH, R.C.G.; STEINER, J.L.; MEYER, W.S. & ERSKINE, D. Influence of season to season variability in weather on irrigation scheduling of wheat: A simulation study. **Irrigation Science**, v.6, p.241-251, 1985.
- STEINMETZ, S. Evapotranspiração máxima no cultivo de feijão de inverno. *Pesquisa em Foco*, n.8, 1997.
- STEWART, D.W., DWYER, L.M. & CARRIGAN, L.L. Phenological temperature response of maize. **Agronomy Journal**, Madison, v.90, p. 73-79, 1998.
- STOCKLE, C.; CAMPBELL, G. A simulation model for predicting effect of water stress on yield: and example using corn. In: HILLEL, D. **Advances in Irrigation**. New York, Academic Press, v.3, 1985.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E. **Plant Physiology**. Califórnia. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Redwood City, 1991.
- TARDIEU, F. & DAVIES, W.J. Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status. **Plant Physiology**, Lancaster, v.98, 540-545, 1992.
- THOMAS, A.L. & COSTA, J.A. Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.9, p.1389-1396, 1994.
- TOJO-SOLER, C., FOLEGATTI, M.V. & FARIA, R.T. de. Uso do modelo CERES-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho "safrinha". **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.90, n.21, p.339-346, 2001.
- VENTIMIGLIA, L.A., COSTA, J.A.; THOMAS, A.L. & PIRES, J.L.F. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de

fósforo no solo e dos espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.2, p, 195-199, 1999.

VILLALOBOS, F.J, & FERERES, E. A simulation model for irrigation scheduling under variable rainfall. **Transactions of ASAE**. v. 32, n.1, p.181-188, 1989.

WARINGTON, J.J. & KANEMASU, E.T. Corn growth response to temperature and photoperiod. I. Seedling, emergence, tassel initiation and anthesis. **Agronomy Journal**, Madison, n.75, p. 154-180, 1983.

WHISLER, F.D., ACOCK, B., BAKER, D.N., FYE, R.E., HODGES, H.F., LAMBER, J.R., LEMMON, H.E., McKINION, J.M. & REDDY, V.R. Crop simulation models in agronomic systems. **Advances of Agronomy**, v.40, p.141-208, 1986.

WILKERSON, G.G.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J. & BUOL, G.S. Photoperiodically sensitive interval in time to flower of soybean. **Crop Science**, Madison, v.29, p.721-726, 1989.

WOLFE, D.W.; HERDERSON, D.W.; HSIAO, T.C. et al. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize: I. Leaf area duration, nitrogen distribution, and yield. **Agronomy Journal**, Madison, n.80, p. 859-864, 1988.

WOLSCHICK, D. **Perdas de nitrogênio por lixiviação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho em condições de excesso hídrico**. Santa Maria, UFSM. 2000. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, 2000.

WRIGHT, G.C.; SMITH, R.G.; McWILLIAM, J.R. Differences between two grain sorghum genotypes in adaptation to drought stress. I. Crop growth rate and yield response. **Australian Journal os Agricultural Research**, v.34, p.615-626, 1983.

ANEXOS

Anexo I. Custo operacional para produzir uma saca de milho em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 16,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Expectativa de rendimento de grãos (sc ha ⁻¹) | | | | | |
|--------------|---|-------|-------|------|------|------|
| | 33 | 67 | 100 | 133 | 167 | 200 |
| 50 | 27,30 | 14,86 | 11,30 | 9,83 | 8,66 | 7,82 |
| 100 | 26,36 | 14,27 | 11,04 | 9,73 | 8,66 | 7,88 |
| 200 | 25,89 | 13,97 | 10,90 | 9,67 | 8,65 | 7,91 |
| 400 | 25,66 | 13,82 | 10,84 | 9,65 | 8,65 | 7,93 |
| 800 | 25,54 | 13,75 | 10,81 | 9,63 | 8,65 | 7,93 |
| 1600 | 25,48 | 13,71 | 10,79 | 9,63 | 8,65 | 7,94 |

Anexo II. Custo operacional para produzir uma saca de milho em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 24,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Expectativa de rendimento de grãos (sc ha ⁻¹) | | | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|------|------|
| | 33 | 67 | 100 | 133 | 167 | 200 |
| 50 | 27,92 | 15,42 | 11,94 | 10,45 | 9,28 | 8,45 |
| 100 | 27,18 | 15,05 | 11,86 | 10,54 | 9,47 | 8,70 |
| 200 | 26,80 | 14,87 | 11,82 | 10,58 | 9,56 | 8,82 |
| 400 | 26,62 | 14,78 | 11,80 | 10,61 | 9,61 | 8,89 |
| 800 | 26,52 | 14,73 | 11,79 | 10,62 | 9,63 | 8,92 |
| 1600 | 26,48 | 14,71 | 11,79 | 10,62 | 9,64 | 8,93 |

Anexo III. Custo operacional para produzir uma saca de feijão em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto R\$ 50,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Expectativa de rendimento de grãos (sc ha ⁻¹) | | | | | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 9 | 17 | 25 | 33 | 42 | 50 | 58 | 67 |
| 50 | 114,04 | 62,38 | 43,82 | 36,62 | 31,33 | 28,37 | 26,03 | 23,95 |
| 100 | 107,96 | 59,73 | 42,40 | 35,85 | 30,98 | 28,26 | 26,11 | 24,18 |
| 200 | 104,92 | 58,41 | 41,70 | 35,46 | 30,81 | 28,21 | 26,15 | 24,29 |
| 400 | 103,40 | 57,74 | 41,34 | 35,26 | 30,72 | 28,19 | 26,16 | 24,35 |
| 800 | 102,64 | 57,41 | 41,17 | 35,16 | 30,67 | 28,17 | 26,17 | 24,38 |
| 1600 | 102,26 | 57,25 | 41,08 | 35,12 | 30,65 | 28,17 | 26,18 | 24,39 |

Anexo IV. Custo operacional para produzir uma saca de feijão em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 90,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Expectativa de rendimento de grãos (sc ha ⁻¹) | | | | | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 9 | 17 | 25 | 33 | 42 | 50 | 58 | 67 |
| 50 | 117,46 | 65,80 | 47,22 | 40,04 | 34,75 | 31,78 | 29,44 | 27,36 |
| 100 | 112,34 | 64,11 | 46,78 | 40,23 | 35,36 | 32,65 | 30,49 | 28,56 |
| 200 | 109,78 | 63,27 | 46,56 | 40,32 | 35,67 | 33,08 | 31,01 | 29,16 |
| 400 | 108,51 | 62,85 | 46,45 | 40,37 | 35,82 | 33,29 | 31,27 | 29,46 |
| 800 | 107,87 | 62,64 | 46,39 | 40,39 | 35,90 | 33,40 | 31,40 | 29,61 |
| 1600 | 107,55 | 62,54 | 46,37 | 40,40 | 35,94 | 33,46 | 31,47 | 29,68 |

Anexo V. Custo operacional para produzir uma saca de soja em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 30,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Expectativa de rendimento de grãos (sc ha ⁻¹) | | | | | | | | | | | |
|--------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |
| 50 | 43,0 | 34,3 | 29,0 | 25,5 | 23,0 | 21,1 | 19,2 | 17,6 | 17,5 | 16,4 | 16,7 | 15,8 |
| 100 | 39,4 | 31,7 | 27,1 | 24,0 | 21,8 | 20,2 | 18,5 | 17,1 | 17,1 | 16,0 | 16,4 | 15,6 |
| 200 | 37,6 | 30,4 | 26,2 | 23,3 | 21,3 | 19,7 | 18,1 | 16,8 | 16,8 | 15,8 | 16,3 | 15,5 |
| 400 | 36,7 | 29,8 | 25,7 | 22,9 | 21,0 | 19,5 | 17,9 | 16,6 | 16,7 | 15,7 | 16,2 | 15,4 |
| 800 | 36,2 | 29,5 | 25,5 | 22,8 | 20,8 | 19,4 | 17,8 | 16,5 | 16,7 | 15,7 | 16,2 | 15,4 |
| 1600 | 36,0 | 29,3 | 25,3 | 22,7 | 20,8 | 19,3 | 17,8 | 16,5 | 16,6 | 15,7 | 16,2 | 15,4 |

Anexo VI. Custo operacional para produzir uma saca de soja em diferentes áreas e preço médio de comercialização do produto de R\$ 50,00, para valores calculados (símbolos) e ajustados (linha). Santa Maria, RS, 2004.

| Área (ha) | Expectativa de rendimento de grãos (sc ha ⁻¹) | | | | | | | | | | | |
|--------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |
| 50 | 45,0 | 35,7 | 30,9 | 27,4 | 24,9 | 23,0 | 21,1 | 19,6 | 19,5 | 18,3 | 18,6 | 17,7 |
| 100 | 41,8 | 33,3 | 29,5 | 26,4 | 24,3 | 22,6 | 20,9 | 19,5 | 19,5 | 18,4 | 18,8 | 18,0 |
| 200 | 40,2 | 32,1 | 28,8 | 26,0 | 23,9 | 22,4 | 20,7 | 19,4 | 19,5 | 18,5 | 18,9 | 18,1 |
| 400 | 39,4 | 31,5 | 28,5 | 25,7 | 23,8 | 22,3 | 20,7 | 19,4 | 19,5 | 18,5 | 19,0 | 18,2 |
| 800 | 39,0 | 31,2 | 28,3 | 25,6 | 23,7 | 22,2 | 20,6 | 19,4 | 19,5 | 18,5 | 19,0 | 18,2 |
| 1600 | 38,8 | 31,0 | 28,2 | 25,5 | 23,6 | 22,2 | 20,6 | 19,4 | 19,5 | 18,5 | 19,0 | 18,2 |

Anexo VII. Receita líquida de 400 hectares de milho, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 16,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Área | Níveis de frustração (%) | | | | |
|------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 33 | -127,50 | -169,74 | -211,98 | -254,22 | -296,46 |
| 67 | 58,30 | -27,46 | -113,22 | -198,98 | -284,74 |
| 100 | 269,50 | 141,50 | 13,50 | -114,50 | -242,50 |
| 133 | 338,00 | 167,76 | -2,48 | -172,72 | -342,96 |
| 167 | 490,88 | 277,12 | 63,36 | -150,40 | -364,16 |
| 200 | 645,98 | 389,98 | 133,98 | -122,02 | -378,02 |

* (multiplicado por 1000).

Anexo VIII. Receita líquida de 1600 hectares de milho, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 24,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Área | Níveis de frustração (%) | | | | |
|------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 33 | 566,96 | 313,52 | 60,08 | -193,36 | -446,80 |
| 67 | 1783,32 | 1268,76 | 754,20 | 239,64 | -274,92 |
| 100 | 2896,54 | 2128,54 | 1360,54 | 592,54 | -175,46 |
| 133 | 3977,51 | 2956,07 | 1934,63 | 913,19 | -108,25 |
| 167 | 5126,25 | 3843,69 | 2561,13 | 1278,57 | -3,99 |
| 200 | 6253,05 | 4717,05 | 3181,05 | 1645,05 | 109,05 |

* (multiplicado por 1000).

Anexo IX. Receita líquida de 200 hectares de feijão, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 50,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Área | Níveis de frustração (%) | | | | |
|------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 9 | -98,85 | -116,85 | -134,85 | -152,85 | -170,85 |
| 17 | -28,58 | -62,58 | -96,58 | -130,58 | -164,58 |
| 25 | 41,52 | -8,48 | -58,48 | -108,48 | -158,48 |
| 33 | 95,99 | 29,99 | -36,01 | -102,01 | -168,01 |
| 42 | 161,24 | 77,24 | -6,76 | -90,76 | -174,76 |
| 50 | 217,88 | 117,88 | 17,88 | -82,12 | -182,12 |
| 58 | 276,72 | 160,72 | 44,72 | -71,28 | -187,28 |
| 67 | 344,50 | 210,50 | 76,50 | -57,50 | -191,50 |

* (multiplicado por 1000).

Anexo X. Receita líquida de 800 hectares de feijão, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de R\$ 90,00. Santa Maria, RS, 2004.

| Área | Níveis de frustração (%) | | | | |
|------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 9 | -128,63 | -258,23 | -387,83 | -517,43 | -647,03 |
| 17 | 372,08 | 127,28 | -117,52 | -362,32 | -607,12 |
| 25 | 872,13 | 512,13 | 152,13 | -207,87 | -567,87 |
| 33 | 1309,65 | 834,45 | 359,25 | -115,95 | -591,15 |
| 42 | 1817,73 | 1212,93 | 608,13 | 3,33 | -601,47 |
| 50 | 2263,93 | 1543,93 | 823,93 | 103,93 | -616,07 |
| 58 | 2718,90 | 1883,70 | 1048,50 | 213,30 | -621,90 |
| 67 | 3237,14 | 2272,34 | 1307,54 | 342,74 | -622,06 |

* (multiplicado por 1000).

Anexo XI. Receita líquida de 50 hectares de soja, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de 30,00 R\$. Santa Maria, RS, 2004.

| Área | Níveis de frustração (%) | | | | |
|------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 15 | -9,79 | -14,29 | -18,79 | -23,29 | -27,79 |
| 20 | -4,28 | -10,28 | -16,28 | -22,28 | -28,28 |
| 25 | 1,23 | -6,27 | -13,77 | -21,27 | -28,77 |
| 30 | 6,74 | -2,26 | -11,26 | -20,26 | -29,26 |
| 35 | 12,25 | 1,75 | -8,75 | -19,25 | -29,75 |
| 40 | 17,76 | 5,76 | -6,24 | -18,24 | -30,24 |
| 45 | 24,33 | 10,83 | -2,67 | -16,17 | -29,67 |
| 50 | 30,90 | 15,90 | 0,90 | -14,10 | -29,10 |
| 55 | 34,29 | 17,79 | 1,29 | -15,21 | -31,71 |
| 60 | 40,86 | 22,86 | 4,86 | -13,14 | -31,14 |
| 65 | 43,19 | 23,69 | 4,19 | -15,31 | -34,81 |
| 70 | 49,76 | 28,76 | 7,76 | -13,24 | -34,24 |

• (multiplicado por 1000).

Anexo XII. Receita líquida de 200 hectares de soja, para diferentes rendimentos de grãos e preço médio de comercialização do produto de 50,00 R\$. Santa Maria, RS, 2004.

| Área | Níveis de frustração (%) | | | | |
|------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| 15 | 37,28 | 7,28 | -22,72 | -52,72 | -82,72 |
| 20 | 78,23 | 38,23 | -1,77 | -41,77 | -81,77 |
| 25 | 119,18 | 69,18 | 19,18 | -30,82 | -80,82 |
| 30 | 160,12 | 100,12 | 40,12 | -19,88 | -79,88 |
| 35 | 201,07 | 131,07 | 61,07 | -8,93 | -78,93 |
| 40 | 242,02 | 162,02 | 82,02 | 2,02 | -77,98 |
| 45 | 287,20 | 197,20 | 107,20 | 17,20 | -72,80 |
| 50 | 332,39 | 232,39 | 132,39 | 32,39 | -67,61 |
| 55 | 364,87 | 254,87 | 144,87 | 34,87 | -75,13 |
| 60 | 410,05 | 290,05 | 170,05 | 50,05 | -69,95 |
| 65 | 438,31 | 308,31 | 178,31 | 48,31 | -81,69 |
| 70 | 483,49 | 343,49 | 203,49 | 63,49 | -76,51 |

* (multiplicado por 1000).