

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO
HÍDRICO PARA A CULTURA DA SOJA EM
PLANOSSOLOS DA REGIÃO CENTRAL DO RIO
GRANDE DO SUL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Mateus Possebon Bortoluzzi

Santa Maria, RS, Brasil

2015

**PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO
HÍDRICO PARA A CULTURA DA SOJA EM PLANOSSOLOS
DA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Mateus Possebon Bortoluzzi

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr. Arno Bernardo Heldwein

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bortoluzzi, Mateus Possebon
Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico para a cultura da soja em planossolos da região central do Rio Grande do Sul / Mateus Possebon Bortoluzzi.-2015.
87 p.; 30cm

Orientador: Arno Bernardo Heldwein
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, RS, 2015

1. Glycine max 2. Balanço hídrico 3. Datas de semeadura
4. Risco agroclimático 5. Análise numérica. Função
densidade de probabilidade I. Heldwein, Arno Bernardo
II. Título.

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Mateus Possebon Bortoluzzi. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: mateusbortoluzzi@hotmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Agronomia**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO HÍDRICO PARA
A CULTURA DA SOJA EM PLANOSSOLOS DA REGIÃO CENTRAL
DO RIO GRANDE DO SUL**

elaborada por
Mateus Possebon Bortoluzzi

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Agronomia

COMISSÃO EXAMINADORA:

Arno Bernardo Heldwein, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Isabel Lago, Dr. (UFSM)

Gustavo Trentin, Dr. (EMBRAPA)

Santa Maria, 23 de fevereiro de 2014.

Dedicatória

“ [...] Dentro das filosofias
Dos confúcios galponeiros
Domadores, carreteiros
Que escutei nas noites frias
Acho que a fieira dos dias
Não vale a pena contar
E chego mesmo a pensar
Olhando o brasedo perto
Que a vida é um crédito aberto
Que é preciso utilizar.

Guardar dias pro futuro
É sempre a grande tolice
O juro é sempre a velhice
E de que adianta este juro
Se ao índio mais queixo duro
O tempo amansa no assédio
Gastar é o melhor remédio
No repecho e na descida
Porque na conta da vida
Não adianta saldo médio!”

Jayme Caetano Braun

Dedico

A Deus, à Nossa Senhora de Fátima,
aos meus pais Irineo e Lenir
e à minha irmã Valesca.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre presente, por todas as graças recebidas e à Nossa Senhora, que com seu amor de mãe, ampara, protege e cuida da minha vida.

Aos meus pais Irineo e Lenir, meu eterno agradecimento pelo amor e carinho, por permitir, dar suporte e sempre incentivar a realização de tudo que estivesse relacionado à educação, em especial, deste curso de mestrado.

À minha irmã Valesca, pelo amor incondicional, pelos conselhos, incentivos, preocupação e torcida que contribuíram também para o melhor desenvolvimento desta dissertação.

À minha madrinha Ivani, pelo companheirismo, convivência e apoio, sempre primando pelo meu bem-estar.

Ao professor Arno Bernardo Heldwein, pelo exemplo diário de profissionalismo, dedicação, honestidade e ética. Pela amizade, confiança, compreensão e principalmente pelos conhecimentos compartilhados.

Ao amigo e professor Roberto Trentin por disponibilizar os dados de modelagem da cultura e pelo seu empenho para sanar dúvidas e pela orientação na condução do trabalho.

Aos colegas Dionéia Pitol Lucas e Ivan Maldaner, pela amizade e pelo auxílio na simulação e análise dos dados, sempre dispostos a ajudar da melhor maneira possível com muita dedicação e paciência.

Ao professor Evandro Zanini Righi, pela amizade e pelas contribuições durante a realização do trabalho.

À professora Fernanda e ao produtor Sérgio, pela confiança e amizade e por disponibilizarem sua propriedade para a realização de experimento.

Ao professor Enio Marchesan pela amizade e pelos ensinamentos transmitidos, assim como por disponibilizar a área experimental da “várzea” para coleta de dados.

Aos amigos e colegas do setor de Agrometeorologia da UFSM, Luis Loose, Fernando Hinnah, Gabriel Brixner, Jocélia Rosa da Silva, Júnior Somavilla, Mateus Leonardi, Tiago Ferrera, Samuel Kovaleski, Leidiana da Rocha, Francilene Tartaglia, Cristine Schons, Drica Amarante e Cadmo Dos Santos, pela amizade, convivência e esclarecimentos de dúvidas durante o trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela atenção e pelos ensinamentos transmitidos.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A todas as pessoas que não foram mencionadas, mas que de alguma forma auxiliaram na realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Muito obrigado!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO HÍDRICO PARA A CULTURA DA SOJA EM PLANOSSOLOS DA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

AUTOR: MATEUS POSSEBON BORTOLUZZI

ORIENTADOR: ARNO BERNARDO HELDWEIN

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 23 de fevereiro de 2015.

A expansão da área de produção de soja em Planossolos é bastante limitada pela elevada frequência de ocorrência de excesso hídrico, ocasionando redução na disponibilidade de oxigênio na zona radicular, redução da fotossíntese, assim como da produtividade, dependendo da duração do excesso e do subperíodo de desenvolvimento das plantas em que ocorre. O objetivo deste trabalho foi identificar datas de semeadura com menor risco de ocorrência de excesso hídrico para os subperíodos e ciclo da cultura, considerando três grupos de maturidade relativa de cultivares de soja e a capacidade de armazenamento de água dos Planossolos da região central do Rio Grande do Sul. A simulação do desenvolvimento da soja e o cálculo do balanço hídrico sequencial diário da cultura foram realizados em diferentes datas de semeadura de cada ano do período de agosto de 1968 a julho de 2012. Assim, a variação do armazenamento hídrico no solo e a ocorrência de excedentes hídricos nos diferentes subperíodos de desenvolvimento da soja foram quantificadas para cada data de semeadura. Os dados de dias de excesso hídrico foram submetidos à análise de variância e teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade de erro, sendo que as fontes de variação constaram das datas de semeadura, os solos e a sua interação. Os dados também foram submetidos à análise de distribuição de probabilidades, utilizando-se os testes qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov para verificar a função densidade probabilidade que melhor se ajustou à distribuição dos dados. O maior número de ajustes para o ciclo de desenvolvimento e para os subperíodos foram obtidos para as funções gama e weibull, respectivamente. As semeaduras realizadas no mês de outubro são as de maior risco de ocorrência de excesso hídrico ao longo do ciclo da cultura. O subperíodo semeadura-emergência mostra-se como o mais limitante para a definição da data de semeadura. Devido ao menor risco de ocorrência de excesso hídrico neste subperíodo as semeaduras realizadas após o dia primeiro de novembro são as mais favoráveis para a semeadura da soja em Planossolos.

Palavras-chave: *Glycine max*. Balanço hídrico. Datas de semeadura. Risco agroclimático. Análise numérica. Função densidade de probabilidade.

ABSTRACT

Master Dissertation
Graduate Program in Agronomy
Federal University of Santa Maria

PROBABILITY OF WATER EXCESS OCCURRENCE IN SOYBEAN CROP AT PLANOSOLS IN THE CENTRAL REGION OF RIO GRANDE DO SUL

AUTOR: MATEUS POSSEBON BORTOLUZZI

ADVISER: ARNO BERNARDO HELDWEIN

Location and Date of Defense: Santa Maria, February 23th, 2015.

The expansion of soybean production area in Planosols is rather limited by the high frequency of occurrence of excess water, leading to reduced availability of oxygen in the root zone, reduced photosynthesis, as well as productivity, depending on its duration and developmental phase of plants it occurs. The aim of this study was to identify sowing dates with smaller risk of excess water to the subperiods and crop cycle, taking into account three relative maturity groups of soybean cultivars and water storage capacity of Planosols in the central region of Rio Grande do Sul State. The simulation of soybean development and the calculation of crop daily sequential water balance were performed at different sowing dates in each year from August 1968 to July 2012. Thus, the change of soil water storage and the water surpluses in the different soybean developmental phases were quantified for each sowing date. Data from days with excess water were submitted to analysis of variance and Scott-Knott test at 5% probability, and the sources of variation were sowing dates, soils and their interaction. These data also were submitted to the probability distribution analysis, using the chi-square and Kolmogorov-Smirnov tests to verify the probability density function that best fit the data distribution. The greatest number of fittings for the development cycle and subperiods were obtained by the Gamma and Weibull functions, respectively. October's sowings have the highest risk of excess water during the crop cycle. Subperiod sowing-emergence shows up as the most limiting to define the sowing date. Due to the lowest risk of excess water in this subperiod, the sowing carried out after November 1st are the most favorable for soybean sowing in Planosols.

Key-words: *Glycine max* (L.) Merrill. Water balance. Sowing dates. Climate risk. Numerical analysis. Historical series. Probability density function.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Datas de semeadura utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturidade relativa (GMR).....28
- Tabela 2. Variáveis meteorológicas obtidas do banco de dados da Estação Climatológica Principal de Santa Maria.....30
- Tabela 3. Variáveis meteorológicas estimadas a partir de dados meteorológicos medidos e suas respectivas funções matemáticas.31
- Tabela 4. Coeficientes de cultura (Kc) utilizados para determinação da evapotranspiração máxima da cultura da soja e variação da capacidade de água disponível (CAD) conforme os subperíodos compreendidos entre as datas de semeadura (S), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8)..33
- Tabela 5. Classificação dos anos em função do fenômeno ENOS ocorrido no período de 1968 a 2012.....35
- Tabela 6. Número médio de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja, considerando os grupos de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, para as datas de semeadura simuladas em Planossolos, compreendidas entre 01 de outubro e 31 de dezembro, em cada ano do período de 1968 a 2012.....41
- Tabela 7. Número médio de dias com excesso hídrico no ciclo de desenvolvimento da soja para os grupos de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, calculados para as datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012, para os solos São Gabriel e Vacacaí.42
- Tabela 8. Número médio de dias com excesso hídrico* nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da matura maturação (R7) e maturação plena (R8), em Planossolos, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.....43
- Tabela 9. Número médio de dias com excesso hídrico* nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), ocorridos em datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012 para os solos São Gabriel e Vacacaí, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR).44

- Tabela 10. Frequência (%) de casos em que as funções densidade de probabilidade (fdp) gama, lognormal, normal, weibull e exponencial apresentaram ajuste estatisticamente significativo para a variável dias com excesso hídrico no ciclo e nos subperíodos da cultura da soja em Planossolos, para semeaduras simuladas de 1968 a 2012.....46
- Tabela 11. Funções densidade de probabilidade (fdp) ajustadas para determinar o número de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja nos solos São Gabriel e Vacacaí nas diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR).....47
- Tabela 12. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo São Gabriel, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 01 de outubro a 11 de novembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.....49
- Tabela 13. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo São Gabriel, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 21 de novembro a 31 de dezembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.50
- Tabela 14. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo Vacacaí, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 01 de outubro a 11 de novembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012. ..51
- Tabela 15. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo Vacacaí, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 21 de novembro a 31 de dezembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.....52

- Tabela 16. Número de anos com registro de ocorrência de excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo São Gabriel, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR) e as datas de semeadura (DS) simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.....53
- Tabela 17. Número de anos com registro de ocorrência de excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo Vacacaí, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR) e as datas de semeadura (DS) simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.....54
- Tabela 18. Número médio de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja, dos grupos de maturidade relativa 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, ocorridos em datas de semeadura simuladas em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012, em Planossolos.....65
- Tabela 19. Número médio de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja, dos Grupos de Maturidade Relativa 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, ocorridos em cada data de semeadura simulada em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012, para os solos São Gabriel e Vacacaí.66

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Localização da área de abrangência da análise de risco de excesso hídrico no solo para a cultura da soja, na região central do Rio Grande do Sul. Fonte: Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Rio Grande do Sul (Secretaria da Agricultura e Abastecimento 1994, extraído e adaptado de CARDOSO, 2005).25
- Figura 2. Distribuição espacial das Unidades de Mapeamento dos Solos da região Central do Rio Grande do Sul. Fonte: extraído e adaptado de Cardoso (2005).26
- Figura 3. Umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) de amostras coletadas após o final da ocorrência de precipitação em dois Planossolos com cultivo de soja, localizados em Santa Maria (A, C, E) e São Sepé (B, D), no ano agrícola 2013/14.38
- Figura 4. Condição da superfície do solo em 21 de março de 2014, 48 horas após o final do evento de 150 mm de precipitação, no município de São Sepé, RS.39
- Figura 5. Número máximo de dias de excesso hídrico prováveis de ocorrerem durante o ciclo de desenvolvimento da soja, dos grupos de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), considerando dez datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.48
- Figura 6. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2) e primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1) de grupo de maturidade relativa 5.9-6.8, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.56
- Figura 7. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2) e primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1) de grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em oito datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.57
- Figura 8. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2) e primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1) de grupo de maturidade relativa 7.4-8.0, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em dez datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.58

- Figura 9. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja início da floração – início do enchimento de grãos (R1-R5), início do enchimento de grãos - início da maturação (R5-R7) e início da maturação – maturação fisiológica (R7-R8) de grupo de maturidade relativa 5.9-6.8, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.61
- Figura 10. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja início da floração – início do enchimento de grãos (R1-R5), início do enchimento de grãos – início da maturação (R5-R7) e início da maturação – maturação fisiológica (R7-R8) de grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em oito datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.62
- Figura 11. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja início da floração – início do enchimento de grãos (R1-R5), início do enchimento de grãos – início da maturação (R5-R7) e início da maturação – maturação fisiológica (R7-R8) de grupo de maturidade relativa 7.4-8.0, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em dez datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.63
- Figura 12. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante o subperíodo de desenvolvimento da soja compreendido entre a semeadura e a primeira folha trifoliolada (S-V2) do grupo de maturidade relativa 5.9-6.8, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012.68
- Figura 13. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante o subperíodo de desenvolvimento da soja compreendido entre a semeadura e a primeira folha trifoliolada (S-V2) do Grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012.....69
- Figura 14. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante o subperíodo de desenvolvimento da soja compreendido entre a semeadura e a primeira folha trifoliolada (S-V2) do grupo de maturidade relativa 7.4-8.0, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012.70

LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice A. Distribuição do tamanho de partículas de um Planossolo pertencente à UM Vacacaí, localizado no município de São Sepé, RS 81
- Apêndice B. Variação do armazenamento de água em função da capacidade de água disponível no solo e excesso hídrico no solo ao longo do ciclo de cultivares de soja pertencentes ao grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, em semeadura realizada no dia 01 de novembro de 2009, no solo Vacacaí. 82
- Apêndice C. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante o ciclo da soja, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí. 83
- Apêndice D. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante os subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o grupo de maturidade relativa 5.9-6.8, para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí. 84
- Apêndice E. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante os subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí. 85
- Apêndice F. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante os subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o grupo de maturidade relativa 7.4-8.0, para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí. 86
- Apêndice G. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante o ciclo da soja, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí, considerando o fenômeno ENOS. 87

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 A cultura da soja e o excesso hídrico	17
2.2. Simulação do desenvolvimento da cultura	20
2.3 Balanço Hídrico Sequencial.....	21
2.4 Eventos ENOS e a cultura da soja	22
2.5 Análise de distribuição de probabilidade	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Área de abrangência do estudo	25
3.2 Determinação da Capacidade de Campo	27
3.3 Simulação do desenvolvimento da soja.....	28
3.4 Balanço Hídrico Sequencial.....	30
3.5 Fenômeno ENOS	35
3.6 Análise estatística.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Determinação da capacidade de campo	37
4.2 Valores médios de dias de excesso hídrico nos subperíodos e no ciclo da soja	40
4.3 Análise de distribuição de probabilidade do excesso hídrico nos subperíodos e no ciclo da soja	45
4.4 Excesso hídrico na cultura da soja associado ao fenômeno ENOS	64
5 CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
APÊNDICES	81

1 INTRODUÇÃO

A soja é a cultura com maior área semeada no Brasil, ultrapassando 30 milhões de hectares na safra 2013/2014. No Rio Grande do Sul, terceiro maior produtor nacional, foram cultivados 4,9 milhões de hectares com produtividade média estimada de 2,6 t ha⁻¹ neste mesmo ano agrícola (CONAB, 2014).

De maneira geral, a produtividade média vem aumentando ao longo dos anos, reflexo da utilização de material genético com maior potencial produtivo, da mecanização agrícola, da utilização de novas tecnologias e pela crescente profissionalização dos produtores rurais. Esses fatores, associados aos bons preços e facilidade de comercialização, ao aporte de nitrogênio que a cultura proporciona no solo e, principalmente, à limitação de expansão de área nos solos mais propícios ao cultivo, têm impulsionado a expansão da cultura para Planossolos de várzeas nos últimos anos, atingindo aproximadamente 300 mil hectares na safra 2013/14 (IRGA, 2014). Além disso, a soja pode ser inserida nos sistemas de produção de arroz como alternativa de rotação de culturas para o controle de plantas daninhas com elevadas infestações, como por exemplo, o arroz vermelho e outras poáceas e ciperáceas.

Apesar do avanço tecnológico ocorrido na produção da cultura da soja, a diferença de produtividade entre os anos é bastante significativa (CONAB, 2014), o que está diretamente relacionado à variabilidade interanual e espacial das condições meteorológicas, principalmente da chuva. Dentre os diversos fatores que afetam a produtividade das culturas, a disponibilidade hídrica ao longo do ciclo e a ocorrência de estresses tanto por déficit quanto por excesso hídrico, são os que mais reduzem a produção potencial esperada.

Para semeaduras realizadas em Planossolos, os períodos de excesso hídrico ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja são comuns quando ocorre precipitação, devido ao hidromorfismo característico desses solos. Isso ocorre por apresentarem a altura do lençol freático mais superficial, presença de um horizonte B bastante impermeável e/ou maior desestruturação e compactação, devido às operações com máquinas para o cultivo do arroz sob condição de encharcamento do solo, o que reduz a taxa de infiltração de água (MANICA; COSTA, 1996).

As características intrínsecas destes solos afetam o crescimento e o desenvolvimento da cultura da soja, sendo que até o momento, há escassez de variedades com maior tolerância ao excesso hídrico disponíveis no mercado, o que aumenta o risco de perda de produtividade

em anos com precipitação normal ou superior à média na região em estudo e, conseqüentemente, a lucratividade dessa atividade para o produtor. Por isso, uma forma de atenuar o problema é buscar alternativas de manejo dos solos e da cultura mais adequadas para essas áreas, dentre as quais, a determinação da época de semeadura de menor risco.

Nesse sentido, a modelagem matemática dos processos ecofisiológicos determinantes da produção e a análise numérica de riscos são ferramentas confiáveis e úteis na tomada de decisões relativas ao manejo mais adequado em um sistema de produção estruturado nos fundamentos teórico-práticos que norteiam a minimização de erros.

A partir da simulação do desenvolvimento da cultura, o cálculo do balanço hídrico sequencial diário da cultura (BHS) de uma série longa de observações meteorológicas é extremamente útil para verificar a variação interanual da condição hídrica no solo. Com esses resultados pode-se então conhecer a probabilidade de ocorrência de excedentes hídricos nos diferentes subperíodos de desenvolvimento das plantas cultivadas, em função das diferentes datas de semeadura e capacidade de armazenamento de água (CAD) dos diferentes solos em uma região mesoclimática homogênea.

A análise de probabilidade de ocorrência de excesso hídrico e de outros fenômenos adversos é importante para reduzir o risco de perdas de produtividade nos cultivos agrícolas. Atualmente, o zoneamento agrícola para a cultura da soja no Rio Grande do Sul não considera esse fator para a confecção do calendário de semeadura (BRASIL, 2014). Desta forma, o conhecimento do risco de ocorrência e duração de excesso hídrico prejudicial à cultura para as diferentes épocas de semeadura e para os subperíodos críticos são extremamente importantes, embora ainda não disponíveis, principalmente quando se verifica uma forte pressão para o uso dos solos de várzea que vinham sendo utilizados para o cultivo de arroz irrigado ou pastagem no Rio Grande do Sul.

Nesse contexto se enquadram Santa Maria e seus municípios vizinhos na região Central do Rio Grande do Sul, onde os Planossolos ocupam cerca de 34% da área total (CARDOSO, 2005). Assim, é fundamental a realização de uma análise numérica do risco de ocorrência de excesso hídrico, fornecendo suporte para uma recomendação mais adequada que contribua para o incremento de produção da cultura da soja e, principalmente, que permita diminuir o risco de produção nesse tipo de solo.

O objetivo deste trabalho foi verificar as datas de semeadura com menor risco de ocorrência de excesso hídrico durante os subperíodos e para o ciclo da cultura, considerando-se três grupos de maturidade relativa de cultivares de soja e a capacidade de armazenamento de água dos Planossolos da região Central do Rio Grande do Sul.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da soja e o excesso hídrico

A soja (*Glycine max* (L) Merrill), pertencente à família Fabaceae, tem como provável centro de origem a metade oriental da China. É uma planta herbácea que possui raízes do tipo pivotante, com ramificação abundante, sendo o caule pouco ramificado e revestido de pêlos. O primeiro par de folhas é simples, sendo que as demais folhas são trifolioladas. As flores são de fecundação autógama e o fruto é do tipo vagem, podendo conter até cinco sementes. As diferentes cultivares podem apresentar hábito de crescimento determinado, indeterminado ou intermediário (FARIAS et al., 2009). O grão possui elevado teor de óleo e proteína, contendo todos os aminoácidos essenciais necessários ao corpo humano, sendo bastante utilizado na alimentação animal e humana (SANTOS, 1995).

Os principais fatores abióticos que controlam o crescimento e desenvolvimento da planta da soja são a temperatura do ar e o fotoperíodo. A temperatura base inferior é de cerca de 10 °C para as cultivares brasileiras, com temperatura ótima em torno de 30 °C (FARIAS et al., 2009). A soja é considerada uma planta de dias curtos e possui um fotoperíodo máximo crítico abaixo do qual é induzida a florescer. Entretanto, a resposta é quantitativa e não absoluta, ou seja, o florescimento é acelerado com a ocorrência de dias curtos, mas ocorre independentemente da duração do fotoperíodo, sendo que cada genótipo apresenta sensibilidade fotoperiódica diferenciada (RODRIGUES et al., 2001)

A disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cultura é outro fator que afeta o crescimento e desenvolvimento da cultura. A ocorrência de estresses hídricos, tanto por deficiência quanto por excesso são extremamente prejudiciais. O excesso hídrico, especificamente, pode ser ocasionado pela ocorrência de elevadas precipitações, irrigações excessivas, drenagem deficiente do solo ou pela combinação entre estes fatores.

Em condições normais, as raízes estão em contato com o oxigênio a uma pressão parcial semelhante à encontrada na atmosfera (SAIRAM et al., 2008). Entretanto, uma das principais consequências do excesso hídrico no solo é a redução na quantidade de oxigênio (LINKEMER; BOARD; MUSGRAVE, 1998), sendo hipoxia o termo utilizado quando há deficiência de oxigênio e anoxia quando em completa falta de oxigênio (SAIRAM et al.,

2008). Além disso, a soja também é sensível a elevadas concentrações de CO₂ na zona radicular, que ocasionam atrofiamento e clorose das plantas (BORU et al., 2003), redução da condutividade hidráulica nas raízes e da taxa de transpiração de plantas de soja (ARAKI, 2006).

No subperíodo semeadura-emergência, os danos são basicamente provocados pela rápida embebição de água pela semente que ocasiona ruptura da membrana das células do embrião, redução na respiração aeróbica da semente e produção de substâncias tóxicas (TIAN; NAKAMURA; KOKUBUN, 2005). Além disso, o alagamento reduz a germinação e é prejudicial ao desenvolvimento da plântula (WUEBKER; MULLEN; KOEHLER, 2001; KIRKPATRICK; ROTHROCK; RUPE, 2006). Wuebker; Mullen; Koehler (2001) relatam ainda que a duração de alagamento de apenas uma hora reduz a percentagem de germinação em qualquer fase deste processo. Entretanto, ressaltam que estresses ocorridos aos três dias após o início do processo de embebição ocasionam os maiores danos ao processo germinativo.

Após esta fase inicial, em que a plântula é dependente das reservas da semente, os primeiros sintomas ocasionados pelo excesso hídrico nas plantas são o fechamento estomático e a redução da taxa de fotossíntese (OOSTERHUIS et al., 1990). Posteriormente, ocorre o amarelecimento e o murchamento de folhas, podendo evoluir para senescência e abscisão foliar, sendo que a recuperação destas folhas é facilitada quando o estresse ocorre no estágio vegetativo (SCHÖFFEL, 1997).

Os efeitos nocivos do excesso hídrico para as plantas de soja são dependentes dos dias de excesso hídrico a que foi submetida e do estágio de desenvolvimento em que se encontra no momento do estresse. Griffin; Saxton (1988) observaram que apesar de haver uma redução da altura da planta quando o excesso hídrico ocorre no período vegetativo, há uma compensação através de um maior número de ramos. Além disso, o número de legumes por planta, o número de sementes por legume e a produtividade são mais restringidos quando o excesso hídrico ocorre no estágio reprodutivo e por um período maior que dois dias (GRIFFIN; SAXTON, 1988).

Scott et al. (1989) observaram redução na altura de plantas, matéria seca e no rendimento de grãos e verificaram maior sensibilidade da soja ao excesso hídrico no início do estágio reprodutivo (R2) do que no início do estágio vegetativo (V4). Resultados semelhantes também foram obtidos por Schöffel et al. (2001), em que a produtividade da soja submetida a estresse hídrico por dez dias no estágio R4 foi 37% menor em relação as plantas submetidas a 15 dias de excesso hídrico no estágio V6. Oosterhuis et al. (1990) submetendo as plantas de

soja a sete dias de inundação verificaram redução significativa da produtividade com relação a testemunha, mas não encontraram diferenças significativas entre as fases vegetativa e reprodutiva.

Em condições de sete dias de alagamento, Linkemer; Board; Musgrave (1998) verificaram maiores reduções quando o estresse ocorre em V2 do que nos demais estágios vegetativos. Entretanto, os menores rendimentos foram auferidos quando o excesso ocorreu durante o subperíodo reprodutivo (R1-R5). Em condições de três dias de alagamento nos estágios V2 e V3, Sullivan et al. (2001) verificaram redução média de 20% na produtividade, podendo chegar até 93% para a condição de seis dias de alagamento, e atribuem a queda de rendimento à redução da população de plantas, altura e número de vagens por planta.

Considerando apenas a fase vegetativa da cultura, verifica-se uma maior susceptibilidade ao excesso hídrico dos estágios iniciais de desenvolvimento, tais como V2 e V3. Após essa fase, a soja parece apresentar certa tolerância, como observado por Kirkpatrick; Rothrock; Rupe (2006), em que sete dias de excesso hídrico a partir do estágio V4 não foram suficientes para ocasionar redução no estande de plantas, ocorrendo redução da massa de plantas em apenas um dos três anos de estudo.

A permanência do nível do lençol freático próximo à superfície também é prejudicial à cultura. Côrte Filho (1984) verificou redução significativa de rendimento com profundidade do lençol freático de 30 cm em relação aos tratamentos de 60 cm e 90 cm. Outro fator importante que é alterado em condições de excesso hídrico é a absorção de nutrientes. Pires; Soprano e Cassol (2002) verificaram redução nos teores de N, K, Mg e Mn e incremento no teor de Fe na parte aérea da soja em condições de inundação.

Board (2008) atrelou a redução de rendimento das plantas de soja ao decréscimo da concentração de nitrogênio nas folhas após uma semana de alagamento. Plantas de soja em condições de alagamento ou hipoxia tem fixação de nitrogênio reduzida, sendo esta mais pronunciada que a queda da produção de biomassa (BACANAMWO; PURCELL 1999a). Estes resultados refletem a dependência da fixação biológica de nitrogênio através da simbiose com bactérias do gênero *Rizhobium*, as quais possuem elevada demanda de oxigênio conforme observado por Bacanamwo e Purcell (1999a), em que o consumo de oxigênio pelas raízes das plantas suplementadas com nitrato foi menor em relação às plantas supridas apenas através da fixação simbiótica.

As plantas podem apresentar algumas modificações morfofisiológicas em resposta ao alagamento, principalmente em condições severas de estresse. Dentre essas estão a realocação de fotoassimilados para o sistema radicular, o alargamento da base do caule, formação de

aerênquima e crescimento de raízes laterais e adventícias (BACANAMWO; PURCELL, 1999b; PIRES; SOPRANO; CASSOL, 2002; SCHÖFFEL, 1997; THOMAS; GUERREIRO; SODEK, 2005), fazendo com que haja melhor recuperação do suprimento de oxigênio para as raízes e da fixação de nitrogênio através dos nódulos de *Rizhobium* para as plantas de soja em longos períodos de excesso hídrico (SHIMAMURA et al., 2002; THOMAS; GUERREIRO; SODEK, 2005).

De uma maneira geral, de acordo com a literatura apresentada pode-se considerar que os subperíodos compreendidos entre a semeadura até V2 e entre R1 e R5 são os mais afetados pela ocorrência de excesso hídrico. Além disso, a duração de três dias de excesso hídrico no estágio V2 (SULLIVAN et al., 2001) e de quatro dias no estágio R2 (GRIFFIN; SAXTON, 1988) foram as mínimas encontradas para que ocorresse redução significativa na produtividade da cultura da soja. Desta forma, devem-se priorizar datas de semeadura com menor probabilidade de que períodos de elevado excesso hídrico coincidam com esses subperíodos críticos da cultura.

2.2. Simulação do desenvolvimento da cultura

De acordo com a escala proposta por Fehr e Caviness (1977) o ciclo da soja é basicamente dividido em uma fase vegetativa, a qual inicia a partir da emergência e outra reprodutiva, que inicia no momento da abertura da primeira flor na haste principal da planta. Essa divisão é bastante característica das cultivares de hábito de crescimento determinado. Entretanto, em se tratando de cultivares de hábito de crescimento indeterminado ocorre uma sobreposição um pouco maior entre essas duas fases, em que o crescimento vegetativo cessa aproximadamente no início do enchimento de grãos, quando não há mais emissão de nós (SETIYONO et al., 2007).

Os principais fatores abióticos que influenciam o desenvolvimento da cultura da soja são a temperatura do ar e o fotoperíodo. O primeiro geralmente contribui positivamente para o desenvolvimento da planta (SETIYONO et al., 2007). Tendo em vista que a soja é uma planta de dias curtos, quando submetida a condições de fotoperíodo longo ocorre uma redução da taxa de desenvolvimento, aumentando a fase vegetativa. Entretanto, a floração ocorrerá de qualquer modo, pois a resposta da soja ao fotoperíodo é quantitativa e não absoluta (RODRIGUES et al., 2001).

A utilização de modelos de simulação do desenvolvimento das culturas associada à análise de probabilidade possibilita a caracterização da distribuição de dados de determinada variável. Além disso, também podem ser utilizados no planejamento de práticas agrícolas, verificando o risco de ocorrência de um evento meteorológico como, por exemplo, o excesso hídrico em determinado estágio de desenvolvimento.

Dentre os modelos que podem ser utilizados para simular o desenvolvimento da cultura da soja estão os modelos propostos por Sinclair (1986) e por Setiyono et al. (2007). Entretanto, esses modelos requerem informações para cultivares ou grupos de maturidade relativa específicos e que ainda não estão disponíveis para as cultivares mais recentes de hábito de crescimento indeterminado do Brasil. Além disso, esses modelos foram gerados e calibrados nos Estados Unidos, onde as condições meteorológicas e cultivares utilizadas são bastante distintas das encontradas no Brasil.

Streck et al. (2008b) obtiveram valores de plastocrono para cultivares de hábito de crescimento determinado que podem ser utilizados em modelos de simulação de desenvolvimento. Da mesma forma, Streck et al., (2009) aprimoraram a simulação do número de nós de várias cultivares utilizando o modelo Soydev (SETIYONO et al., 2007). Entretanto, estas informações ainda não estão totalmente disponíveis para cultivares “indeterminadas”, o que impossibilitou a inclusão das mesmas na simulação de desenvolvimento realizada neste trabalho.

2.3 Balanço Hídrico Sequencial

Para identificar e quantificar períodos com deficiência ou excesso hídrico, é necessário a realização de um balanço hídrico, através do qual se contabilizam entradas e saídas de água de um volume controle de solo, num dado intervalo de tempo, considerando as necessidades ao longo do ciclo da cultura (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). O balanço hídrico pode ser utilizado para o acompanhamento do conteúdo de água no solo em tempo real ou em determinado período e é denominado de Balanço Hídrico Sequencial (THORNTHWAITE; MATHER, 1955).

O BHS foi empregado em diversos trabalhos para a cultura da soja. Mota et al. (1996) demonstraram as necessidades de irrigação em diferentes épocas de semeadura para oito locais de diferentes regiões do Rio Grande do Sul. Cunha (2001) realizou um zoneamento

agrícola para soja com base na disponibilidade hídrica para o estado. Matzenauer; Barni e Maluf (2003), utilizando dados decendiais, determinaram épocas com maior e menor risco de ocorrência de deficiência hídrica, com base no consumo relativo de água pela cultura.

A partir de simulações de semeaduras de uma cultura em várias épocas conjuntamente ao cálculo do BHS em escala diária de uma série longa de dados meteorológicos é possível determinar a probabilidade de ocorrência de deficiência e excesso hídricos nos diferentes tipos de solos de uma região no decorrer do ano agrícola. Nesse sentido, pode-se tomar como referência o trabalho realizado por Trentin (2013), em que analisou a frequência e a lâmina de irrigação necessária em diferentes épocas de semeadura para a cultura da soja em diferentes solos. No entanto, não foram encontrados trabalhos com este tipo de análise para a condição de excesso hídrico para esta cultura e que são importantes para a tomada de decisão por parte dos produtores, principalmente para cultivos em Planossolos.

2.4 Eventos ENOS e a cultura da soja

O fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) é resultado da combinação entre os componentes de macro-escala oceânico e atmosférico. O primeiro está associado a alterações na Temperatura da Superfície do Mar (TSM), a qual é monitorada em alguns pontos da região equatorial do Oceano Pacífico. O componente atmosférico, por sua vez, refere-se a correlação inversa entre a pressão atmosférica entre o leste e o oeste deste Oceano, sendo monitorada pelo Índice de Oscilação Sul (IOS). Em anos de El Niño, verifica-se um aquecimento das águas oceânicas associado à diminuição da pressão atmosférica na região leste do Pacífico, sendo que condição exatamente inversa caracteriza a ocorrência do fenômeno La Niña (BERLATO; FONTANA, 2003).

No Rio Grande do Sul, de maneira geral, ocorre precipitação superior à média climatológica em anos sob influência do fenômeno El Niño do que em anos Neutros ou de La Niña, sendo que o período entre outubro e dezembro é o de maior intensidade de influência do fenômeno ENOS (FONTANA; BERLATO, 1997). A Oscilação Decadal do Pacífico atua conjuntamente ao fenômeno ENOS sendo também responsável pela variabilidade interanual da precipitação, conforme trabalho realizado por Streck et al. (2009) para Santa Maria.

A produtividade de culturas agrícolas é bastante dependente do fenômeno ENOS. Para as condições de Santa Maria, a disponibilidade hídrica no solo é maior para anos de El Niño e

consequentemente são os mais favoráveis ao rendimento de soja e milho, sendo que os anos Neutros são os que apresentam maiores riscos para essas culturas (ALBERTO et al., 2006). Também para a cultura do milho, Berlato; Farenzena; Fontana (2005) relatam ganho e queda de produtividade em anos sob influência de El Niño e La Niña, respectivamente.

Resultados semelhantes são encontrados para a soja, em que o rendimento de grãos é maior em anos de El Niño e está estritamente relacionado com a precipitação no período entre dezembro e março (BERLATO; FONTANA, 1999). Entretanto, em se tratando de cultivo de soja em ambiente de várzea, o aumento do volume das precipitações neste período coincidente com fases críticas da planta pode ser prejudicial considerando a hipótese de que a ocorrência de estresses por excesso hídrico no solo possa ser maior.

2.5 Análise de distribuição de probabilidade

A utilização de determinada função densidade de probabilidade (fdp) está diretamente ligada à natureza dos dados a que se relaciona. Existem fdps que se ajustam a dados discretos, tais como, binomial, hipergeométrica e poisson e fdps que se ajustam a dados de variáveis contínuas, como por exemplo, a uniforme, exponencial, normal, lognormal, t de Student, qui-quadrado, gama, e weibull.

De maneira geral, a distribuição de probabilidades é um ajuste matemático da distribuição de frequências. A distribuição de probabilidades pode ser representada por uma fdp que quando integrada em um dado intervalo determina a probabilidade de um evento ocorrer nesse intervalo, sendo denominada função cumulativa de probabilidade.

Na área de agrometeorologia, têm-se estudos com diversas variáveis, dentre as quais a ocorrência de granizo (BERLATO; MELO; FONTANA, 2000), geada (SILVA; SENTELHAS, 2001), radiação solar (BURIOL et al., 2001; ASSIS et al., 2004), chuva (SILVA et al., 2007) e temperatura do ar (ARAÚJO et al., 2010), além da deficiência hídrica no solo (CARDOSO, 2005; SILVA et al., 2008), na cultura do milho (NIED et al., 2005; TRENTIN, 2009), do feijão (SILVA, 2008), do girassol (MALDANER, 2012) e da soja (TRENTIN, 2013). Esses estudos permitem melhorar o planejamento das atividades agrícolas, tendo em vista que geram informações sobre o risco de ocorrência de determinados valores para o período estudado, de forma a amenizar a redução do rendimento das culturas em função de eventos adversos.

Para a realização deste tipo de estudo, faz-se necessário a utilização de uma série longa de dados (SILVA et al., 2008; TRENTIN et al., 2013), de modo que sejam representativos e permitam a utilização dos parâmetros das fdp ajustadas para uso geral na região de estudo. Além disso, o uso das fdps, através de seus parâmetros, só é possível se houver capacidade das mesmas em estimar a frequência observada, o que é verificado pelos testes de aderência (CATALUNHA et al., 2002).

Os testes de aderência mais utilizados são o qui-quadrado (χ^2), Kolmogorov-Smirnov (KS) e Lilliefors (CAMPOS, 1983). Este último apresenta a limitação de ser específico para testar a aderência dos dados à distribuição normal. O teste de χ^2 testa a hipótese de nulidade, ou seja, de que a distribuição seja a especificada, comparando as frequências observadas e as teóricas para cada classe de frequência amostra. Já o teste KS, compara apenas o módulo da maior diferença com um valor tabelado de acordo com o número de observações da série, que neste caso condiz com o número de anos estudados (ASSIS; ARRUDA; PEREIRA, 1996).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de abrangência do estudo

A área de abrangência do estudo é delimitada exatamente pela área de cobertura da Estação Climatológica Principal de Santa Maria (ECPSM), pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET/8°DISME), localizada no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (29°43'23''S; 53°43'15''W; 95 m), da qual foram obtidos os dados necessários para as simulações de desenvolvimento da cultura da soja, assim como para os cálculos do balanço hídrico do solo.

Na Figura 1 pode-se visualizar que a ECPSM está localizada na Depressão Central do RS e abrange a totalidade da área dos municípios de Dilermando de Aguiar, Formigueiro, Itaara, Santa Maria, São João do Polêsine, São Martinho da Serra, São Pedro do Sul, Restinga Seca, Silveira Martins e parte dos municípios de Cacequi, Faxinal do Soturno, Ivorá, Júlio de Castilhos, Santa Margarida do Sul, São Gabriel, São Sepé e Vila Nova do Sul.

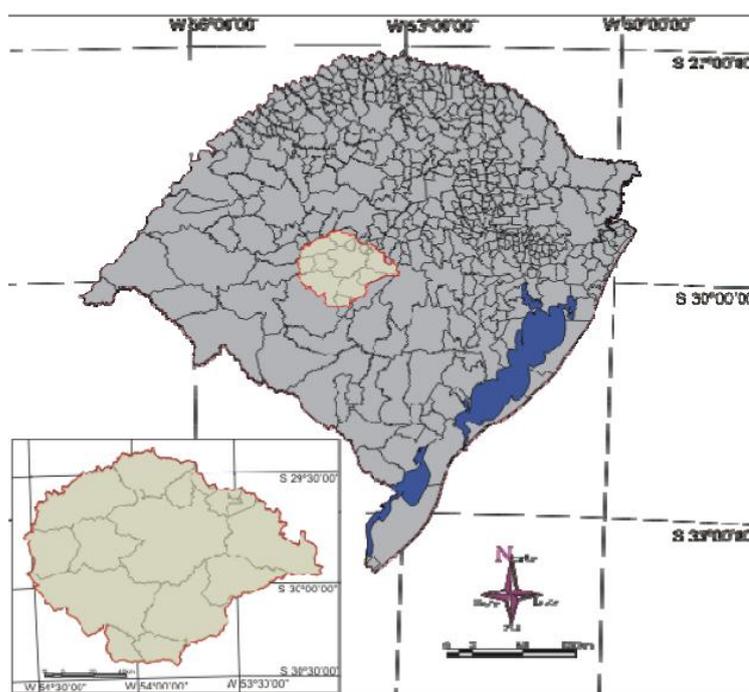


Figura 1. Localização da área de abrangência da análise de risco de excesso hídrico no solo para a cultura da soja, na região central do Rio Grande do Sul. Fonte: Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Rio Grande do Sul (Secretaria da Agricultura e Abastecimento 1994, extraído e adaptado de CARDOSO, 2005).

O clima da região é do tipo Cfa, caracterizado como subtropical úmido, com verões quentes e sem estação seca definida, conforme a classificação de Köppen (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009). Os valores médios da temperatura do ar variam entre 14,1 °C no mês de julho a 24,8 °C em janeiro (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009) e os valores normais de precipitação têm distribuição uniforme no ano, caracterizando um regime pluviométrico isoígro (BURIOL et al., 2006).

Dentre as classes de solos que ocorrem na região, foi considerada neste trabalho a classe dos Planossolos, a qual predomina nas áreas de várzea e áreas planas e pertencem às unidades de mapeamento Vacacai e São Gabriel. Essa classe ocupa aproximadamente 34% da área da região de abrangência do atual estudo (BRASIL, 1973; STRECK et al., 2008a) e sua distribuição espacial pode ser visualizada na Figura 2, nas cores de verde claro e verde escuro, respectivamente.

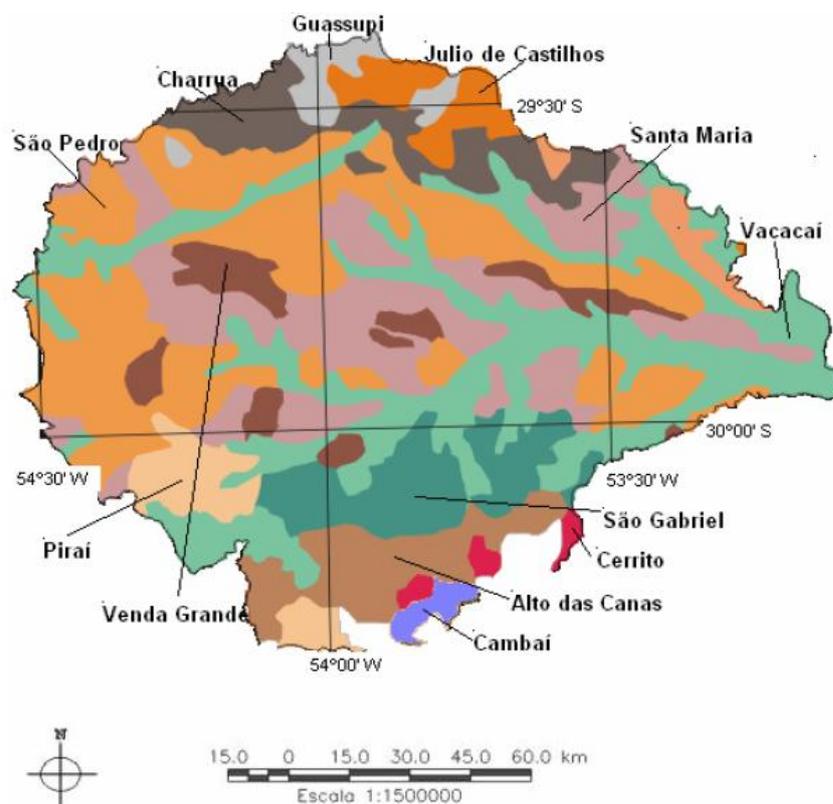


Figura 2. Distribuição espacial das Unidades de Mapeamento dos Solos da região Central do Rio Grande do Sul. Fonte: extraído e adaptado de Cardoso (2005).

O solo Vacacaí - Planossolo Háplico Eutrófico arênico - tem como material de origem os sedimentos aluviais e apresenta espessura de 50 a 100 cm do horizonte A ou A+E, o qual se caracteriza pela textura bastante arenosa e por isso apresenta condições mais favoráveis à drenagem da camada superficial.

O solo São Gabriel, por sua vez, é originário do siltito e classificado como Planossolo Háplico Eutrófico vertissólico, possuindo maior teor de argila e matéria orgânica. O termo vertissólico faz referência à presença de características vérticas em momentos de estiagem, tais como fendas, até 120 cm de profundidade, que ocorrem devido à presença de argilominerais expansivos.

3.2 Determinação da Capacidade de Campo

No cálculo do balanço hídrico (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), o excesso hídrico foi considerado quando o conteúdo de água no solo ultrapassou a capacidade de armazenamento de água (CAD), ou seja, esteve acima da capacidade de campo. Desta forma, buscou-se determinar, in situ, o momento em que o solo atinge a capacidade de campo, conforme uma adaptação da metodologia proposta pela Embrapa (1979).

De acordo com esta metodologia, deve-se encharcar uma área de aproximadamente 1 m² com uma lâmina de água suficiente para saturar o perfil do solo e após, realizar a cobertura dessa área com um filme plástico para evitar a perda de água por evaporação, realizando posteriormente as amostragens de solo. Entretanto, ao invés de realizar o encharcamento de uma pequena parcela de solo, optou-se por fazer as avaliações após a ocorrência de precipitações em que houve a completa saturação do solo. Buscou-se, desta forma, realizar avaliações em condições representativas as que ocorrem nos cultivos de soja em várzea na Região Central do Rio Grande do Sul.

As áreas utilizadas para as avaliações apresentavam-se sob cultivo de soja e localizam-se nos municípios de Santa Maria e São Sepé, sendo que os solos de ambos os locais pertencem à UM Vacacaí. A distribuição do tamanho de partículas do solo localizado em São Sepé está apresentada no Apêndice A. Já para o solo localizado em Santa Maria não foi realizada esta análise, mas apresenta teor de argila próximo a 25% (MARCHEZAN et al., 2004).

Foram realizadas amostragens de solo nas datas 12/11/2013 em Santa Maria e em 27/02/2014 e 20/03/2014 em Santa Maria e São Sepé. As amostras foram coletadas 24, 48, 72 e até 96 horas após o término da chuva, através de tradagens em dois pontos de cada área, nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm do perfil do solo. Posteriormente, as amostras foram levadas à estufa para secagem até atingir peso constante e assim realizada a determinação da umidade. A umidade referente à capacidade de campo foi considerada quando as variações temporais de umidade no perfil foram mínimas (EMBRAPA, 1979).

3.3 Simulação do desenvolvimento da soja

O desenvolvimento das plantas foi simulado em cada ano para cada data de semeadura entre outubro e dezembro, com intervalos de semeadura de 10 dias (Tabela 1). Foram consideradas apenas cultivares de hábito de crescimento determinado e estas foram agrupadas quanto ao ciclo, conforme seu grupo de maturidade relativa (GMR). As cultivares com GMR 5.9–6.8 formaram o grupo das cultivares consideradas de ciclo precoce e semiprecoce, GMR 6.9–7.3 o grupo das cultivares de ciclo médio e GMR 7.4–8.0 corresponde ao grupo das cultivares de ciclo semitardio/tardio (REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2010).

Tabela 1. Datas de semeadura utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturidade relativa (GMR).

DS	GMR		
	GMR 5.9 – 6.8 (Precoce e Semiprecoce)	GMR 6.9 – 7.3 (Médio)	GMR 7.4 – 8.0 (Semitardio/Tardio)
01/10	—*	—*	1
11/10	—*	1	2
21/10	1	2	3
01/11	2	3	4
11/11	3	4	5
21/11	4	5	6
01/12	5	6	7
11/12	6	7	8
21/12	7	8	9
31/12	—*	—*	10

* Datas de semeadura não recomendadas para a região.

Os dados de temperatura do ar necessários à simulação foram obtidos junto à ECPSM, utilizando-se a série histórica de agosto de 1968 a julho de 2012. Os dados de fotoperíodo foram calculados conforme metodologia proposta por Kiesling (1982), considerando-se a duração do crepúsculo civil de 6° abaixo do plano do horizonte. A simulação do desenvolvimento da soja em cada ano agrícola foi realizada conforme Trentin et al. (2013) para todas as datas de semeadura de cada GMR. Determinaram-se os estágios que delimitam os valores dos coeficientes de cultura (K_c), necessários para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c), além da data de emergência, utilizada para o cálculo da data de ocorrência do estágio V2.

De acordo com esta metodologia, para a determinação da data de emergência foi realizado o cálculo da soma térmica ($^{\circ}\text{C dia}$), utilizando uma temperatura base de 10°C , sendo $92,5^{\circ}\text{C dia}$ o valor acumulado necessário (SCHNEIDER et al., 1987). A temperatura média diária do ar (T_{md}) foi obtida a partir da média aritmética entre a temperatura máxima ($T_{máx}$) e a temperatura mínima ($T_{mín}$) diária do ar.

A data de ocorrência do estágio da primeira folha trifoliolada (V2) foi estimada por meio do modelo Soydev (SETIYONO et al., 2007), utilizando-se coeficientes obtidos por Streck et al. (2009) em Santa Maria, RS. O modelo Soydev utiliza uma função não linear de resposta à temperatura do ar para determinar o número de nós da planta de soja, sendo que a simulação inicia na data de emergência e termina quando o número de nós for igual ou superior a três, definindo, assim, a data de ocorrência do estágio V2.

Através do modelo não linear de resposta do desenvolvimento à temperatura e fotoperíodo proposto por Sinclair et al. (1991), foi simulada a data do início da floração (R1) utilizando coeficientes interpolados de acordo com o GMR. Esse modelo inicia a integração a partir da data de emergência e termina quando a taxa de desenvolvimento (SD) atinge 1,0, que corresponde à data do estágio R1.

A data de ocorrência do estágio do início do enchimento de grãos (R5) foi determinada por meio de uma regressão linear baseada no fotoperíodo e coeficientes variáveis conforme o GMR (SINCLAIR et al., 2007), iniciando na data de ocorrência de R1 e terminando quando a taxa de desenvolvimento atingiu 1,0, equivalente à data de ocorrência do estágio R5. A partir desta data, foi simulado o estágio de início da maturação (R7) através do cálculo da soma térmica, adotando-se uma temperatura base de 10°C e soma térmica acumulada de 554°C dia conforme Martorano et al. (2012).

Com as datas de R1 e R5 já estimadas, a data da maturação fisiológica (R8) foi determinada pelo modelo proposto por Sinclair (1986), eliminando-se a função de resposta ao

déficit hídrico no algoritmo. Além dos coeficientes apresentados no trabalho de Sinclair (1986), foram utilizados os valores de plastocrono da cultura da soja publicados por Streck et al. (2008b). A densidade de fluxo da radiação solar global incidente (R_g), necessária para esse modelo foi estimada através da equação de Ångström-PreScott: $R_g = K_{o\downarrow}(b_0 + b_1 n N^{-1})$, em que $K_{o\downarrow}$ é a densidade de fluxo da radiação solar global incidente no topo da atmosfera ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) estimada em função da latitude e data do ano, b_0 e b_1 os coeficientes mensais ajustados para Santa Maria por Buriol et al. (2012), n o tempo de brilho solar direto (insolação diária), registrado no heliógrafo da ECPSM ($h\ d^{-1}$) e N é o comprimento máximo do dia ($h\ d^{-1}$), calculado em função da declinação solar e da latitude local.

3.4 Balanço Hídrico Sequencial

As variáveis necessárias para a realização do cálculo do balanço hídrico sequencial diário (BHS) foram obtidas junto à ECPSM, utilizando-se a série histórica de agosto de 1968 a julho de 2012 e estão descritas na Tabela 2. As temperaturas mínimas e máximas diárias do ar são observadas, respectivamente, às 09 h e 21 h. A insolação diária foi obtida da medida feita pelo heliógrafo tipo Campbell-Stokes, no qual a incidência dos raios solares ocasiona uma carbonização na fita heliográfica que é graduada em horas e décimos de horas. A contabilização do tempo carbonizado da fita representa a insolação diária. A precipitação pluviométrica diária é medida às 9 h do dia e corresponde ao acumulado desde as 9 h do dia anterior.

Tabela 2. Variáveis meteorológicas obtidas do banco de dados da Estação Climatológica Principal de Santa Maria.

Variável	Descrição
T_{mn}	Temperatura mínima do ar ($^{\circ}C$)
T_{mx}	Temperatura máxima do ar ($^{\circ}C$)
T_9	Temperatura do ar medida às 9 horas ($^{\circ}C$)
T_{15}	Temperatura do ar medida às 15 horas ($^{\circ}C$)
T_{21}	Temperatura do ar medida às 21 horas ($^{\circ}C$)
UR_9	Umidade relativa do ar das 9 horas (%)
UR_{15}	Umidade relativa do ar das 15 horas (%)
UR_{21}	Umidade relativa do ar das 21 horas (%)
U_2	Velocidade do vento medida à 2 m acima do solo ($Km \cdot dia^{-1}$)
n	Insolação diária (h)
Prec	Precipitação pluviométrica diária (mm)
EvP	Evaporação diária medida no Evaporímetro de Piche (mm)

Com as variáveis da Tabela 2 foram calculadas as médias diárias de temperatura e umidade relativa do ar, os valores diários de pressão parcial e de saturação de vapor d'água do ar e do déficit de saturação do ar, bem como da radiação solar incidente, do balanço de radiação e da evapotranspiração de referência, conforme equações descritas na Tabela 3.

As estimativas de temperatura média diária do ar (T_{med}) e umidade relativa média diária do ar (UR_m) (Equações 1 e 2) foram calculadas conforme indicação técnica do INMET (1992) e a pressão de saturação conforme equação de Tétens (MURRAY, 1967) com coeficientes ajustados de acordo com Fischer et al. (1987).

Tabela 3. Variáveis meteorológicas estimadas a partir de dados meteorológicos medidos e suas respectivas funções matemáticas.

Variáveis	Equação	
Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{med} = 0,2 \cdot (T_9 + T_{mx} + T_{mn} + 2 \cdot T_{21})$	1
Umidade relativa média do ar (%)	$UR_m = 0,25 \cdot (UR_9 + UR_{15} + 2 \cdot UR_{21})$	2
Pressão de saturação de vapor do ar (kPa)	$e_s = 0,6107 \cdot \exp\left(\frac{17,2694 \cdot T_{med}}{237,3 + T_{med}}\right)$	3
Pressão parcial de vapor do ar (kPa)	$e = 0,01 \cdot e_s \cdot UR_m$	4
Déficit de saturação do ar (kPa)	$d = e_s - e$	5
Tangente à curva de saturação ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T_{med} + 237,2)^2}$	6
Densidade de fluxo de radiação global incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	$R_g = K_0 \downarrow \cdot (b_0 + b_1 \cdot n \cdot N^{-1})$	7
Balanço de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	$L^* = -\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{med} + 273)^4 \cdot [0,56 + 0,09 \cdot (0,75 \cdot e)^{0,5}] \cdot (0,1 + 0,9 \cdot n \cdot N^{-1})$	8
Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	$Q^* = R_g \cdot (1 - r) + L^*$	9
Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1})	$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \cdot \frac{Q^*}{L} + \frac{\gamma \cdot 900}{(\Delta + \gamma^*) \cdot (T_{med} + 273)} U_2 \cdot d$	10

em que: Δ é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura média diária T_m ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); ε a emissividade da superfície vegetada de referência (0,95); σ a constante de Stefan-Boltzmann ($4,9861 \cdot 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$); r refletividade da superfície vegetada de referência (0,23); γ a constante psicrométrica ($0,0662 \text{ kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ^* a constante psicrométrica corrigida segundo Allen et al., 1998 por $\gamma^* = \gamma \cdot (1 + 0,34U_2)$; U_2 a velocidade média diária do vento a 2 m de altura ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); do déficit de saturação do ar (kPa); L o calor latente de evaporação ($2,46 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Por meio da equação de Ångström-Prescott (Equação 7), foi estimada a densidade de fluxo da radiação solar global incidente (R_g), sendo $K_{0\downarrow}$ a densidade de fluxo da radiação solar global incidente no topo da atmosfera ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), a qual é estimada em função da latitude do local e da data no período do ano, sendo os coeficientes mensais b_0 e b_1 ajustados para Santa Maria por Buriol et al. (2012), n a insolação diária registrada com heliógrafo ($\text{h}\cdot\text{dia}^{-1}$) e N a duração astronômica do dia calculado em função do dia do ano e da latitude local. Utilizando-se da radiação solar global incidente (Equação 7) e do saldo de radiação de onda longa obtido pela equação de Brunt-Penman (Equação 8), foi obtido o saldo de radiação pela equação 9 (BERLATO; MOLION, 1981).

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) foi realizada com uso do método de Penman-Monteith, conforme Allen et al. (1998) (Equação 10). A equação de Penman (11) (VAREJÃO SILVA, 2000) foi empregada para os períodos de falta de dados de velocidade do vento, com um ajuste no termo aerodinâmico, através da evaporação medida no evaporímetro de Piche (EvP , mm d^{-1}) e do déficit de saturação do ar (kPa), conforme Alberto et al. (2002).

$$ET_o = \frac{\frac{\Delta Q^*}{\gamma L} + (a + b \cdot EvP) \cdot d}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (11)$$

sendo que: Δ é dada em $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$; γ é $0,80 \text{ kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$; L é o calor latente de evaporação ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$), Q^* é o saldo de radiação ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$); d é o déficit de saturação de vapor d'água do ar (kPa).

Para o cálculo do BHS foi utilizada a metodologia proposta por Thornthwaite; Mather (1955), descrito por Pereira; Villa Nova; Sedyama (1997). O roteiro de cálculo foi realizado através de algoritmos desenvolvidos no software Statistical Analysis System (SAS, 2001) por Nied (2005); Trentin (2009) para a cultura do milho e por Silva (2005) para a cultura do feijoeiro, sendo realizadas adaptações para a cultura da soja, bem como para obtenção de valores de excesso hídrico.

Para o cálculo da ET_c foi utilizada a ET_o calculada e os K_c recomendados pela FAO para a cultura da soja (ALLEN et al., 1998), considerados constantes durante os subperíodos S-V2 e R1-R5 (Tabela 4). No subperíodo V2-R1, o K_c foi calculado em função da variação da taxa de desenvolvimento (SD) e no subperíodo R5-R7 em função da soma térmica durante este subperíodo. Para o subperíodo R7-R8 foi utilizado o valor de K_c de 0,50 (Tabela 4).

A CAD foi calculada para as duas unidades de mapeamento utilizando-se os valores de Capacidade de Campo (CC) e Ponto de Murcha Permanente (PMP) descritos para os diferentes horizontes conforme Peraza (2003), sendo variável em função do aprofundamento radicular no decorrer do ciclo (Tabela 4).

Tabela 4. Coeficientes de cultura (K_c) utilizados para determinação da evapotranspiração máxima da cultura da soja e variação da capacidade de água disponível (CAD) conforme os subperíodos compreendidos entre as datas de semeadura (S), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8).

Subperíodo	Coeficiente de cultura (K_c)	CAD
S-V2	$K_c = 0,40$	$CAD_n^* = CAD_i^*$
V2-R1	$K_c = 1,087 \cdot SD^* + 0,063$	$CAD_n = CAD_i + (CAD_f^* - CAD_i)^{-2} \cdot [1 - \cos(\pi \cdot SD)]$
R1-R5	$K_c = 1,15$	$CAD_n = CAD_f$
R5-R7	$K_c = -0,0012 \cdot ST_{R5-R7}^* + 1,1512$	$CAD_n = CAD_f$
R7-R8	$0,50$	$CAD_n = CAD_f$

*SD é a taxa de desenvolvimento calculada conforme Sinclair et al. (1991); ST_{R5-R7} é a soma térmica acumulada entre os subperíodos R5 e R7, conforme Martorano et al. (2012); CAD_n é a CAD no dia “n”; CAD_i é a CAD inicial e CAD_f é a CAD final.

A CAD inicial (CAD_i) foi determinada para a profundidade de 0,10 m, pois, geralmente, o sistema radicular não ultrapassa essa camada até o estágio V2. Para o subperíodo de V2-R1 foi utilizada uma curva de crescimento sigmoideal do sistema radicular, proposta por Dourado Neto et al. (1999), em função da SD, demonstrada na Tabela 4. A CAD final (CAD_f), por sua vez, foi determinada para uma profundidade de 0,40 m, uma vez que para solos com frequente excesso hídrico não se espera um aprofundamento maior do sistema radicular. A CAD_i e a CAD_f calculadas foram de 26 e 23 mm e de 82 e 92 mm para os solos São Gabriel e Vacacaí, respectivamente (PERAZA, 2003).

Considerando que após uma precipitação pluvial, parte da água é perdida, principalmente por escoamento superficial e por percolação profunda, foi realizado o cálculo da precipitação efetiva, ou seja, do volume de água que realmente é armazenado no solo. O cálculo foi realizado de acordo com a metodologia do U.S. Soil Conservation Service,

descrita por Frizzone et al. (2005). Conforme essa metodologia, a precipitação pluvial é dividida em perdas iniciais por interceptação e pelo enchimento das rugosidades superficiais do solo, além de perdas por escoamento superficial. Dessa forma, descreve-se:

$$P_i = \frac{5080}{CN} - 50,8 \quad (12)$$

$$P_r = \frac{(Prec - 0,2s)^2}{(Prec + 0,8)} \quad \text{quando } Prec > 0,2s \quad (13)$$

$$P_r = 0 \quad \text{quando } Prec < 0,2s \quad (14)$$

sendo:

$$s = 254 \frac{100}{CN - 1} \quad (15)$$

em que: P_i são as perdas iniciais em razão da interceptação pela vegetação e do enchimento das rugosidades superficiais do solo, mm; P_r as perdas por escoamento superficial, mm; $Prec$ a precipitação pluviométrica, em mm; CN a curva número, que é adimensional; s o parâmetro de retenção potencial do solo, também adimensional.

Cada tipo de solo, assim como seu uso e as práticas de manejo influenciam na variação do parâmetro de retenção (s). Assim, para a condição média dos solos em questão, esse parâmetro foi determinado em função da curva número ($0 \leq CN \leq 100$) tabelada. Os valores de CN foram adotados conforme o teor de areia, em que é utilizado o valor de 72 para os solos arenosos (com teor de areia maior que 50%) e o valor de 91 para os solos com predomínio das outras classes de partículas (teor de silte + teor de argila > 50%). Com base nisto, os valores de CN foram de 91 para o solo São Gabriel e de 72 para o Vacacaí.

Foi considerado que 25% das perdas iniciais é evaporada e desta forma apenas 75% infiltra no solo (FRIZZONE et al., 2005). Desta forma:

$$P_e = Prec - P_r - 0,25 \cdot P_i \quad \text{quando } Prec > P_i \quad (16)$$

$$P_e = 0,75 \cdot Prec \quad \text{quando } Prec \leq P_i \quad (17)$$

em que P_e = precipitação efetiva, mm.

O produto final do BHS, ou seja, a variável de análise de excesso hídrico escolhida foi os dias de excesso hídrico no solo, os quais foram considerados quando o conteúdo de água no solo excedeu a CAD e os dias em que os solos permaneceram nesta condição. Foi utilizada a contabilização em número de dias, pois na maioria das vezes é mais importante o tempo em que as plantas permanecem sob estresse do que a altura de precipitação pluvial, tendo em vista que após o solo atingir a saturação, o efeito danoso para as plantas é semelhante.

3.5 Fenômeno ENOS

Considerando-se que o fenômeno ENOS apresenta influência na variabilidade das precipitações pluviais da região de abrangência do estudo, foram separados os anos sob influência dos fenômenos La Niña e El Niño, além dos anos considerados Neutros. Adotou-se a classificação dos anos conforme o Climate Prediction Center (2014), a qual está apresentada na Tabela 5.

Tendo em vista que os subperíodos S-EM e EM-V2 foram aqueles que apresentaram maior importância na definição da data de semeadura da soja, optou-se por agrupá-los e posteriormente realizar a análise de distribuição de probabilidades.

Tabela 5. Classificação dos anos em função do fenômeno ENOS ocorrido no período de 1968 a 2012.

Ano ¹	Classificação ²	Ano	Classificação	Ano	Classificação
1968-1969	EN	1983-1984	NT	1998-1999	LN
1969-1970	EN	1984-1985	LN	1999-2000	LN
1970-1971	LN	1985-1986	NT	2000-2001	LN
1971-1972	LN	1986-1987	EN	2001-2002	NT
1972-1973	EN	1987-1988	EN	2002-2003	EN
1973-1974	LN	1988-1989	LN	2003-2004	NT
1974-1975	LN	1989-1990	NT	2004-2005	EN
1975-1976	LN	1990-1991	NT	2005-2006	NT
1976-1977	EN	1991-1992	EN	2006-2007	EN
1977-1978	EN	1992-1993	NT	2007-2008	LN
1978-1979	NT	1993-1994	NT	2008-2009	NT
1979-1980	NT	1994-1995	EN	2009-2010	EN
1980-1981	NT	1995-1996	LN	2010-2011	LN
1981-1982	NT	1996-1997	NT	2011-2012	LN
1982-1983	EN	1997-1998	EN		

¹De julho do primeiro ano até junho do ano seguinte; ² La Niña (LN), El Niño (EN) e Neutro (NT). Fonte: Climate Prediction Center (2014).

3.6 Análise estatística

Os dados de dias de excesso hídrico para o ciclo e subperíodos resultantes do balanço hídrico para cada GMR foram submetidos à análise de variância e comparação de médias

através do teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro. As fontes de variação constaram das diferentes datas de semeadura, dos dois solos estudados e de suas interações, sendo que cada ano agrícola constou de uma repetição.

Os dados também foram submetidos à análise de distribuição de probabilidades (SILVA, 2005; SILVA, 2008; TRENTIN, 2009) e teste para verificar a função de probabilidade que melhor representa a distribuição dos dados. Utilizaram-se funções densidade de probabilidade (fdp) para variáveis contínuas, pois a variável analisada - dias de excesso hídrico - foi contabilizada em totais nos subperíodos e no ciclo, assim como realizado por Silva et al. (2007) para totais de chuva em determinado período. Foram testados os ajustes das fdps exponencial, gama, lognormal, normal e weibull, reduzidas a dois parâmetros, conforme recomendado por Assis, Arruda e Pereira (1996) e Catalunha et al. (2002).

Os testes de aderência utilizados foram o qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 10%, sendo que quando houve ajuste de duas ou mais funções, foi escolhida a que apresentou maior nível de significância indicado pelo teste do qui-quadrado.

Considerando o fenômeno ENOS, o número de dias com excesso hídrico para cada GMR, acumulados no ciclo da cultura, foi submetido à análise de variância e comparação de médias através do teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade, tendo como fontes de variação as datas de semeadura, os solos, o fenômeno ENOS e suas interações. Os dados de dias de excesso hídrico ocorridos no subperíodo S-V2 foram submetidos ao ajuste de funções de distribuição de probabilidades e teste para verificar a que melhor representa a distribuição dos dados.

Após o ajuste das fdps, foram calculados os valores de probabilidade. Determinou-se o número máximo de dias de excesso hídrico provável de ocorrer ao longo do ciclo da cultura considerando as probabilidades de 25, 50, 75, 90 e 95%. Já para os subperíodos, foram calculadas as probabilidades de ocorrência de pelo menos 2, 4, 8 e 12 dias de excesso hídrico ao longo de cada subperíodo. Além disso, foi contabilizado o número de anos em que houve excesso hídrico nas diferentes datas de semeadura para cada subperíodo de desenvolvimento da soja.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação da capacidade de campo

Na Figura 3 estão apresentados os resultados das amostragens de solo realizadas para determinação do teor de umidade gravimétrica do solo em diferentes datas de coleta após a ocorrência de precipitações elevadas, que ultrapassaram a CAD dos solos avaliados.

As coletas de solo realizadas a partir de 27 de fevereiro de 2014 (Figura 3A), em Santa Maria, sucederam a um total de chuva de 60 mm. Verificou-se que 24 horas após a ocorrência do final da precipitação, a umidade gravimétrica estava próxima de $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na camada de zero até dez centímetros reduzindo para $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ no dia seguinte e mantendo-se praticamente constante após 72 horas da ocorrência da última precipitação. Essa estabilização significa que o solo atingiu a capacidade de campo e que a alteração no teor de umidade a partir deste ponto é mínima (EMBRAPA, 1979). Conjuntamente a isso, observando o teor de umidade nas camadas de 20-30 e 30-40 cm, verifica-se que ocorreu o inverso, ou seja, o teor de umidade é menor após as precipitações e aumenta posteriormente, provavelmente devido à drenagem interna do perfil em direção ao subsolo, o que permite inferir que o solo estava relativamente seco antes da chuva. Nessa situação, o maior gradiente de potencial hidráulico determina uma drenagem mais rápida da água desde a camada superficial até as camadas mais profundas do solo (LIBARDI, 1995).

Para o mesmo período de avaliação, no solo localizado em São Sepé, a precipitação acumulada foi de 65 mm. Não foi observada a mesma tendência de estabilização do teor de umidade ao longo das coletas nas camadas superficiais. Entretanto, se verifica que nas camadas de 20-30 e 30-40 cm existe a tendência de estabilização a partir da coleta de 28 de fevereiro, isto é, 48 horas após o término das precipitações (Figura 3B).

Nas Figuras 3C e 3D estão apresentados os resultados das coletas realizadas a partir do dia 20 de março de 2014, em que se verifica que a variação do teor de umidade no solo é bastante incipiente ao longo das amostragens. A chuva acumulada nos dias que antecederam o período de avaliação totalizou 150 e 145 mm em Santa Maria e São Sepé, respectivamente. Devido a essa elevada precipitação, com o possível encharcamento de todo o perfil do solo, o

tempo de 48 horas após a última precipitação não foi suficiente para a drenagem da água livre do solo até a capacidade de campo.

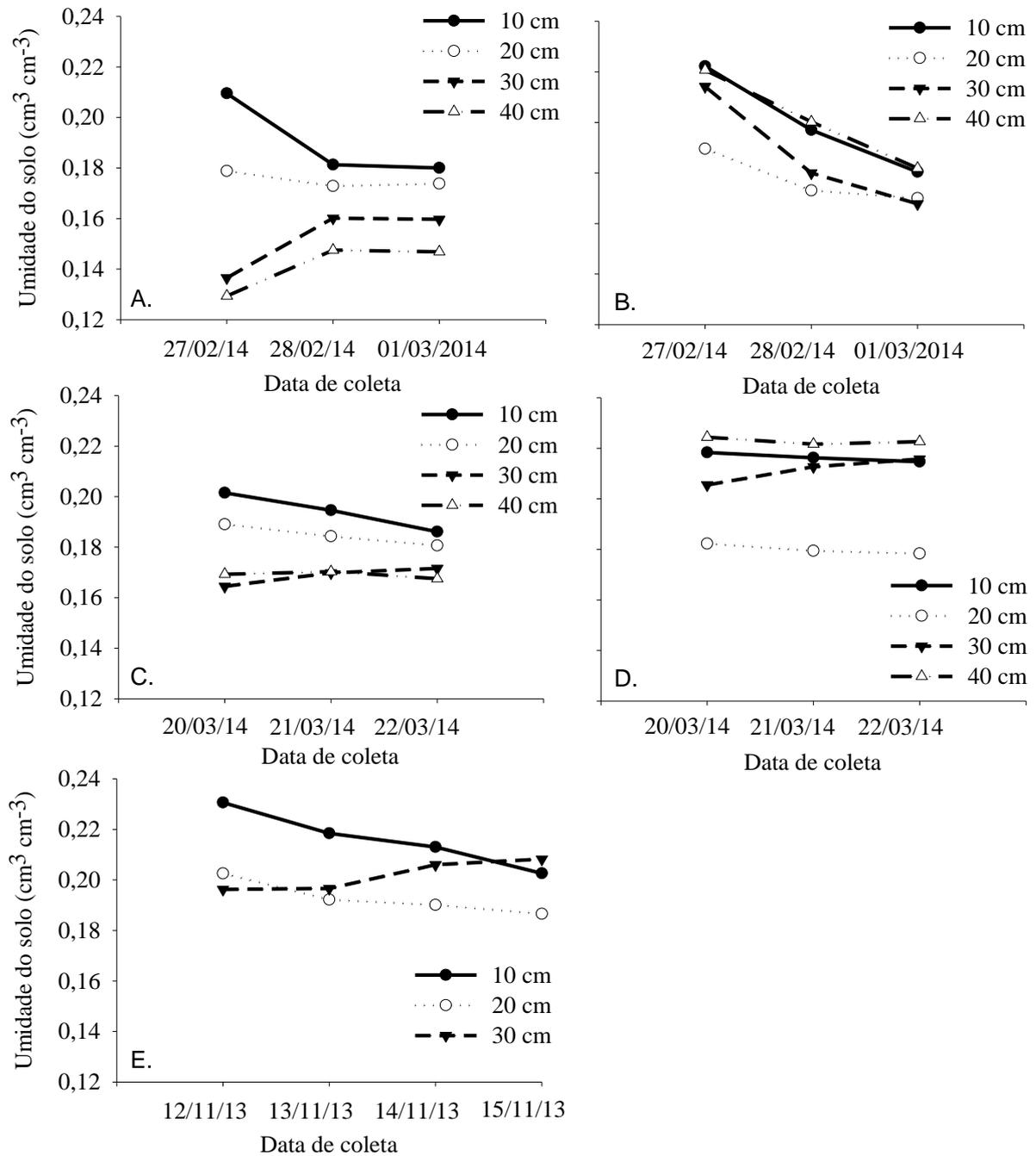


Figura 3. Umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) de amostras coletadas após o final da ocorrência de precipitação em dois Planossolos com cultivo de soja, localizados em Santa Maria (A, C, E) e São Sepé (B, D), no ano agrícola 2013/14.

Além das determinações da umidade do solo, a observação visual também levou a esta mesma conclusão. A fotografia apresentada na Figura 4 representa a condição em que o solo

se apresentava exatamente no dia 21 de março (Figura 3C), 48 horas após a chuva, em São Sepé, em que se nota que ainda havia uma lâmina de água sobre a superfície do solo. Desta forma, o período de coleta não foi suficiente para identificar o momento em que o solo atingiu a capacidade de campo, o que significa que houve excesso hídrico por pelo menos 72 horas após o término da chuva.



Figura 4. Condição da superfície do solo em 21 de março de 2014, 48 horas após o final do evento de 150 mm de precipitação, no município de São Sepé, RS.

Para as coletas realizadas a partir de 12/11/2013 até 15/11/2013 (Figura 3E), a precipitação ocorrida foi semelhante (197 mm), sendo que também não foi possível visualizar a tendência de estabilização da umidade do solo. Desta forma, esta metodologia não se mostrou adequada para a determinação da capacidade de campo em condição de elevada precipitação ou o tempo necessário para drenagem é maior.

De uma maneira geral, esses resultados são bastante limitados e dependem das características de cada solo, tais como textura, declividade, velocidade de infiltração, condutividade hidráulica além da quantidade e intensidade da precipitação. Todavia, com base nas determinações e observações realizadas, adotou-se o tempo de drenagem mínimo observado, o qual foi de 48 horas após o término da ocorrência da chuva. Assim, toda vez que

o conteúdo de água no solo excedeu a CAD no cálculo do balanço hídrico considerou-se mais dois dias de excesso hídrico em decorrência do tempo necessário para a drenagem da água livre nos Planossolos.

4.2 Valores médios de dias de excesso hídrico nos subperíodos e no ciclo da soja

No Apêndice B, à título de ilustração, pode-se visualizar a variação do armazenamento de água no solo, bem como do excesso hídrico resultante do cálculo do BHS para a semeadura simulada no dia 01 de novembro de 2009, considerando o solo Vacacaí e o GMR 6.9-7.3. Este ano foi classificado como El Niño, em que a precipitação registrada ficou bem acima da média.

Na avaliação dos resultados da análise de variância da variável “dias com excesso hídrico” no ciclo da cultura da soja (Apêndice C), verificou-se que não houve interação significativa entre os dois fatores analisados (DS*Solo) para nenhum dos GMR. O efeito isolado do fator “Solo” foi significativo para todos os GMR e o efeito das DS foi significativo para os GMR 5.9-6.8 e 6.9-7.3.

Considerando o GMR 5.9-6.8, a semeadura simulada de 01/dez foi a que apresentou o menor número médio de dias com excesso hídrico durante o ciclo de desenvolvimento, sendo que há uma tendência de aumento à medida que se avança para as datas de semeadura mais tardias assim como para as semeaduras antecipadas (Tabela 6). Além disso, para as cultivares desse GMR e para as do GMR 6.9-7.3, verificou-se que as semeaduras simuladas até 01/nov apresentaram os maiores valores de excesso hídrico ao longo do ciclo, sendo que após esta data não houve diferença entre as DS (Tabela 6).

Já para o GMR 7.4-8.0, nota-se que o número médio de dias com excesso hídrico foi de 24,9, sendo o maior se comparado aos demais GMR, o que está diretamente relacionado com a maior duração do ciclo destas cultivares. Entre as DS, verificou-se uma redução a partir de 01/out até 11/nov, sendo que nas semeaduras subsequentes ocorre um aumento progressivo até o final da janela de semeadura recomendada pelo zoneamento agrícola (Tabela 6). Nota-se que o coeficiente de variação (CV) ficou próximo de 50% para todos os GMR, o que reflete a diferença entre os anos de simulação para cada semeadura, proveniente da variabilidade interanual das precipitações.

Tabela 6. Número médio de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja, considerando os grupos de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, para as datas de semeadura simuladas em Planossolos, compreendidas entre 01 de outubro e 31 de dezembro, em cada ano do período de 1968 a 2012.

Datas de semeadura	Grupo de Maturidade Relativa		
	5.9-6.8	6.9-7.3	7.4-8.0
01/out	-	-	27,7 ^{ns}
11/out	-	25,3 a	26,5
21/out	23,1 a*	24,2 a	26,5
01/nov	21,3 a	23,2 a	24,9
11/nov	19,4 b	20,4 b	21,8
21/nov	19,1 b	19,6 b	23,1
01/dez	18,0 b	19,9 b	23,3
11/dez	18,8 b	20,8 b	24,5
21/dez	20,2 b	21,5 b	25,3
31/dez	-	-	25,6
Média	20,0	21,8	24,9
CV (%)	54,1	52,3	49,8

*Médias seguidas por letras minúsculas iguais na vertical para cada GMR não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro; ^{ns} Não significativo.

Apesar de o solo São Gabriel possuir menor capacidade de armazenamento de água no solo, apresentou menor número médio de dias de excesso hídrico ao longo do ciclo da soja em comparação ao Vacacaí. Isso ocorreu, considerando o método de cálculo da precipitação efetiva, devido ao solo São Gabriel apresentar menor potencial de retenção de água no solo, fazendo com que ocorram maiores perdas por escoamento superficial, principalmente em dias em que a quantidade de chuva foi elevada.

Considerando o GMR 5.9-6.8, observa-se que as plantas de soja são expostas, na média dos anos, a seis dias a mais de excesso hídrico durante o seu ciclo se cultivadas no solo Vacacaí e a sete dias a mais quando utilizadas cultivares de GMR 6.9-7.3 e 7.4-8.0 (Tabela 7). Entretanto, ambos os solos estudados neste trabalho geralmente estão localizados em áreas onde o desnível é extremamente baixo ou inexistente, dificultando o processo de escoamento ou drenagem superficial, o que não é considerado no método de cálculo da precipitação efetiva utilizado neste trabalho. Associado a isso, se não ocorrer a drenagem superficial, a eliminação do excesso de água por percolação profunda, de uma maneira geral, é mais difícil em solos com elevado teor de argila, como é o caso do solo São Gabriel, fazendo com que as plantas permaneçam em uma condição mais prolongada de excesso hídrico no solo.

Tabela 7. Número médio de dias com excesso hídrico no ciclo de desenvolvimento da soja para os grupos de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, calculados para as datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012, para os solos São Gabriel e Vacacai.

Solos	Grupo de Maturidade Relativa		
	5.9-6.8	6.9-7.3	7.4-8.0
São Gabriel	16,9 a*	18,6 a	21,6 a
Vacacai	22,9 b	25,0 b	28,1 b
Média	20,0	21,8	24,9
CV (%)	54,1	52,3	49,8

*Médias seguidas por letras minúsculas iguais na vertical para cada GMR não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro.

Assim, os resultados referentes à diferença entre os solos ainda podem ser refinados na medida em que se disponha de determinações mais precisas da dinâmica da água nesses solos e a consideração dessas características físicas nos parâmetros dos modelos de cálculo dos algoritmos utilizados. No entanto, em se tratando de verificar diferenças para diferentes datas de semeadura, esse erro sistemático decorrente no sistema de cálculo provavelmente é relativamente pequeno.

Na análise de variância para os subperíodos, também não ocorreu interação significativa entre os fatores “Solo” e “DS” para nenhum subperíodo analisado em cada GMR (Apêndices D, E, F). O número de dias de excesso hídrico diferiu entre as datas de semeadura nos subperíodos S-EM e EM-V2 para os três GMR e no subperíodo R7-R8 para os GMR 6.9-7.3 e 7.4-8.0. Para os demais subperíodos, o número médio de dias com excesso hídrico não diferiu entre as DS (Tabela 8).

Para os três GMR estudados, parece haver uma semelhança entre os resultados obtidos para o subperíodo S-EM, em que as semeaduras realizadas até 01/nov são as que apresentam o maior número médio de dias com excesso hídrico (Tabela 8). Esse resultado está relacionado à maior duração deste subperíodo nas semeaduras mais precoces, ocasionada pela menor temperatura do ar e que em termos práticos resulta em um menor aquecimento do solo, retardando o processo germinativo. Além disso, a demanda atmosférica é menor até o final de outubro e, portanto, o balanço hídrico do solo resulta em maior armazenamento de água no solo no intervalo entre as precipitações.

Tabela 8. Número médio de dias com excesso hídrico* nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da matura maturação (R7) e maturação plena (R8), em Planossolos, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.

GMR	DS	Subperíodo					
		S-EM	EM-V2	V2-R1	R1-R5	R5-R7	R7-R8
5.9-6.8	01/out	-	-	-	-	-	-
	11/out	-	-	-	-	-	-
	21/out	4,63 a**	6,55 a	9,04 ^{ns}	5,55 ^{ns}	7,21 ^{ns}	3,26 ^{ns}
	01/nov	4,70 a	5,26 b	9,13	6,04	6,97	4,19
	11/nov	3,74 b	5,49 b	8,33	5,69	6,08	4,10
	21/nov	3,92 b	5,02 b	7,92	5,62	6,69	4,06
	01/dez	3,46 b	3,92 c	7,82	5,04	6,40	5,10
	11/dez	3,77 b	4,19 c	9,01	5,10	7,15	3,50
	21/dez	3,16 b	4,40 c	9,54	5,21	7,50	4,14
	31/dez	-	-	-	-	-	-
	Média	3,96	5,03	8,67	5,45	6,83	4,04
	CV %	42,45	50,68	61,34	63,85	60,58	54,32
	6.9-7.3	01/out	-	-	-	-	-
11/out		5,19 a	7,25 a	9,99 ^{ns}	5,73 ^{ns}	7,80 ^{ns}	3,54 b
21/out		4,42 b	6,77 a	9,58	6,13	7,51	4,26 b
01/nov		4,52 b	5,35 b	9,92	5,92	6,39	5,22 a
11/nov		3,62 c	5,49 b	9,39	6,04	7,18	4,97 a
21/nov		3,73 c	5,18 b	8,76	4,85	6,02	5,97 a
01/dez		3,67 c	4,11 c	8,53	5,07	6,98	4,08 b
11/dez		3,68 c	4,29 c	9,91	5,48	6,89	4,54 a
21/dez		3,32 c	4,45 c	10,03	5,22	6,93	5,47 a
31/dez		-	-	-	-	-	-
Média		4,09	5,46	9,49	5,51	6,93	4,83
CV %		40,90	51,05	61,36	64,57	60,12	51,26
7.4-8.0		01/out	5,48 a	8,00 a	11,38 ^{ns}	5,52 ^{ns}	7,88 ^{ns}
	11/out	5,03 a	7,56 a	10,68	5,59	7,60	4,64 c
	21/out	4,31 b	6,90 a	10,73	5,43	7,02	6,37 b
	01/nov	4,73 b	5,41 b	10,73	5,74	6,61	5,95 c
	11/nov	3,66 c	5,44 b	10,46	4,85	7,35	5,41 c
	21/nov	3,60 c	5,24 b	10,16	4,95	7,28	5,88 c
	01/dez	3,42 c	4,24 c	9,87	5,37	7,94	6,68 b
	11/dez	3,90 c	4,29 c	11,41	4,93	7,00	8,74 a
	21/dez	3,12 c	4,40 c	11,31	3,94	7,72	7,16 b
	31/dez	3,13 c	4,58 c	11,02	4,03	9,30	5,40 c
	Média	4,10	5,72	10,78	4,92	7,56	6,10
	CV %	44,40	48,84	60,60	59,14	63,60	51,69

*Médias computadas só para datas com excesso hídrico diferente de zero; **Médias seguidas por letras minúsculas iguais na vertical para cada GMR não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro; ^{ns} Não significativo.

As datas de semeadura posteriores à 01/nov apresentaram médias mais próximas de três dias de excesso hídrico até a emergência das plantas, colocando-as como mais indicadas ou favoráveis à semeadura da soja em Planossolos. Obviamente, esta informação não deve ser tratada como uma regra fixa e outros fatores devem ser analisados conjuntamente, como por exemplo, a previsão meteorológica de médio prazo no ano de cultivo, baseada nos fenômenos de macroescala, e as condições de drenagem de cada solo nesta época.

Apesar de haver diferença para o subperíodo R7-R8 para os GMR 6.9-7.3 e 7.4-8.0, os valores de número de dias de excesso hídrico obtidos não se apresentaram em uma sequência ordenada entre as datas de semeadura. Isso provavelmente ocorreu devido à curta duração desta fase de maturação ficando mais sujeita à variabilidade interanual das precipitações.

De acordo com os resultados relacionados à variável “Solo” (Tabela 9), considerando o GMR 7.4-8.0, houve diferença entre os solos apenas no subperíodo V2-R1. Já para o subperíodo R5-R7, essa diferença foi observada para todos os GMR, sendo que não houve diferença nos demais subperíodos. Em ambas as situações, houve mais dias de excesso hídrico para o solo Vacacaí em relação ao São Gabriel.

Tabela 9. Número médio de dias com excesso hídrico* nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), ocorridos em datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012 para os solos São Gabriel e Vacacaí, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR).

GMR	Solos	Subperíodo					
		S-EM	EM-V2	V2-R1	R1-R5	R5-R7	R7-R8
5.9-6.8	São Gabriel	3,91 ^{ns}	5,09 ^{ns}	8,32 ^{ns}	4,96 ^{ns}	5,68 b**	3,91 ^{ns}
	Vacacaí	4,00	4,97	8,97	5,67	7,43 a	4,12
	Média	3,96	5,03	8,67	5,45	6,83	4,04
	CV %	42,45	50,68	61,34	63,85	60,58	54,32
6.9-7.3	São Gabriel	4,07 ^{ns}	5,52 ^{ns}	9,01 ^{ns}	4,90 ^{ns}	5,97 b	4,76 ^{ns}
	Vacacaí	4,11	5,40	9,92	5,79	7,43 a	4,88
	Média	4,09	5,46	9,49	5,51	6,93	4,83
	CV %	40,90	51,05	61,36	64,57	60,12	51,26
7.4-8.0	São Gabriel	4,08 ^{ns}	5,80 ^{ns}	10,15 b	4,39 ^{ns}	6,82 b	6,08 ^{ns}
	Vacacaí	4,12	5,66	11,34 a	5,14	7,97 a	6,11
	Média	4,10	5,72	10,78	4,92	7,56	6,10
	CV %	44,40	48,84	60,60	59,14	63,60	51,69

*Médias computadas somente para datas com excesso hídrico diferente de zero; **Médias seguidas por letras minúsculas iguais na vertical para cada GMR não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo.

Nota-se que estes subperíodos são os mais longos do ciclo da cultura da soja, fazendo com que o acumulado de um maior número de dias com excesso hídrico mostrasse mais claramente a diferença entre os solos. No entanto, considerando que a diferença não alcança 2 dias e que o excesso hídrico nos subperíodos V2-R1 e R5-R7 resulta em dano menos acentuado do que nos subperíodos S-EM, EM-V2 e R1-R5 (GRIFFIN; SAXTON, 1988; SCOTT et al., 1989; LINKEMER; BOARD; MUSGRAVE, 1998; SCHÖFFEL et al., 2001) pode-se inferir que o tipo de solo é menos importante do que a definição da época de semeadura para minimizar os riscos prováveis.

4.3 Análise de distribuição de probabilidade do excesso hídrico nos subperíodos e no ciclo da soja

A aderência das fdp gama, lognormal, normal, weibull e exponencial foram testadas em 50 cenários, considerando o ciclo da cultura. Estes foram formados através da combinação entre os dois solos estudados e as 7, 8 e 10 datas de semeadura para os GMR, 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, respectivamente. Apenas na data de semeadura simulada em 01/nov para o GMR 6.9-7.3 e para o solo Vacacaí não houve ajuste de nenhuma fdp. Observando a Tabela 10, verifica-se que a fdp gama foi a que apresentou maior frequência de ajuste, totalizando 42,9%, seguida pela lognormal (22,4%), weibull (18,4%) e normal (16,3%). Com a fdp exponencial, por sua vez, não se obteve ajuste em nenhuma data de semeadura simulada.

Trabalhando com a cultura do girassol, com esta mesma variável, Lucas (2014) obteve a maior frequência de ajuste para a fdp weibull, totalizando 41,5% dos casos, seguido pela gama (32,5%). As funções gama e weibull também foram as que mais se ajustaram na análise de distribuição de frequências da chuva em Santa Maria (SILVA et al., 2007). Por outro lado, em trabalhos de probabilidade de deficiência hídrica no solo (SILVA et al., 2008), na cultura do girassol (MALDANER, 2012) e para número e lâmina de irrigação (TRENTIN, 2013) a função que apresentou melhor ajuste foi a lognormal. Tendo em vista que a mesma função que apresentou melhor ajuste para dados de precipitação também se ajustou melhor a dados de excesso hídrico, pode-se concluir que os excessos hídricos são mais dependentes da precipitação do que da evapotranspiração.

Tabela 10. Frequência (%) de casos em que as funções densidade de probabilidade (fdp) gama, lognormal, normal, weibull e exponencial apresentaram ajuste estatisticamente significativo para a variável dias com excesso hídrico no ciclo e nos subperíodos da cultura da soja em Planossolos, para sementeiras simuladas de 1968 a 2012.

fdp	% Frequência (Ciclo)	% Frequência (Subperíodos)
Gama	42,9	19,1
Lognormal	22,4	18,3
Normal	16,3	19,1
Weibull	18,4	30,9
Exponencial	0	12,6
Total*	100 (n=49)	100 (n=246)

*Total de fdp ajustadas em % e em número de casos (n).

Considerando os seis subperíodos de desenvolvimento da cultura da soja, associados com as datas de sementeira e os dois solos estudados, totalizaram-se 300 combinações. Deste total, pelo menos uma função ajustou-se significativamente em 246 casos para a variável dias com excesso hídrico. Na Tabela 10 está apresentado um resumo das frequências de ajuste das fdps aos valores obtidos. A fdp weibull foi a que mais se ajustou à distribuição de frequências para os subperíodos, seguida pela gama e normal (19,1%) e após pelas fdps lognormal (18,3%) e exponencial (12,6%). Para os 54 casos em que não houve ajuste, utilizou-se a distribuição da frequência empírica.

As fdp que se ajustaram à distribuição de frequências da variável número de dias com excesso hídrico ao longo do ciclo de acordo com os testes de aderência utilizados estão apresentadas na Tabela 11. Cabe ressaltar que duas ou mais funções podem ter obtido ajuste para a mesma data de sementeira, entretanto, a fdp escolhida foi a que apresentou o maior nível de significância pelo teste de qui-quadrado e após pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Na Figura 5 podem ser observadas as estimativas do número de dias de excesso hídrico no solo ao longo do ciclo da cultura da soja em diferentes níveis de probabilidade para os três GMR e para os dois solos avaliados. Desta forma, pode-se afirmar, por exemplo, que em 90% dos casos ou anos agrícolas em que ocorreu excesso hídrico, as cultivares do GMR 5.9-6.8 cultivadas em um solo São Gabriel terão no máximo 35 dias de excesso hídrico durante o seu ciclo de desenvolvimento quando sementeiras em 21/out, diminuindo este valor até a sementeira de 01/dez, em que alcança no máximo 26 dias, aumentando novamente nas datas de sementeiras seguintes (Figura 5A). Para o solo Vacacaí (Figura 5B), neste mesmo

nível de probabilidade, ocorreu uma redução do número de dias de excesso hídrico estimado à medida que se avança no calendário de semeadura.

Tabela 11. Funções densidade de probabilidade (fdp) ajustadas para determinar o número de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja nos solos São Gabriel e Vacacai nas diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR).

SOLO	DS	Grupos de Maturidade Relativa								
		5.9-6.8			6.9-7.3			7.4-8.0		
		fdp	a*	b*	fdp	a*	b*	fdp	a*	b*
São Gabriel	01/out	-	-	-	-	-	-	LGN	3,059	0,560
	11/out	-	-	-	LGN	2,979	0,573	G	7,921	2,959
	21/out	G	6,103	3,361	LGN	2,908	0,559	LGN	2,994	0,559
	01/nov	LGN	2,750	0,574	LGN	2,845	0,560	LGN	2,932	0,563
	11/nov	G	6,689	2,417	W	18,956	1,620	G	6,267	2,827
	21/nov	LGN	2,574	0,666	G	5,547	2,897	G	6,475	2,999
	01/dez	G	4,758	3,074	W	18,586	2,008	G	5,717	3,433
	11/dez	G	5,353	2,872	W	19,771	2,065	G	5,857	3,637
	21/dez	G	5,105	3,476	N	18,268	9,359	G	5,524	4,031
	31/dez	-	-	-	-	-	-	N	23,048	10,053
Vacacai	01/out	-	-	-	-	-	-	LGN	3,310	0,514
	11/out	-	-	-	G	8,487	3,259	G	9,415	3,138
	21/out	W	28,795	1,911	G	7,445	3,655	G	7,414	4,043
	01/nov	LGN	3,036	0,596	SA	-	-	N	27,886	13,937
	11/nov	LGN	2,955	0,623	G	7,949	3,008	G	6,989	3,678
	21/nov	N	22,068	11,728	G	6,934	3,320	N	26,750	12,318
	01/dez	W	24,039	2,056	W	26,342	2,193	W	30,428	2,280
	11/dez	N	22,068	10,911	W	26,982	2,249	G	7,800	3,531
	21/dez	N	22,512	10,386	W	27,643	2,483	G	5,107	5,519
	31/dez	-	-	-	-	-	-	N	28,045	11,566

*Os parâmetros das fdp G= Gama, W= Weibull e LN= Lognormal são denominados “escalar” e “de forma” e os da fdp N=Normal são denominados de média e desvio-padrão. SA = sem ajuste.

Considerando o GMR 6.9-7.3, as semeaduras mais precoces foram as que apresentaram as maiores estimativas de número de dias de excesso hídrico prováveis de ocorrerem ao longo do ciclo em ambos os solos, principalmente quando se observa as probabilidades de 95 e 90 % (Figura 5C, D), sendo 01/dez a melhor data obtida. Para os níveis de probabilidade de 75%, 50% e 25% a data com menor número máximo de dias com excesso foi 21/nov.

Tendência semelhante foi observada para as cultivares do GMR 7.4-8.0, em que, para o solo São Gabriel (Figura 5E), o menor número de dias de excesso hídrico estimado foi determinado para um decêndio antes, isto é, em 11/nov, mantendo-se praticamente semelhante até a data de semeadura de 01/dez. Essa janela de semeadura também é observada

para o solo Vacacaí, estendendo-se de 01/nov até 01/dez para cultivares do GMR 7.4-8.0 (Figura 5F). De maneira geral, o número de dias de excesso hídrico prováveis de ocorrerem para o ciclo foi sempre superior quando calculado para o solo Vacacaí do que para o São Gabriel, principalmente devido às suas menores perdas por escoamento superficial.

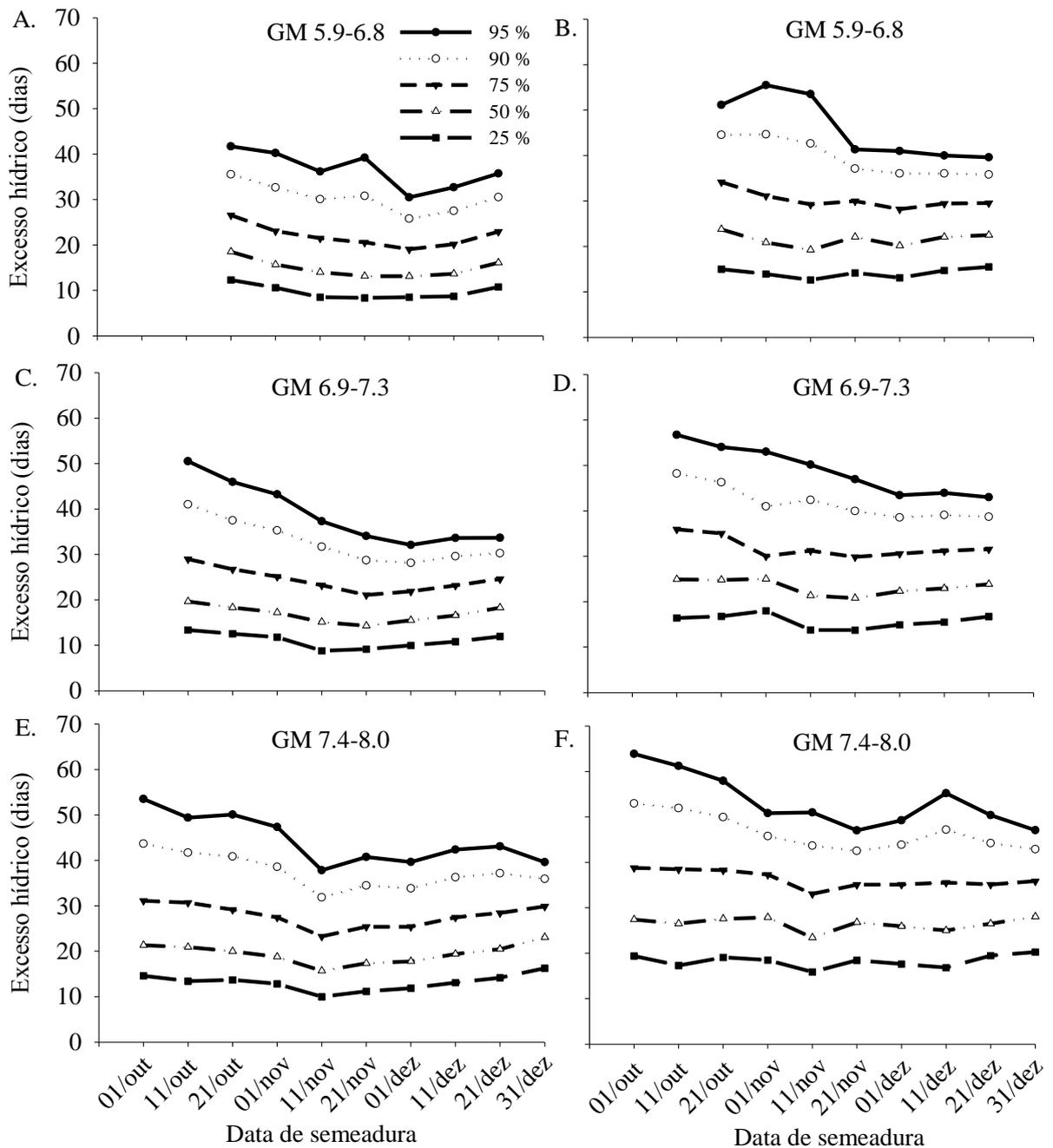


Figura 5. Número máximo de dias de excesso hídrico prováveis de ocorrerem durante o ciclo de desenvolvimento da soja, dos grupos de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), considerando dez datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.

Nas Tabelas 12 e 13, estão apresentadas as fdps que se ajustaram à distribuição de frequências da variável número de dias com excesso hídrico nos diferentes subperíodos de desenvolvimento para o solo São Gabriel, assim como nas Tabelas 14 e 15 estão apresentadas as fdps para o solo Vacacaí.

Tabela 12. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo São Gabriel, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 01 de outubro a 11 de novembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.

DS	Subp.	Grupos de Maturidade Relativa								
		5.9-6.8			6.9-7.3			7.4-8.0		
		fdp	a*	b*	fdp	a*	b*	fdp	a*	b*
01/out	S-EM	-	-	-	-	-	-	N	5,514	2,454
	EM-V2	-	-	-	-	-	-	W	8,954	2,775
	V2-R1	-	-	-	-	-	-	W	11,719	1,618
	R1-R5	-	-	-	-	-	-	LGN	1,605	0,562
	R5-R7	-	-	-	-	-	-	SA	-	-
	R7-R8	-	-	-	-	-	-	G	0,958	4,576
11/out	S-EM	-	-	-	N	5,139	1,959	SA	-	-
	EM-V2	-	-	-	W	8,258	2,416	W	8,599	2,489
	V2-R1	-	-	-	LGN	2,059	0,668	G	5,012	2,039
	R1-R5	-	-	-	EXP	5,500	-	EXP	4,428	-
	R5-R7	-	-	-	G	1,742	3,922	LGN	1,734	0,449
	R7-R8	-	-	-	W	3,952	2,214	LGN	1,447	0,544
21/out	S-EM	W	5,179	2,412	W	4,893	2,427	W	4,702	2,176
	EM-V2	W	7,444	1,979	W	7,703	1,990	W	7,857	2,054
	V2-R1	W	9,569	1,416	SA	-	-	LGN	2,050	0,824
	R1-R5	W	5,231	1,576	LGN	1,378	0,591	SA	-	-
	R5-R7	W	6,293	1,913	LGN	1,703	0,438	EXP	5,833	-
	R7-R8	W	3,460	1,808	W	4,581	2,383	LGN	1,663	0,481
01/nov	S-EM	W	5,204	3,036	SA	-	-	N	4,771	1,682
	EM-V2	N	5,242	2,574	N	5,333	2,665	N	5,394	2,715
	V2-R1	LGN	2,061	0,609	G	3,228	3,086	G	4,046	2,619
	R1-R5	SA	-	-	EXP	5,571	-	SA	-	-
	R5-R7	LGN	1,549	0,658	G	1,773	3,084	EXP	5,157	-
	R7-R8	N	4,000	1,620	LGN	1,467	0,588	G	1,431	4,316
11/nov	S-EM	W	4,085	2,396	SA	-	-	SA	-	-
	EM-V2	N	5,696	2,344	SA	-	-	SA	-	-
	V2-R1	EXP	7,900	-	W	9,537	1,681	SA	-	-
	R1-R5	EXP	5,857	-	LGN	1,538	0,523	EXP	3,666	-
	R5-R7	G	2,347	2,249	G	1,804	3,269	G	1,697	3,292
	R7-R8	W	4,407	2,215	LGN	1,549	0,393	LGN	1,509	0,551

*Os parâmetros das fdp G= Gama, W= Weibull e LN= Lognormal são denominados “escalar” e “de forma” e os da fdp N=Normal são denominados de média e desvio-padrão. A fdp EXP = exponencial tem parâmetro denominado “lambda”. SA = sem ajuste.

Tabela 13. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo São Gabriel, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 21 de novembro a 31 de dezembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.

DS	Subp.	Grupos de Maturidade Relativa								
		5.9-6.8			6.9-7.3			7.4-8.0		
		fdp	a*	b*	fdp	a*	b*	fdp	a*	b*
21/nov	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	SA	-	-
	EM-V2	N	5,032	2,442	N	5,193	2,613	N	5,258	2,556
	V2-R1	G	3,221	2,344	W	10,038	1,952	G	3,723	2,6042
	R1-R5	LGN	1,461	0,5369	EXP	3,889		EXP	5,5000	
	R5-R7	EXP	4,850		W	4,9295	2,2556	LGN	1,5987	0,6468
	R7-R8	G	0,958	4,323	SA	-	-	N	5,9444	3,1337
01/dez	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	N	3,353	1,454
	EM-V2	SA	-	-	LGN	1,241	0,652	LGN	1,263	0,660
	V2-R1	W	8,275	1,572	G	3,955	1,965	W	10,112	1,573
	R1-R5	SA	-	-	EXP	5,2857		LGN	1,4644	0,4499
	R5-R7	LGN	1,4999	0,4023	N	6,125	3,423	W	8,4289	1,6614
	R7-R8	EXP	5,417		G	1,7109	2,4067	N	6,8888	2,7200
11/dez	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	N	3,965	1,700
	EM-V2	G	1,192	3,535	N	4,321	2,262	G	1,312	3,337
	V2-R1	G	3,203	2,628	W	10,040	1,693	W	12,036	1,621
	R1-R5	N	4,6250	3,7009	N	5,0000	2,1381	LGN	1,3945	0,4064
	R5-R7	N	6,4286	3,7563	EXP	6,3333		SA	-	-
	R7-R8	EXP	3,2857		G	2,1119	2,2282	N	8,5000	4,0328
21/dez	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	SA	-	-
	EM-V2	SA	-	-	W	5,021	2,991	W	4,980	2,677
	V2-R1	W	10,360	1,930	W	10,478	1,707	W	11,704	1,905
	R1-R5	LGN	1,388	0,585	SA	-	-	EXP	2,8182	
	R5-R7	EXP	7,3333		EXP	6,933		W	8,7895	1,7230
	R7-R8	G	1,8346	2,1462	N	5,0000	2,2913	SA	-	-
31/dez	S-EM	-	-	-	-	-	-	N	3,172	1,627
	EM-V2	-	-	-	-	-	-	SA	-	-
	V2-R1	-	-	-	-	-	-	W	11,762	2,389
	R1-R5	-	-	-	-	-	-	LGN	1,2925	0,3305
	R5-R7	-	-	-	-	-	-	EXP	9,6470	
	R7-R8	-	-	-	-	-	-	W	5,8642	1,8105

*Os parâmetros das fdp G= Gama, W= Weibull e LN= Lognormal são denominados “escalar” e “de forma” e os da fdp N=Normal são denominados de média e desvio-padrão. A fdp EXP= exponencial tem parâmetro denominado “lambda”. SA = sem ajuste.

Tabela 14. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo Vacacaí, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 01 de outubro a 11 de novembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.

DS	Subp.	Grupos de Maturidade Relativa								
		5.9-6.8			6.9-7.3			7.4-8.0		
		fdp	a*	b*	fdp	a*	b*	fdp	a*	b*
01/out	S-EM	-	-	-	-	-	-	SA	-	-
	EM-V2	-	-	-	-	-	-	W	9,002	2,853
	V2-R1	-	-	-	-	-	-	EXP	12,3250	
	R1-R5	-	-	-	-	-	-	G	2,6371	2,0585
	R5-R7	-	-	-	-	-	-	EXP	7,6667	
	R7-R8	-	-	-	-	-	-	W	4,9407	2,5676
11/out	S-EM	-	-	-	SA	-	-	SA	-	-
	EM-V2	-	-	-	W	8,130	2,321	W	8,496	2,426
	V2-R1	-	-	-	LGN	2,117	0,706	G	5,2524	2,1138
	R1-R5	-	-	-	EXP	5,833		LGN	1,6875	0,4838
	R5-R7	-	-	-	G	3,8249	2,1678	W	9,3882	1,7636
	R7-R8	-	-	-	N	3,5625	1,5042	W	5,0723	1,8968
21/out	S-EM	G	1,043	4,491	N	4,500	1,993	W	5,032	2,235
	EM-V2	W	7,354	1,969	W	7,612	1,977	W	7,767	2,039
	V2-R1	G	4,7283	1,9880	SA	-	-	G	5,3442	2,0947
	R1-R5	G	2,1291	2,8180	EXP	6,7500		W	6,0423	1,6751
	R5-R7	W	9,1684	1,7273	W	9,3347	2,3997	W	8,5143	1,8123
	R7-R8	LGN	1,0591	0,6060	W	5,0015	2,2514	LGN	1,8476	0,3826
01/nov	S-EM	W	5,341	3,005	N	4,540	1,773	N	4,694	1,786
	EM-V2	N	5,273	2,528	W	6,055	2,202	N	5,424	2,669
	V2-R1	SA	-	-	G	3,4594	2,8567	W	12,239	1,695
	R1-R5	G	2,9053	2,0449	EXP	6,0588		LGN	1,6794	0,4620
	R5-R7	G	3,9141	1,9260	G	3,3311	2,0639	W	8,4590	1,8854
	R7-R8	SA	-	-	N	5,3600	2,5311	N	5,7826	3,1760
11/nov	S-EM	W	4,362	2,285	SA	-	-	SA	-	-
	EM-V2	N	5,308	2,478	SA	-	-	SA	-	-
	V2-R1	G	2,563	3,385	W	11,548	1,976	G	4,637	2,377
	R1-R5	LGN	1,4752	0,7603	W	7,1662	1,7065	LGN	1,4856	0,6550
	R5-R7	W	7,3273	1,7318	W	9,0583	2,2950	W	9,4985	2,3352
	R7-R8	W	4,8189	2,5843	LGN	1,5101	0,4011	W	6,2988	2,0476

*Os parâmetros das fdp G= Gama, W= Weibull e LN= Lognormal são denominados “escalar” e “de forma” e os da fdp N=Normal são denominados de média e desvio-padrão. A fdp EXP = exponencial tem parâmetro denominado “lambda”. SA = sem ajuste.

Tabela 15. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo Vacacaí, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 21 de novembro a 31 de dezembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.

DS	Subp.	Grupos de Maturidade Relativa								
		5.9-6.8			6.9-7.3			7.4-8.0		
		fdp	a*	b*	fdp	a*	b*	fdp	a*	b*
21/nov	S-EM	G	0,730	5,475	SA	-	-	W	4,130	2,235
	EM-V2	N	5,000	2,394	N	5,161	2,557	N	5,226	2,499
	V2-R1	G	2,923	2,810	W	9,727	1,614	G	3,440	3,063
	R1-R5	G	1,8429	3,2557	W	5,910	1,440	LGN	1,3668	0,6419
	R5-R7	W	8,9128	2,2945	N	6,8276	2,9040	LGN	1,9766	0,4793
	R7-R8	W	4,5220	2,1559	N	5,5500	3,0344	LGN	1,6403	0,5041
01/dez	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	N	3,486	1,522
	EM-V2	SA	-	-	LGN	1,193	0,658	LGN	1,2439	0,637
	V2-R1	W	9,255	1,802	LGN	2,049	0,601	LGN	2,168	0,675
	R1-R5	G	2,4733	2,1480	SA	-	-	G	1,5097	3,7672
	R5-R7	N	7,1034	3,0977	G	2,2989	3,2334	LGN	1,9164	0,6151
	R7-R8	N	4,8888	2,6983	W	4,5216	1,5692	G	1,5698	4,1544
11/dez	S-EM	SA	-	-	W	4,167	2,226	N	3,8395	1,827
	EM-V2	SA	-	-	SA	-	-	G	1,303	3,238
	V2-R1	W	10,774	1,987	N	10,833	6,036	G	3,525	3,404
	R1-R5	LGN	1,527	0,517	G	1,4116	4,0268	N	5,2105	2,5294
	R5-R7	G	2,7775	2,6945	EXP	7,1724		EXP	7,2069	
	R7-R8	EXP	3,6875		LGN	1,4601	0,6403	SA	-	-
21/dez	S-EM	SA	-	-	N	3,321	1,634	SA	-	-
	EM-V2	SA	-	-	G	0,701	6,315	W	4,927	2,660
	V2-R1	W	11,164	2,142	LGN	2,255	0,489	W	13,837	2,415
	R1-R5	LGN	1,6479	0,4007	SA	-	-	W	5,1090	2,4725
	R5-R7	EXP	7,5862		EXP	6,9333		EXP	7,6667	
	R7-R8	LGN	1,2982	0,6008	G	0,7811	7,4980	N	7,2692	4,4771
31/dez	S-EM	-	-	-	-	-	-	N	3,100	1,647
	EM-V2	-	-	-	-	-	-	SA	-	-
	V2-R1	-	-	-	-	-	-	N	11,610	5,069
	R1-R5	-	-	-	-	-	-	W	4,6178	1,6070
	R5-R7	-	-	-	-	-	-	SA	-	-
	R7-R8	-	-	-	-	-	-	G	1,6427	3,3819

*Os parâmetros das fdp G= Gama, W= Weibull e LN= Lognormal são denominados “escalar” e “de forma” e os da fdp N=Normal são denominados de média e desvio-padrão. A fdp EXP = exponencial tem parâmetro denominado “lambda”. SA = sem ajuste.

Cabe ressaltar que as fdps foram ajustadas e testadas utilizando-se dados de dias com excesso hídrico (DExH) apenas dos anos em que este ocorreu, isto é, dos subperíodos dos anos em que $DExH > 0$. Sendo assim, ao contrário dos ajustes realizados para o ciclo da cultura, em que houve excesso hídrico em praticamente todas as datas de semeadura de todos

os anos estudados, isto não ocorreu para os subperíodos principalmente por apresentarem menor duração. Desta forma, nas Tabelas 16 e 17 está apresentado o número de anos em que houve registro de excesso hídrico para cada subperíodo nas diferentes datas de semeadura e grupos de maturidade relativa para os solos São Gabriel e Vacacaí, respectivamente.

Tabela 16. Número de anos com registro de ocorrência de excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo São Gabriel, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR) e as datas de semeadura (DS) simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.

GMR	DS	Subperíodo					
		S-EM	EM-V2	V2-R1	R1-R5	R5-R7	R7-R8
5.9-6.8	01/out	-	-	-	-	-	-
	11/out	-	-	-	-	-	-
	21/out	38	37	34	9	14	16
	01/nov	34	33	26	6	12	17
	11/nov	29	23	30	7	18	18
	21/nov	26	31	29	8	20	14
	01/dez	32	29	33	7	13	12
	11/dez	29	28	31	8	14	14
	21/dez	28	26	31	11	15	16
	31/dez	-	-	-	-	-	-
	Média		30,8	29,6	30,6	8	15,1
6.9-7.3	01/out	-	-	-	-	-	-
	11/out	36	36	36	8	12	10
	21/out	35	37	32	7	12	20
	01/nov	36	33	26	7	17	21
	11/nov	26	24	32	7	20	14
	21/nov	24	31	29	9	14	13
	01/dez	30	29	35	7	16	17
	11/dez	31	28	34	8	15	17
	21/dez	25	27	33	11	15	17
	31/dez	-	-	-	-	-	-
	Média		30,4	30,6	32,1	8	15,1
7.4-8.0	01/out	35	38	39	7	10	13
	11/out	36	36	36	7	12	17
	21/out	37	37	32	5	12	22
	01/nov	35	33	30	5	19	17
	11/nov	25	24	33	6	17	18
	21/nov	28	31	33	6	19	18
	01/dez	34	29	35	8	17	18
	11/dez	29	29	34	9	15	20
	21/dez	28	28	37	11	17	22
	31/dez	29	30	39	12	17	23
	Média		31,6	31,5	34,8	7,6	15,5

Tabela 17. Número de anos com registro de ocorrência de excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o solo Vacacaí, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR) e as datas de semeadura (DS) simuladas em cada ano do período de 1968 a 2012.

GMR	DS	Subperíodo					
		S-EM	EM-V2	V2-R1	R1-R5	R5-R7	R7-R8
5.9-6.8	01/out	-	-	-	-	-	-
	11/out	-	-	-	-	-	-
	21/out	38	37	35	18	24	22
	01/nov	34	33	33	17	26	25
	11/nov	29	26	37	19	33	22
	21/nov	26	31	37	16	31	17
	01/dez	33	32	39	16	29	18
	11/dez	29	30	35	21	31	16
	21/dez	29	27	36	18	29	19
	31/dez	-	-	-	-	-	-
	Média	31,1	30,8	36,0	17,8	29,0	19,9
6.9-7.3	01/out	-	-	-	-	-	-
	11/out	36	37	39	18	24	16
	21/out	36	37	35	16	23	26
	01/nov	37	33	34	17	32	25
	11/nov	27	27	37	16	31	17
	21/nov	25	31	41	18	29	20
	01/dez	30	32	40	22	30	21
	11/dez	32	30	36	19	29	20
	21/dez	28	28	37	20	30	21
	31/dez	-	-	-	-	-	-
	Média	31,4	31,8	37,4	18,3	28,5	20,8
7.4-8.0	01/out	36	38	40	14	24	23
	11/out	36	37	39	15	23	27
	21/out	37	37	36	16	27	26
	01/nov	36	33	39	14	32	23
	11/nov	25	28	40	14	31	21
	21/nov	29	31	41	18	31	24
	01/dez	35	32	41	16	31	23
	11/dez	31	32	37	19	29	23
	21/dez	30	29	39	21	30	26
	31/dez	30	32	41	26	29	27
	Média	32,5	32,9	39,3	17,3	28,7	24,3

Esses valores são importantes tendo em vista que, indiretamente, é a primeira informação de risco de ocorrência de excesso hídrico possível de obter destes resultados. Por exemplo, considerando a média de todas as semeaduras simuladas de todos os GMR para o

solo São Gabriel (Tabela 16), verifica-se a ocorrência de excesso hídrico em aproximadamente 30 dos 44 anos estudados nos subperíodos S-EM e EM-V2. Isso significa que em três de cada dez anos não haveria problema para a cultura nestes subperíodos.

Já para o subperíodo R1-R5, em que os danos por excesso hídrico são bastante acentuados, a média de anos em que se verificou a ocorrência de excesso hídrico pela simulação foi de apenas oito. Entretanto, em cultivos realizados em solos da unidade de mapeamento Vacacaí esse número sobe para 17 (Tabela 17). O período de semeadura no qual se verificou o menor número de anos com registro de excesso hídrico nos três subperíodos mais críticos e prejudiciais da cultura da soja (S-EM, EM-V2 e R1-R5) foi de 01/nov até 01/dez.

Nas Figuras 6, 7 e 8 estão apresentados os valores de probabilidade de ocorrência do número de dias de excesso hídrico acumulados durante os subperíodos S-EM, EM-V2 e V2-R1, obtidos a partir dos parâmetros das fdp ajustadas, para os solos São Gabriel e Vacacaí e para os GMR 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, respectivamente. Consideraram-se apenas os anos que no respectivo subperíodo apresentaram o número de dias com excesso hídrico maior do que zero.

Considerando os GMR 5.9-6.8 e 6.9-7.3, verifica-se que a probabilidade de ocorrência de dois ou mais dias de excesso hídrico no subperíodo S-EM é superior à 0,6, quer seja para o solo São Gabriel (Figura 6A e 7A) quer seja para o Vacacaí (Figura 6B e 7B), em todas as datas de semeadura. Quando se observa a ocorrência de pelo menos quatro dias de excesso hídrico, as semeaduras simuladas até 01/nov apresentaram probabilidade próxima de 0,5, ou seja, em metade dos anos em que for realizada a semeadura da soja nestas datas ocorrerá quatro ou mais dias de excesso hídrico no solo, o que é extremamente prejudicial ao processo germinativo podendo levar à necessidade de ressemeadura.

Os danos ocasionados nesta fase são ocasionados pela rápida embebição de água pela semente levando à ruptura da membrana das células do embrião, redução na respiração aeróbica da semente e produção de substâncias tóxicas (TIAN; NAKAMURA; KOKUBUN, 2005), reduzindo a germinação, a emergência e prejudicando o desenvolvimento da plântula (WUEBKER; MULLEN; KOEHLER, 2001). A partir de 11/nov a probabilidade de ocorrência de quatro dias de excesso é reduzida. Já a probabilidade de ocorrência de pelo menos oito e 12 dias é extremamente baixa, devido, principalmente à curta duração deste subperíodo, em média, menor do que dez dias (TRENTIN et al., 2013).

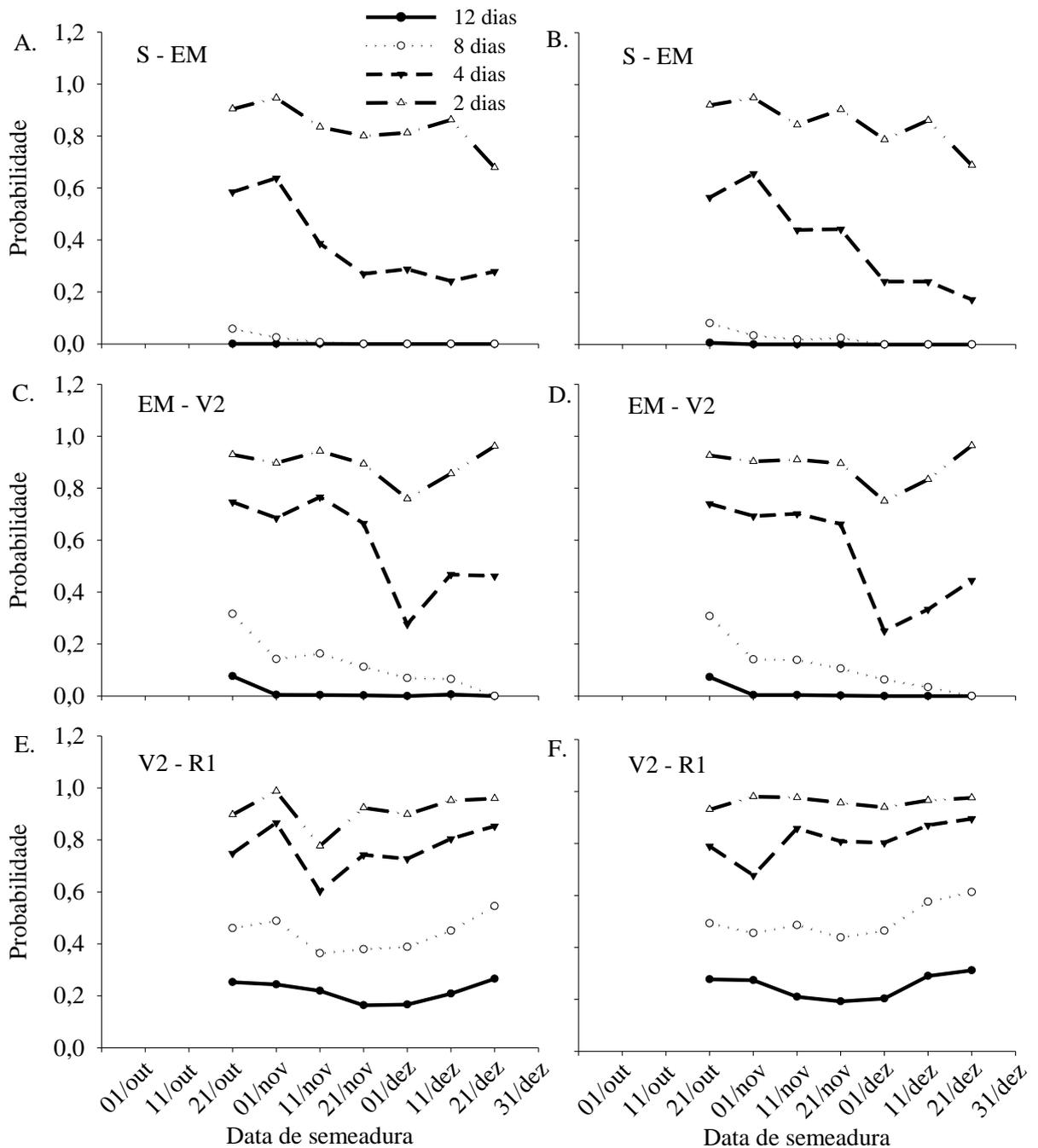


Figura 6. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2) e primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1) de grupo de maturidade relativa 5.9-6.8, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.

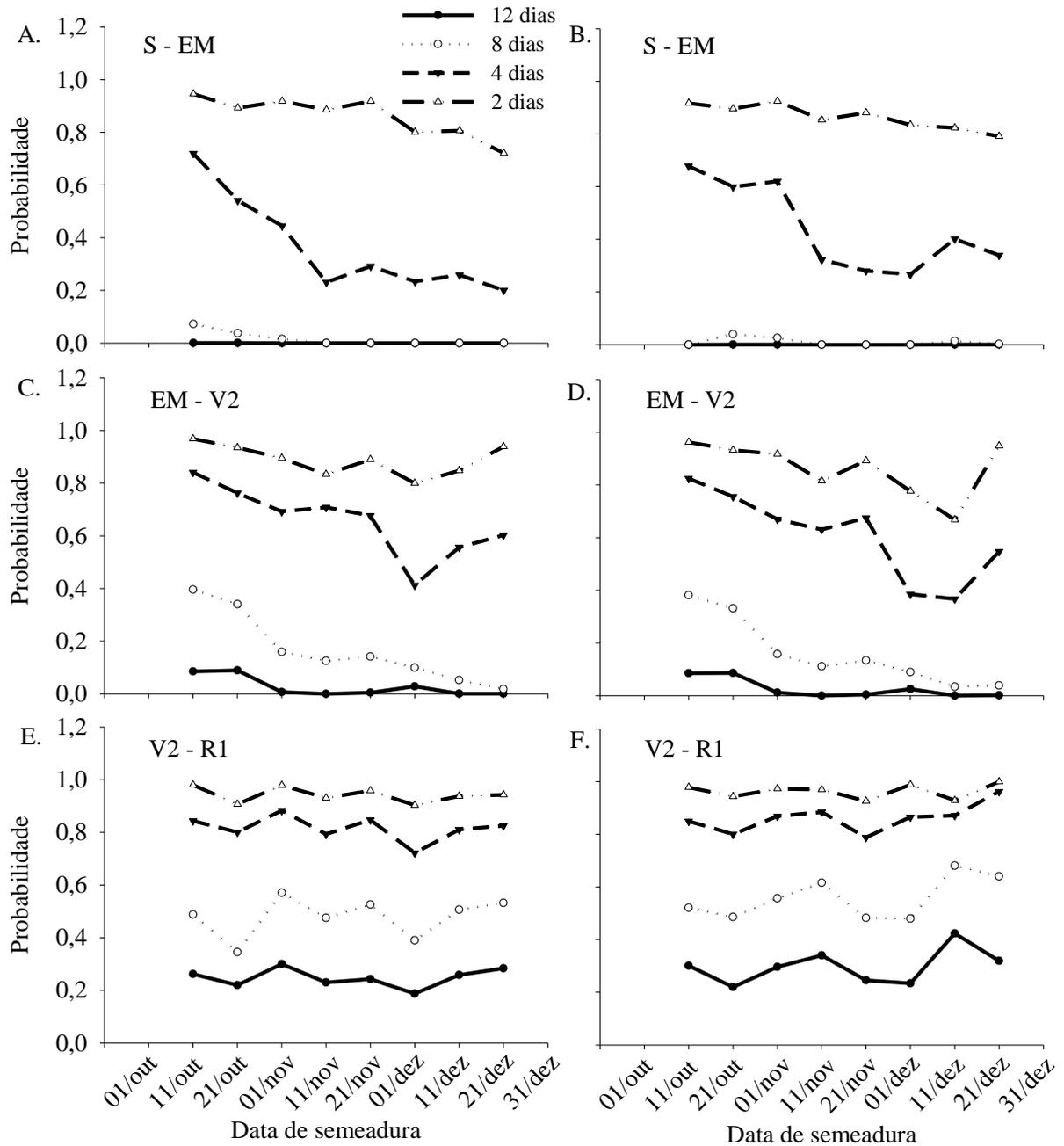


Figura 7. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2) e primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1) de grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em oito datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.

Resultados semelhantes são observados para o GMR 7.4-8.0, em que os maiores valores de probabilidade foram obtidos nas semeaduras mais precoces. O risco de ocorrência

de excesso hídrico acima de quatro dias no solo São Gabriel foi maior que 0,5 nas DS entre 01/out e 01/nov (Figura 8A), semelhante ao verificado para o solo Vacacaí (Figura 8B).

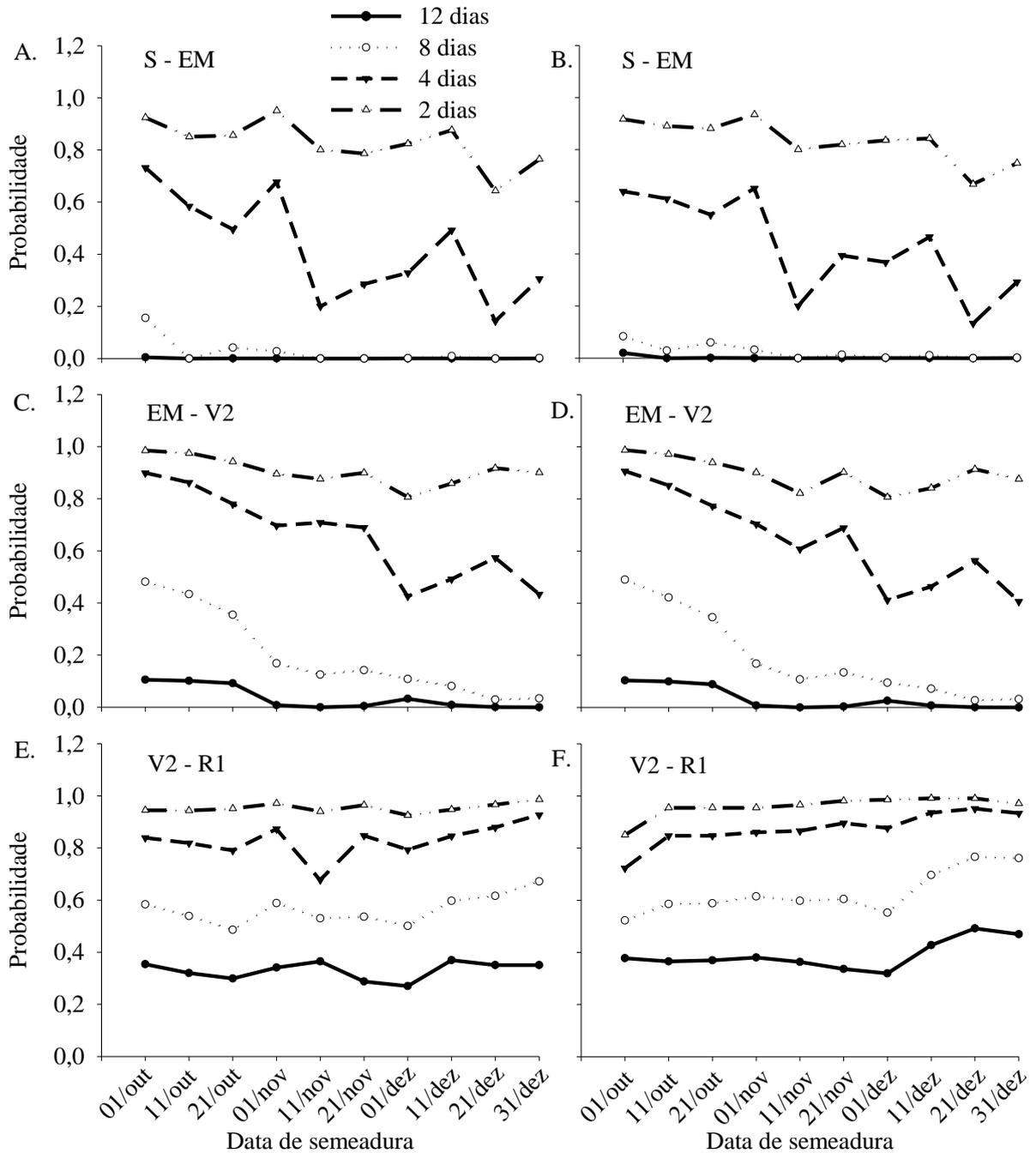


Figura 8. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2) e primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1) de grupo de maturidade relativa 7.4-8.0, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em dez datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.

Para o subperíodo compreendido entre a emergência das plantas até a primeira folha trifoliolada expandida a tendência é semelhante, ou seja, à medida que se avança nas datas de semeadura o risco de ocorrência de excesso hídrico é reduzido (Figuras 6, 7 e 8 C e D). O risco de ocorrência de oito ou mais dias é maior se comparado ao subperíodo S-EM e também é mais elevado nas primeiras datas de semeadura.

A ocorrência de estresses em estágios iniciais de desenvolvimento das plantas pode prejudicar o adequado desenvolvimento do sistema radicular, e também o processo de nodulação, decorrente da simbiose entre a planta e as bactérias do gênero *Bradyrhizobium* que se inicia a partir do estágio V2-V3. Essas bactérias possuem elevada demanda de oxigênio sendo que a fixação biológica é reduzida em condições de hipoxia (BACANAMWO; PURCELL, 1999a), reduzindo a concentração de nitrogênio nas folhas e conseqüentemente a produtividade da cultura (BOARD, 2008).

No subperíodo V2-R1, assim como nos subperíodos anteriores, não foram observadas diferenças expressivas nas probabilidades entre os solos São Gabriel (Figura 6E) e Vacacaí (Figura 6F), assim como entre as DS associadas ao GMR 5.9-6.8. Resultados semelhantes foram obtidos também para os GMR 6.9-7.3 (Figura 7E, F) e 7.4-8.0 (Figura 8E, F). Além disso, para os três GMR considerados, destaca-se uma leve tendência de que a probabilidade de ocorrência de excesso hídrico seja um pouco maior em semeaduras realizadas a partir de 11/dez, principalmente quando se observa a probabilidade de ocorrência de pelo menos oito e 12 dias de excesso hídrico neste subperíodo.

Ressalta-se ainda que a probabilidade de ocorrer oito ou mais dias neste subperíodo ficou próxima de 50%, o que é um valor expressivo. Segundo Berlato (1992), em anos com precipitação igual à precipitação normal, as necessidades hídricas das culturas de verão geralmente não são atendidas. Provavelmente os anos em que ocorreu o fenômeno El Niño tenham contribuído significativamente para que se tenha obtido esse elevado valor de probabilidade. No entanto, na fase vegetativa, a soja apresenta maior tolerância aos estresses ocasionados pelo excesso hídrico no solo em relação à fase reprodutiva (SCOTT et al., 1989; LINKEMER, BOARD, MUSGRAVE, 1998; SCHÖFFEL et al., 2001).

Os danos ocasionados pelo excesso hídrico são mais prejudiciais se ocorrerem durante o subperíodo R1-R5 (SCOTT et al., 1989; SCHÖFFEL et al., 2001). Apesar disso, esse subperíodo foi o que se apresentou menos sujeito à ocorrência deste evento. Observando as Tabelas 16 e 17, verifica-se que a média de anos em que houve excesso hídrico nesse subperíodo em todas as datas de semeadura simuladas foi de aproximadamente oito e 17 de um total de 44 anos, para o solo São Gabriel e Vacacaí, respectivamente. Isto ocorreu pelo

fato de que é nesta fase que há a maior demanda hídrica ao longo de todo o ciclo da cultura, por coincidir na maioria das vezes com o período de maior demanda atmosférica e também pela maior demanda da planta, expressada pelo coeficiente de cultura (Tabela 4), decorrente do índice de área foliar máximo.

Considerando o GMR 5.9-6.8, para o solo São Gabriel (Figura 9A) os resultados mostraram-se bastante variáveis entre as datas de semeadura, como por exemplo, a grande diferença da probabilidade de ocorrência de pelo menos 2 e 4 dias entre as semeaduras de 21/nov e 01/dez, o que não é esperado em um curto período de 10 dias. Essa oscilação, frequentemente observada nos gráficos de probabilidade, ocorre devido ao ajuste de funções de probabilidade diferentes em cada data de semeadura, ou mesmo não ter ocorrido ajuste, utilizando-se valores empíricos, o que podem gerar valores de probabilidade bastante distintos, dependendo de cada situação. No caso mencionado, não houve ajuste de nenhuma função para a semeadura de 21/nov, para a qual então foram utilizadas as frequências empíricas, sendo que para a data de semeadura de 01/dez a função selecionada e utilizada foi a lognormal.

Para o solo Vacacaí, por sua vez, essa oscilação foi bastante insipiente (Figura 9B). A probabilidade de ocorrência de pelo menos 4 dias de excesso hídrico é superior a 0,5 em todas as datas de semeadura, o que já é suficiente para ocasionar redução na produtividade (GRIFFIN; SAXTON, 1988). Destaca-se a DS de 21/dez em que apresenta o maior risco de que ocorra excesso hídrico no subperíodo R1-R5, apesar de a duração deste subperíodo reduzir à medida que se avança nas DS (TRENTIN et al., 2013). As DS que apresentaram menor risco de excesso hídrico nesse subperíodo foram 11/nov e 01/dez (Figura 9B).

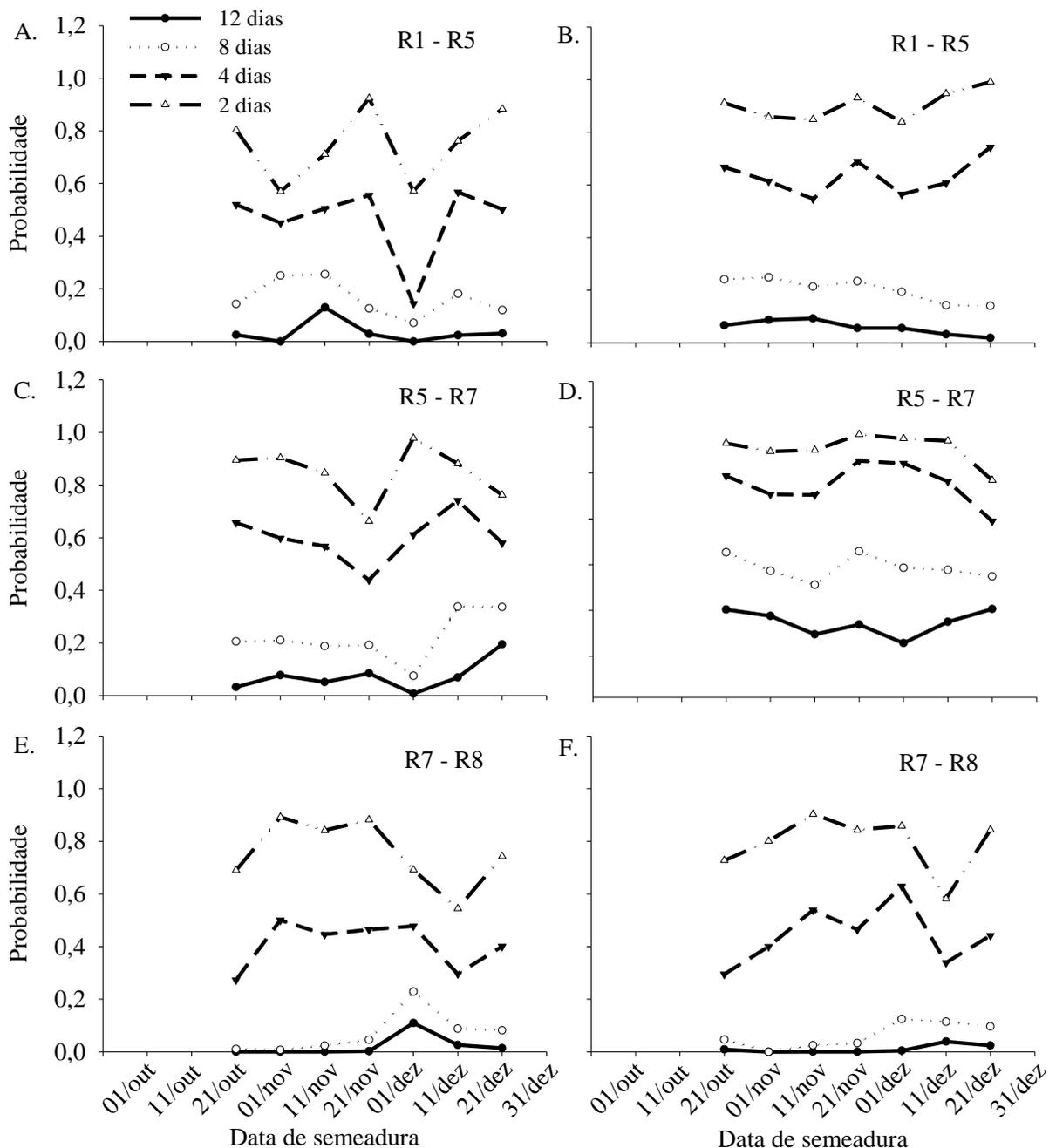


Figura 9. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja início da floração – início do enchimento de grãos (R1-R5), início do enchimento de grãos - início da maturação (R5-R7) e início da maturação – maturação fisiológica (R7-R8) de grupo de maturidade relativa 5.9-6.8, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacá (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.

Considerando os GMR 6.9-7.3 (Figura 10A, B) e GMR 7.4-8.0 (Figura 11A, B) os valores de probabilidade para o subperíodo R1-R5 foram bastante variáveis entre as datas de semeadura e por isso não foi possível distinguir uma data ou grupo de datas de semeadura com menor risco de ocorrência de excesso hídrico. Entretanto, considerando o GMR 6.9-7.3

existe a tendência de que as DS 21/nov e 01/dez apresentem menores riscos para o solo São Gabriel e Vacacaí, respectivamente. Para o GMR 7.4-8.0, a DS 21/nov no solo Vacacaí apresentou os menores valores de probabilidade (Figura 11B).

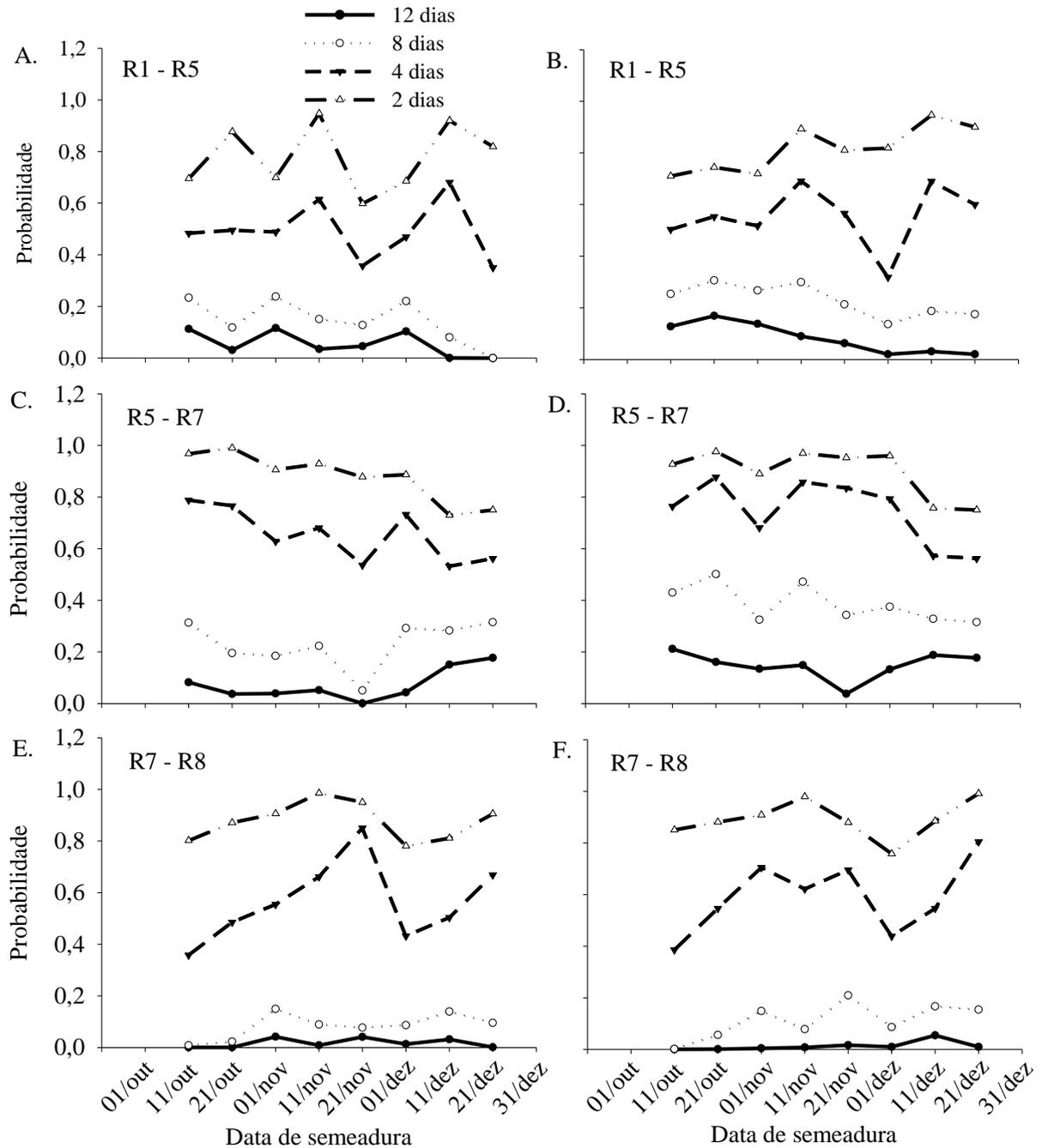


Figura 10. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja início da floração – início do enchimento de grãos (R1-R5), início do enchimento de grãos – início da maturação (R5-R7) e início da maturação – maturação fisiológica (R7-R8) de grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em oito datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.

O subperíodo R5-R7 foi o que apresentou maior diferença entre os solos estudados. As probabilidades de ocorrência de pelo menos 2, 4, 8 e 12 dias no solo São Gabriel (Figuras 9, 10 e 11C) foram menores do que as observadas para o solo Vacacaí (Figura 9, 10 e 11D). Por outro lado, não foram observadas diferenças entre as datas de semeadura e entre GMR.

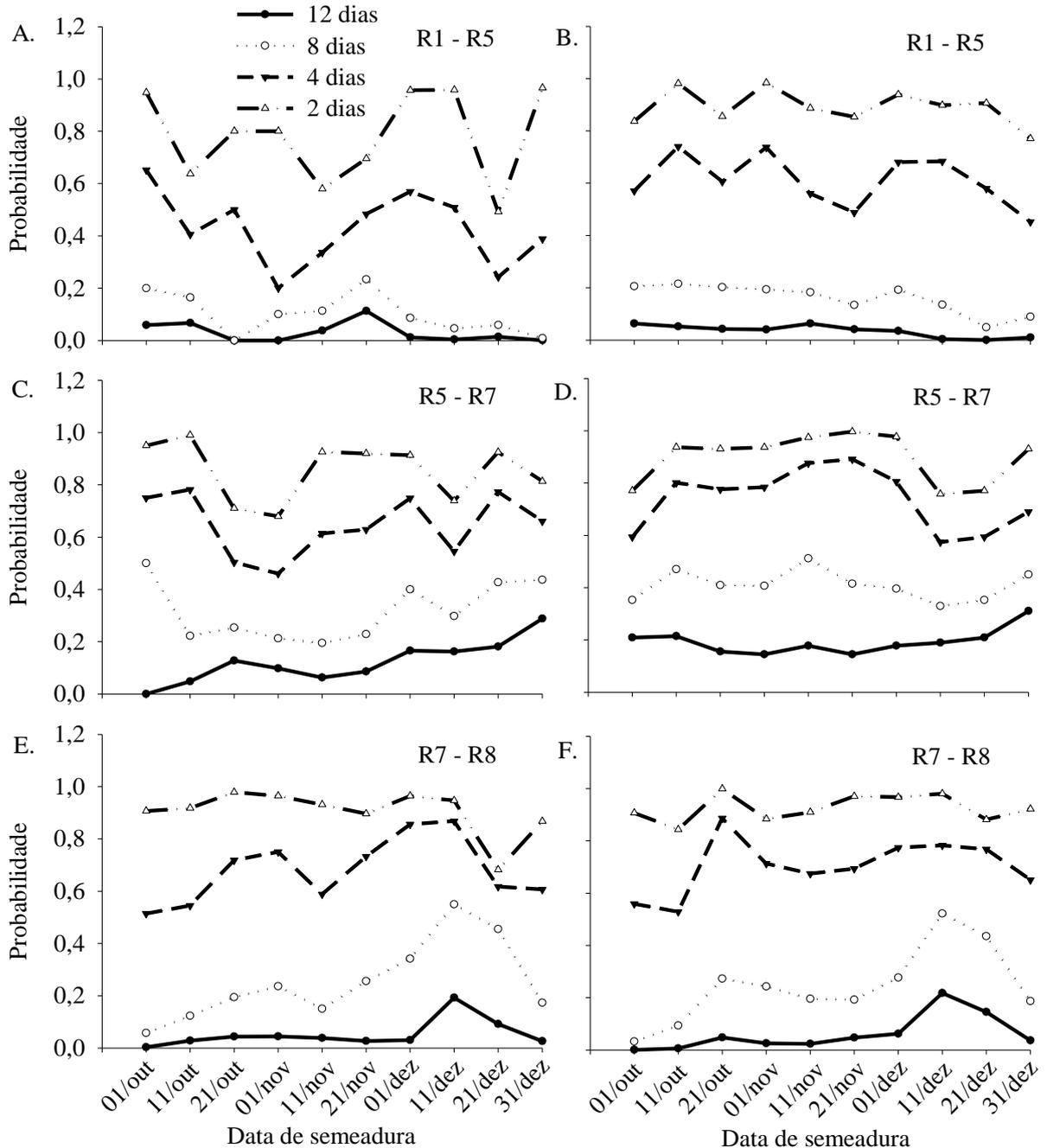


Figura 11. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja início da floração – início do enchimento de grãos (R1-R5), início do enchimento de grãos – início da maturação (R5-R7) e início da maturação – maturação fisiológica (R7-R8) de grupo de maturidade relativa 7.4-8.0, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacaí (B, D, F), em dez datas de semeadura simuladas de 1968 a 2012.

As cultivares de soja pertencentes ao GMR 5.9-6.8 e semeadas em 21/out chegarão ao estágio de início da maturação (R7) no final do mês de fevereiro, no qual a precipitação média mensal é inferior à de março e principalmente à do mês de abril (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009). Já para as semeaduras realizadas no final do calendário de semeadura recomendado no zoneamento agrícola, o subperíodo de maturação (R7-R8) coincidirá com os meses mais chuvosos, na média dos anos. Além disso, quanto mais tardiamente a planta chegar à fase de maturação menor é o processo de evaporação da água no solo e menor é a evapotranspiração potencial, ficando mais provável a ocorrência de excesso hídrico, o que pode prejudicar o processo de colheita.

Desta forma, observa-se que a semeadura realizada em 21/out no solo São Gabriel (Figura 9E) e em 21/out e 01/nov para o solo Vacacaí (Figura 9F) apresentam as menores probabilidades de ocorrer pelo menos 2 e 4 dias de excesso hídrico nesse subperíodo. Também é possível observar o aumento da probabilidade de ocorrência de pelo menos 8 dias de excesso hídrico em semeaduras tardias, a partir de 01/dez.

Considerando o GMR 6.9-7.3 (Figura 10E, F), apesar de algumas oscilações, essa tendência é um pouco ressaltada, sendo que as semeaduras mais precoces apresentaram as menores probabilidades de ocorrência de excesso hídrico no subperíodo R7-R8. Posteriormente, ocorre um aumento das probabilidades, principalmente quando se observa a probabilidade de ocorrência de 8 dias ou mais de excesso hídrico. Para o GMR 7.4-8.0 (Figura 11E, F), observou-se uma redução a partir da semeadura de 01/dez, indo de encontro com a tendência verificada para os demais GMR. Isso ocorreu provavelmente devido à redução da duração deste subperíodo nestas datas (TRENTIN et al., 2013).

4.4 Excesso hídrico na cultura da soja associado ao fenômeno ENOS

Na avaliação dos resultados da análise de variância, verificou-se que não houve interação significativa entre os três fatores analisados (DS*Solo*ENOS) para nenhum dos grupos de maturidade relativa (APÊNDICE G). O efeito isolado do fator “Solo” foi significativo para todos os grupos de maturidade relativa (GMR) e o efeito das DS foi significativo apenas para os GMR 5.9-6.8 e GMR 6.9-7.3, o que já foi discutido anteriormente. Também houve significância para o efeito isolado do fator “ENOS” e interação dupla entre os fatores DS e ENOS para todos os GMR.

Observando a Tabela 18, verifica-se que em anos sob influência do fenômeno El Niño ocorre um maior número de dias sob a condição de excesso hídrico no solo, independentemente do GMR considerado, consequência do aumento das precipitações em anos sob influência deste fenômeno no Rio Grande do Sul (FONTANA; BERLATO, 1997). Este resultado é importante, tendo em vista que até então, de acordo com trabalhos realizados por Berlato; Fontana (1999); Alberto et al. (2006) , verificou-se que o rendimento de grãos da cultura da soja é maior em anos de El Niño.

Entretanto, estes trabalhos não consideraram o cultivo em Planossolos ou em áreas de várzea, em que o processo de drenagem é deficiente. Nestas condições, precipitações acima da média podem ter efeito negativo para a produtividade da cultura, devendo-se assim procurar estabelecer formas de manejo que minimizem o problema ou mesmo não correr riscos, optando por não semear soja nas áreas de Planossolos mais expostas à má drenagem.

Tabela 18. Número médio de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja, dos grupos de maturidade relativa 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, ocorridos em datas de semeadura simuladas em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012, em Planossolos.

ENOS	Grupo de Maturidade Relativa		
	5.9-6.8	6.9-7.3	7.4-8.0
El Niño	22,9 a	25,2 a	28,2 a
La Niña	18,6 b	20,1 b	23,7 b
Neutro	18,3 b	20,2 b	22,7 b
Média	20,0	21,8	24,9
CV (%)	54,1	52,3	49,8

Foi possível identificar também uma leve tendência de que em anos Neutros o número de dias com excesso hídrico seja menor que em anos sob influência de La Niña, indo ao encontro dos resultados obtidos por Alberto et al. (2006) para a cultura do milho e da soja e por Maldaner (2012) para o girassol em que há maior risco de deficiência hídrica para essas culturas em anos Neutros.

Em anos sob influência do fenômeno El Niño, observa-se a tendência de que em semeaduras realizadas no início do calendário de semeadura, principalmente até 01/nov, o número médio de dias com excesso hídrico ao longo do ciclo da cultura é maior em relação às demais DS (Tabela 19). Além disso, nota-se que a partir de 11/dez também ocorre um

aumento das médias obtidas, o que é mais facilmente percebido quando se observa os resultados do GMR 7.4-8.0.

Tabela 19. Número médio de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja, dos Grupos de Maturidade Relativa 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, ocorridos em cada data de semeadura simulada em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012, para os solos São Gabriel e Vacacaí.

ENOS	Datas de semeadura	Grupo de Maturidade Relativa		
		5.9-6.8	6.9-7.3	7.4-8.0
El Niño	01/out	-	-	32,9 a
	11/out	-	31,3 a	32,4 a
	21/out	27,3 a	28,6 a	30,7 a
	01/nov	24,2 a	26,6 a	28,9 b
	11/nov	22,1 a	23,5 b	24,9 b
	21/nov	22,6 a	23,1 b	26,9 b
	01/dez	19,4 a	21,4 b	24,2 b
	11/dez	21,0 a	23,2 b	26,8 b
	21/dez	23,6 a	23,7 b	27,1 b
	31/dez	-	-	27,3 b
La Niña	01/out	-	-	21,7 b
	11/out	-	18,6 a	19,7 b
	21/out	17,9 a	18,1 a	20,7 b
	01/nov	16,7 a	19,2 a	21,6 b
	11/nov	17,7 a	19,2 a	22,0 b
	21/nov	17,0 a	17,9 a	24,2 b
	01/dez	19,3 a	21,2 a	27,4 a
	11/dez	20,6 a	23,1 a	28,4 a
	21/dez	20,8 a	23,3 a	28,6 a
	31/dez	-	-	28,8 a
Neutro	01/out	-	-	28,1 a
	11/out	-	25,5 a	26,8 a
	21/out	23,6 a	25,3 a	27,6 a
	01/nov	22,3 a	23,4 a	24,3 a
	11/nov	18,2 b	18,8 b	19,6 b
	21/nov	17,5 b	17,8 b	19,7 b
	01/dez	15,4 b	17,3 b	19,5 b
	11/dez	14,9 b	16,3 b	19,2 b
	21/dez	16,0 b	17,2 b	20,8 b
	31/dez	-	-	21,5 b

Isso acontece devido a maior influência do fenômeno ENOS no mês de maio (STRECK et al., 2008c), ocasionando um “repique” de chuvas (BERLATO; FONTANA, 2003), o que aumenta o número de dias com chuva ao longo do ciclo e principalmente no

subperíodo R7-R8, podendo ser prejudicial à operação da colheita. Esse processo é bastante característico deste fenômeno, não sendo observado para os anos Neutros. Entretanto, assim como em anos de El Niño, as maiores médias de dias com excesso hídrico nos anos Neutros também foram obtidas em sementeiras realizadas até 01/nov (Tabela 19).

Já para anos sob influência do fenômeno de La Niña verificou-se que para sementeiras realizadas até 21/nov, houve o menor número médio de dias com excesso hídrico dentre os fenômenos analisados, devido ao efeito de La Niña ser mais pronunciado nos meses de outubro até dezembro (BERLATO; FONTANA, 2003). Por outro lado, as sementeiras realizadas a partir de 01/dez do GMR 7.4-8.0 foram as que apresetaram as maiores médias de dias com excesso hídrico durante o ciclo, inclusive superiores as obtidas para anos de El Niño (Tabela 19). Trentin (2013) também verificaram a menor necessidade de lâmina de irrigação neste período em anos de La Niña e concluiu que há menor déficit hídrico em sementeiras de fim de dezembro para a cultura da soja.

Nas Figuras 12, 13 e 14 estão apresentados os valores de probabilidade de ocorrência de pelo menos 2, 4, 8 e 12 dias com excesso hídrico no subperíodo S-V2, para os GMR 5.9-6.8, GMR 6.9-7.3 e GMR 7.4-8.0, respectivamente, obtidos após o ajuste e teste das fdps. Pode-se inferir que em anos Neutros ocorre uma redução dos valores de probabilidade de ocorrência de dias com excesso hídrico ao longo das datas de sementeira, principalmente em função da maior demanda atmosférica em sementeiras mais tardias. Já em anos sob influência do fenômeno El Niño essa diferença é bastante reduzida em função da ocorrência de precipitação pluvial superior à média e também pelo maior número de dias de chuva a partir de novembro em relação aos anos neutros (BERLATO; FONTANA, 2003).

De maneira geral, o risco de ocorrência de excesso hídrico no subperíodo S-V2 em anos de El Niño é maior que para anos Neutros, expressado pelos maiores valores de probabilidade obtidos. Nota-se que a probabilidade de ocorrência de 4 dias ou mais de excesso hídrico é superior a 0,5 para sementeiras realizadas até 21 de novembro em anos de El Niño. Em anos sob influência do fenômeno de La Niña os valores de probabilidade de ocorrência de excesso hídrico mostraram-se bastante variáveis entre as datas de sementeira. Apesar disso, existe uma tendência de redução de risco de excesso hídrico do início para o final do calendário de sementeira (Figuras 12, 13 e 14).

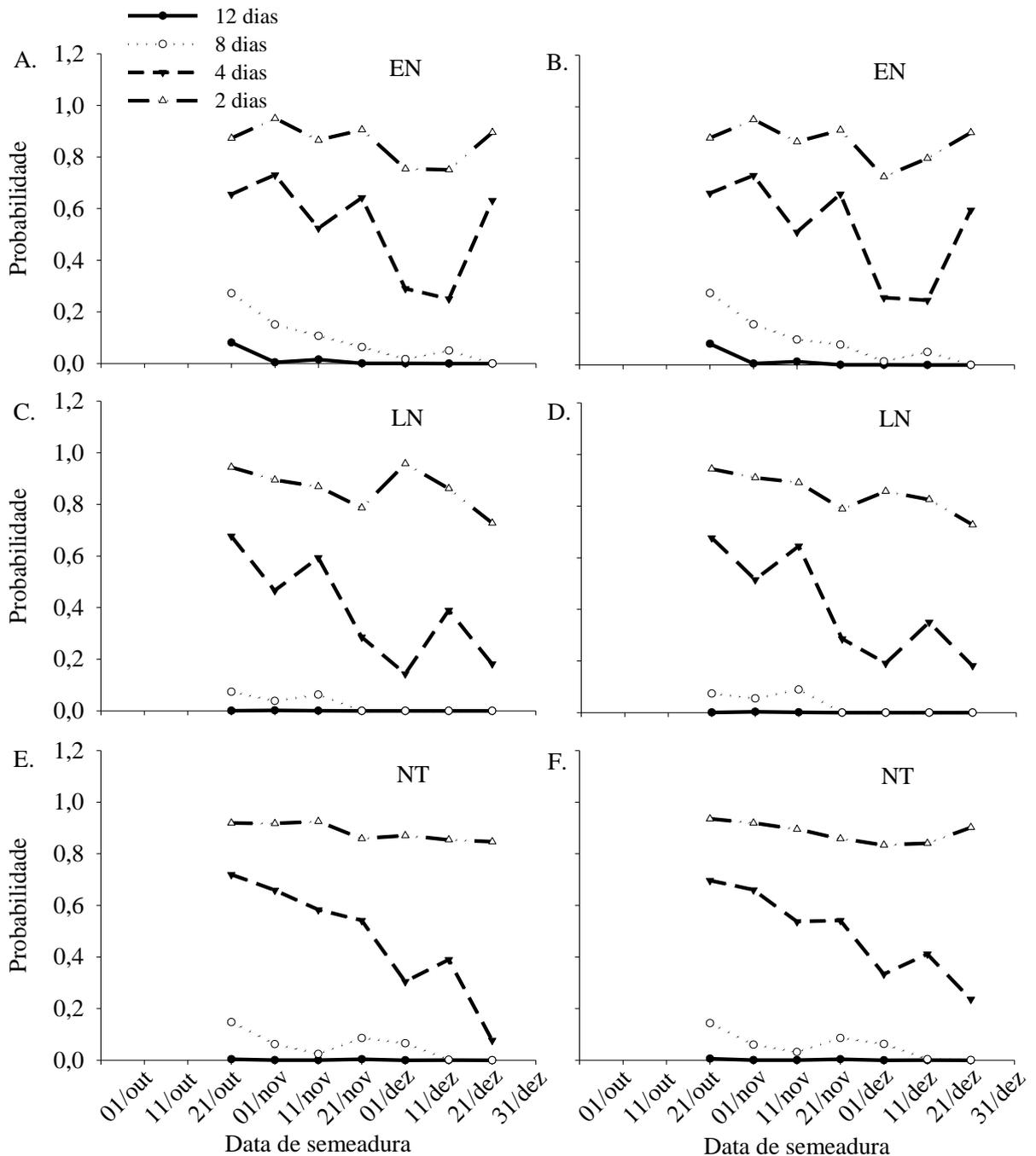


Figura 12. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante o subperíodo de desenvolvimento da soja compreendido entre a semeadura e a primeira folha trifoliolada (S-V2) do grupo de maturidade relativa 5.9-6.8, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacá (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012.

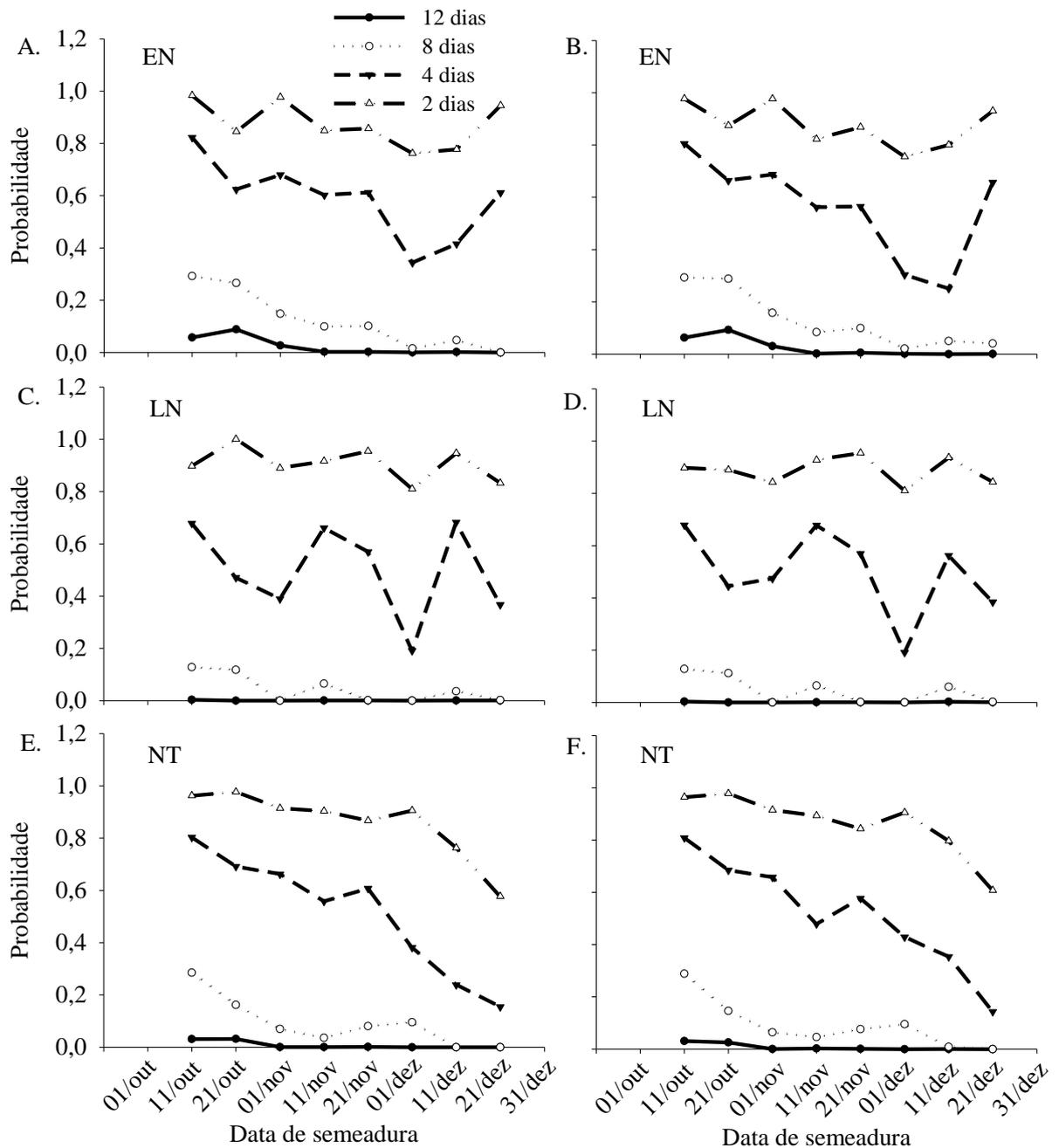


Figura 13. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante o subperíodo de desenvolvimento da soja compreendido entre a semeadura e a primeira folha trifoliolada (S-V2) do Grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacá (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012.

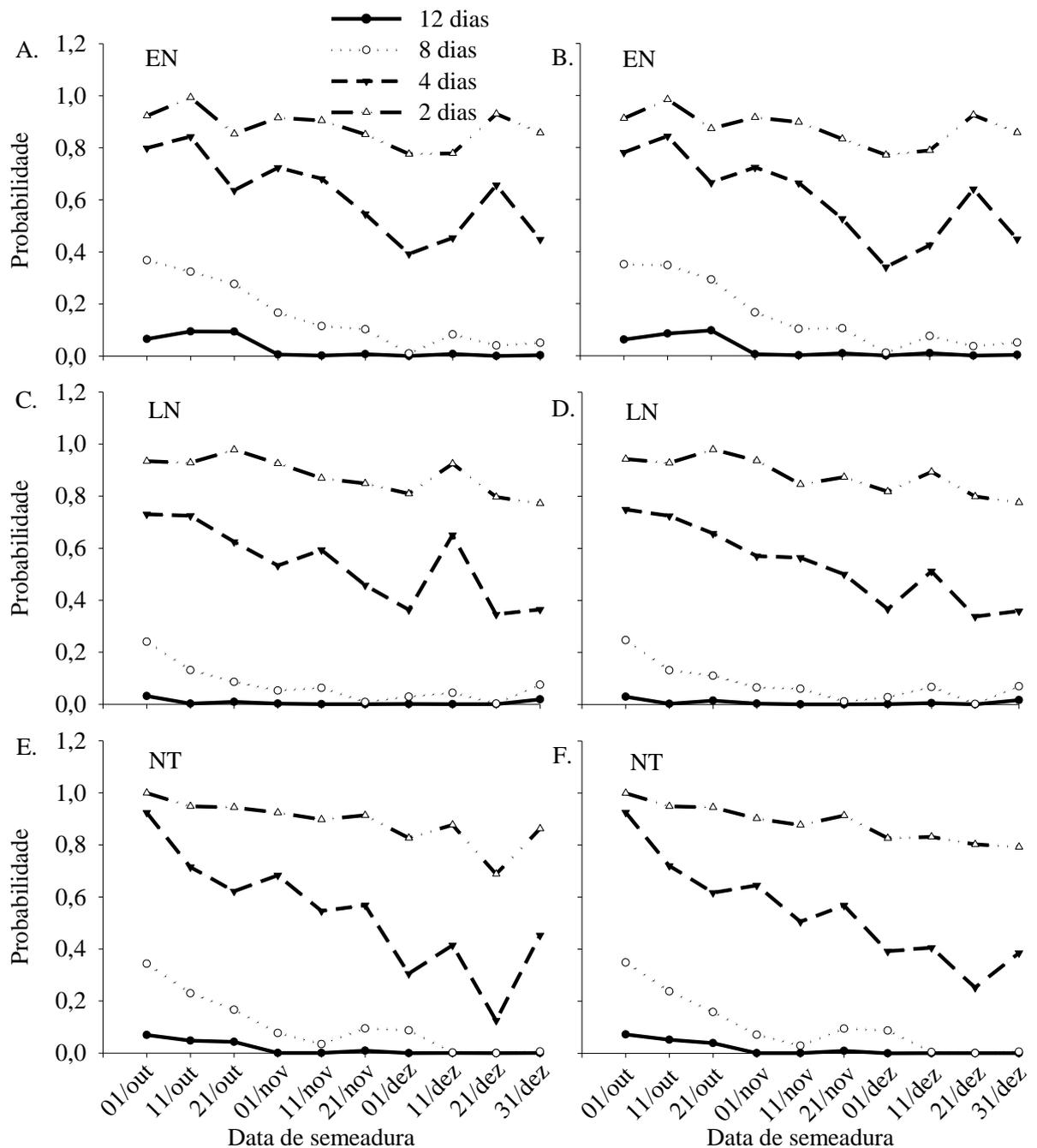


Figura 14. Probabilidade de ocorrência do número de dias com excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante o subperíodo de desenvolvimento da soja compreendido entre a semeadura e a primeira folha trifoliolada (S-V2) do grupo de maturidade relativa 7.4-8.0, para os solos São Gabriel (A, C, E) e Vacacá (B, D, F), em sete datas de semeadura simuladas em anos Neutros (NT) e sob influência dos fenômenos El Niño (EN) e La Niña (LN) do período de 1968 a 2012.

5 CONCLUSÕES

Para os GMR 5.9-6.8 e GMR 6.9-7.3, as semeaduras realizadas até 01/nov apresentam o maior número médio de dias com excesso hídrico ao longo do ciclo. Já a janela de semeadura compreendida entre 01/nov e 11/dez apresenta a menor média de dias com excesso hídrico ao longo do ciclo, considerando o GMR 7.4-8.0.

Semeaduras realizadas após 01/nov apresentam menos dias com excesso hídrico e menor risco de ocorrência de excesso hídrico no subperíodo compreendido entre a semeadura e a emergência, colocando-as como mais favoráveis para a semeadura da soja em Planossolos.

As plantas cultivadas em solos pertencentes à UM Vacacaí são submetidas a um maior número de dias com excesso hídrico em relação aos solos da UM São Gabriel. No entanto, o tipo de solo mostra-se menos importante do que a definição da época de semeadura para minimizar os riscos prováveis.

As funções densidade probabilidade que melhor se ajustam aos dados de excesso hídrico na cultura da soja em Planossolos são, em ordem decrescente, gama, lognormal, weibull e normal para o ciclo total e weibull, gama, normal, lognormal e exponencial, para valores obtidos para os subperíodos.

Para o ciclo da cultura, de maneira geral, existe um maior risco de ocorrência de excesso hídrico para as semeaduras realizadas no mês de outubro. Para as cultivares do GMR 7.4-8.0, a janela de semeadura mais favorável está compreendida entre 01/nov e 01/dez.

Verifica-se a ocorrência de excesso hídrico nos subperíodos S-EM e EM-V2 em aproximadamente 70% dos anos estudados, considerando a média de todas as semeaduras simuladas. Para o subperíodo R1-R5, esse valor cai para 20 e 40% dos anos para os solos São Gabriel e Vacacaí, respectivamente.

O número médio de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja é maior em anos sob influência do fenômeno El Niño, assim como é maior o risco de ocorrência de excesso hídrico para o subperíodo S-V2, em relação aos anos Neutros e de La Niña.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO, C. M. et al. Modelo para estimar o termo aerodinâmico na equação de Penman na ausência de dados de vento. In: XVII JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2002. 1 CD-ROM.

ALBERTO, C. M. et al. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.7, p.1067-1075, 2006.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.

ARAKI, H. Water uptake of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during exposure to O₂ deficiency and field level CO₂ concentration in the root zone. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1, p. 98–105, 2006.

ARAÚJO, E. M. et al. Aplicação de seis distribuições de probabilidade a séries de temperatura máxima em Iguatu – CE. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 36-45, 2010.

ASSIS, F. N.; ARRUDA, H. V.; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatísticas à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: UFPEL, 1996. 161p.

ASSIS, J. P. et al. Ajuste de series históricas de temperatura e radiação solar global diária às funções densidade de probabilidade normal e log-normal, em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 113-121, 2004.

BACANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources, and hypoxia. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 50, n. 334, p. 789-796, 1999a.

BACANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding. **Crop Science**, Madison, v. 39, n. 1, p. 143-149, 1999b.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre, n. 7, 1981. 96p. (Boletim Técnico – IPAGRO).

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, H. (Coord.) **Agrometeorologia Aplicada à Irrigação**. Porto Alegre, Editora da Universidade / UFRGS. p. 11-23. 1992.

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**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 119-125, 1999.

BERLATO, M. A.; MELLO, R. W.; FONTANA, D. C. Risco de ocorrência de granizo no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 121-132, 2000.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2003. 110p.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 423-432, 2005.

BOARD, J. E. Waterlogging effects on plant nutrient concentrations in soybean. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 31, n. 5, p. 828–838, 2008.

BORU, G.; VANTOAI, T.; ALVES, J.; HUA, D.; KNEE, M. Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 4, p. 447–453. 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: DNPEA, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, nº 30).

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. Portaria nº 133, de 25 de julho de 2014. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2014/2015**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2014.

BURIOL, G. A. et al. Probabilidade de ocorrência de valores de radiação solar prejudiciais ao cultivo do pepineiro na região do baixo vale do Taquari, RS. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 97-104, 2001.

BURIOL, G. A. et al. Homogeneidade e estatísticas descritivas dos totais mensais e anuais de chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 89-97, 2006.

BURIOL, G.A. et al. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 9, p. 1563-1567, 2012.

CAMPOS, H. **Estatística experimental não paramétrica**. Piracicaba: ESALQ, 1983. 349p.

CARDOSO, C. D. V. **Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nos solos da região Central do Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 162f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CATALUNHA, M. J. et al. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 153-162, 2002.

CLIMATE PREDICTION CENTER (CPC). Online. Disponível em:
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
Acessado em: 17 de dezembro de 2014.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Soja - Brasil: Série histórica de área plantada / Companhia Nacional de Abastecimento**. – Brasília: Conab, 2014. Online. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&> Acessado em: 19 de dezembro de 2014.

CÔRTE FILHO, P. P. **Efeito de profundidades do nível freático em várzeas arrozeiras nos componentes da produção da soja**. 1984. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1984.

CUNHA, G. R. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001.

DOURADO NETO, D. et al. Balance hídrico ciclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua en el suelo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 537-546, 1999.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979. Não paginado.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. SOJA. In: MONTEIRO, J. E. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009, p. 261-278.

FEHR, W. R.; CAVINES, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977, 21p. (Special Report 80)

FISCHER, G. et al. Thermodynamical and dynamical structures of the global atmosphere. In: HELLWEGE, K., MODELUNG, H. (Ed.). **Numerical data and functional relationships in Science and Technology / LAMDOLT-BÖRNSTEIN (New Ser.)**, v. 4. Springer-Verlag, Berlin, 491p., 1987.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 127-132, 1997.

FRIZZONE, J. A. et al. **Planejamento de irrigação: Análise de decisão de investimentos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 626 p.

GRIFFIN, J. L.; SAXTON, A. M. Response of solid-seeded soybean to flood irrigation. II. Flood duration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, n. 6, p. 885–888, 1988.

HELDWEIN A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria. **Revista Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 38, p. 43-58, 2009.

INMET. Normais climatológicas (1961-1990). Brasília, 84 p. 1992.

INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ. **Safras: Soja em rotação com arroz**. 2014. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/conteudo/4215/safras>>. Acessado em: 18 dez. 2014.

KIESLING, T. C. Calculation of the length of the day. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, n. 4, p.758-759, 1982.

KIRKPATRICK, M. T.; ROTHROCK, C. S.; RUPE, J. C. Soybean response to flooded soil conditions and the association with soilborne plant pathogenic genera. **Plant Disease**. St. Paul, v. 90, n. 5, p. 592–596, 2006.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba/SP: DCE-ESALQ/USP, 1995, 497p.

LINKEMER, G.; BOARD, J. E.; MUSGRAVE, M. E. Waterlogging effect on growth and yield components of late-planted soybean. **Crop Science**, Madison, v. 38, n. 6, p. 1576–1584, 1998.

LUCAS, D. D. P. **Risco de ocorrência de excesso hídrico para a cultura do girassol na região central do Rio Grande do Sul**. 2014. 100f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

MALDANER, I. C. **Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica na cultura do girassol na região central do Rio Grande do Sul**. 2012. 141f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

MANICA, I.; COSTA, J. A. **Cultura da soja**. Porto Alegre: Evangraf. 1996. 233p.

MARCHEZAN, E. et al. Desempenho de genótipos de arroz irrigado cultivados no sistema pré-germinado com inundação contínua. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1349-1354. 2004.

MARTORANO, L.G. et al. **Decision Strategies for Soil Water Estimations in Soybean Crops Subjected to No-Tillage and Conventional Systems, in Brazil**. In: Manish Kumar. (Org.). Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. Rijeka: InTech - Open Access Publisher, 2012, p. 439-453.

MATZENAUER, R.; BARNI, N. A.; MALUF, J. R. T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

MOTA, F. S. et al. Análise agroclimatológica da necessidade de irrigação da soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 133-138, 1996.

MURRAY, F. W. On the computation of saturation vapor pressure. **Journal of Applied Meteorology**, Amsterdam, v. 6, n. 1, p. 203-204, 1967.

NIED, A. H. et al. Épocas de semeadura do milho com menor risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2005.

OOSTERHUIS, D. M. et al. Physiological response of two soybean [*Glycine max* L. Merr] cultivars to short-term flooding. **Environmental and Experimental Botany**, v. 30, n. 1, p. 85–92, 1990.

PERAZA, J. E. S. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. 2003. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba – RS: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PIRES, J. L. F.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. Adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 1, p. 41-50, 2002.

REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 38., 2010, Cruz Alta. **Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2010/2011 e 2011/2012**. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 2010. 168p.

RODRIGUES, O. et al. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 431-437, 2001.

SAIRAM, R. K. et al. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. **Biologia Plantarum**, v. 52, n. 3, p. 401–412, 2008.

SANTOS, O. S. (Coord.). **A cultura da soja**: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná. 2. ed. São Paulo: Globo, 1995. (Coleção do agricultor. Grãos; Publicações Globo Rural).

SAS INSTITUTE. SAS-STAT: user's guide. 8th ed. Cary: SAS Institute, 2001.

SCHNEIDER, F. M. et al. Temperatura base e soma térmica do subperíodo semeadura emergência para algumas cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 299-308, 1987.

SCHÖFFEL, E. R. **Comportamento de cultivares de soja, em solo hidromórfico, sob condições de excesso hídrico.** 1997. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

SCHÖFFEL, E. R. et al. Excesso hídrico sobre os componentes de rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 7-12, 2001.

SCOTT, H. D. et al. Flood duration effects on soybean growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 631–636, 1989.

SETIYONO, T. D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 100, p. 257-271, 2007.

SHIMAMURA, S. et al. Secondary aerenchyma formation and its relation to nitrogen fixation in root nodules of soybean plants (*Glycine max*) grown under flooded conditions. **Plant Production Science**, [S.l.], v. 5, n. 4, p. 294–300, 2002.

SILVA, J. C. **Épocas de menor risco de estresse hídrico e térmico para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul.** 2005. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SILVA, J. C. **Parâmetros de irrigação para o feijoeiro em diferentes solos e épocas de semeadura na região central do Rio Grande do Sul.** 2008. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SILVA, J. G.; SENTELHAS, P. C.; Diferença de temperatura mínima do ar medida no abrigo e na relva e probabilidade de sua ocorrência em eventos de geada no Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 9-15, 2001.

SILVA, J.C. et al. Análise de distribuição de chuva para Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 67-72, 2007.

SILVA, J. C. et al. Funções de distribuição de probabilidade decendial e mensal para a deficiência hídrica no solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 7, p. 1893-1899, 2008.

SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain productivity. I. Model development. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 15, n. 2, p.125-141, 1986.

SINCLAIR, T. R. et al. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. **Crop Science**, Madison, v. 31, n. 3, p. 786–790, 1991.

SINCLAIR, T. R. et al. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. **Agricultural Systems**, v. 94, n. 2, p. 471-477, 2007.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008a. 222 p.

STRECK, N. A. et al. Estimativa do plastocrono em cultivares de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 67-73, 2008b.

STRECK, N. A. et al. O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a variabilidade interanual da evaporação do tanque Classe A e da umidade relativa do ar em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 5, p. 1452-1455. 2008c.

STRECK, N. A. et al. Improving node number simulation in soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 7, p. 661-668, 2009.

SULLIVAN, M. et al. Evaluating on-farm flooding impacts on soybean. **Crop Science**, Madison, v. 41, p. 93–100, 2001.

THOMAS, A. L.; GUERREIRO, S. M. C.; SODEK, L. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root of system of nodulated soybean. **Annals of Botany**, Oxford, v. 96, p. 1191–1198, 2005.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology, [S.l.], v. 3, n. 10, 1955. 104 p.

TIAN X-H.; NAKAMURA T.; KOKUBUN M. The role of seed structure and oxygen responsiveness in pre-germination flooding tolerance of soybean cultivars. **Plant Production Science**, [S.l.] v. 8, n.2, p. 157-65, 2005.

TRENTIN, G. **Parâmetros de irrigação por análise numérica para a cultura do milho na Região Central do Rio Grande do Sul**. 2009. 192 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

TRENTIN, R. **Parâmetros e probabilidades de irrigação para a cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul por análise numérica**. 2013. 145f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

TRENTIN, R. et al. Subperíodos fenológicos e ciclo da soja conforme grupos de maturidade e datas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 7, p. 703-713, 2013.

WUEBKER E. F; MULLEN, R. E.; KOEHLER, K. Flooding and temperature effects on soybean germination. **Crop science**, Madison, v. 41, p. 1857-1861, 2001.

VAREJÃO SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Brasília: INMET, Stilo, 2000. 532 p.

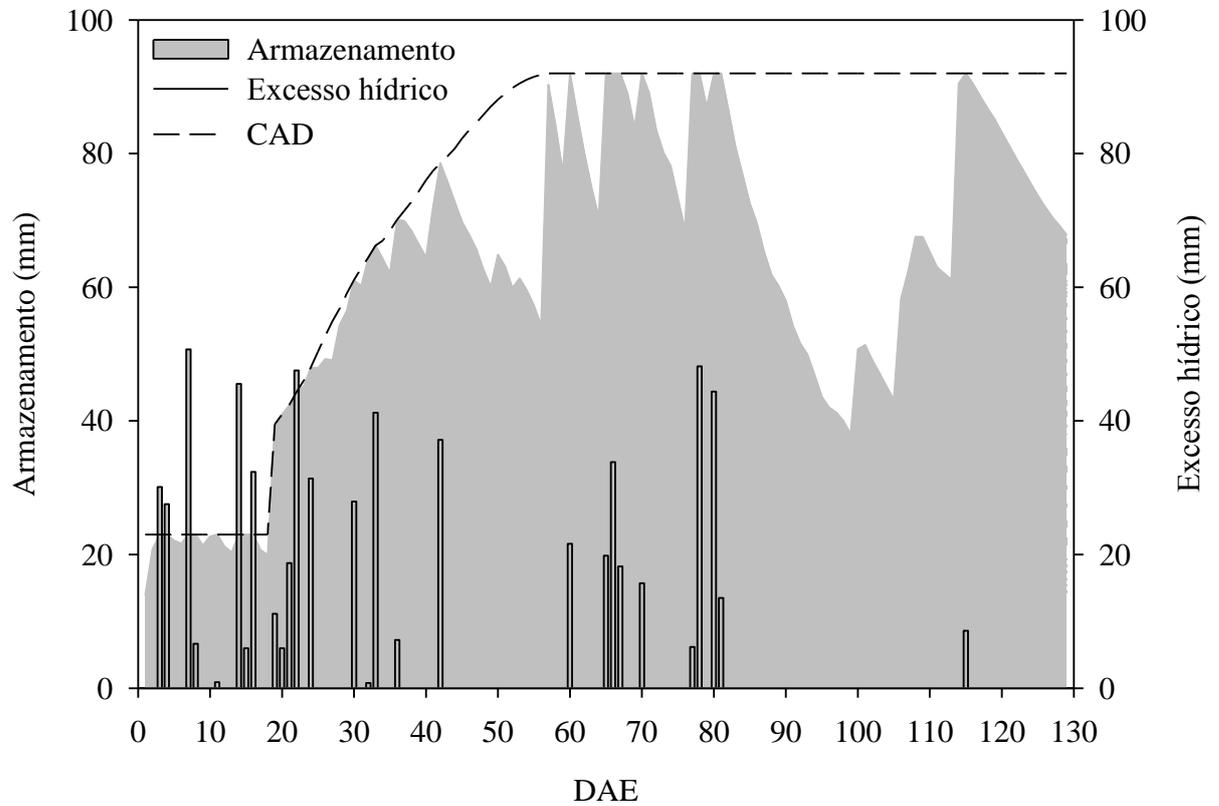
APÊNDICES

Apêndice A. Distribuição do tamanho de partículas de um Planossolo pertencente à UM Vacacaí, localizado no município de São Sepé, RS.

Distribuição do tamanho de partículas					
Amostra	Areia grossa (2-0,2 mm)	Areia fina (0,2-0,05 mm)	Silte (0,05- 0,002 mm)	Argila (<0,002 mm)	Classe textural
0-20	14,34	47,43	22,27	15,96	Franco arenoso
20-40	17,01	46,72	22,36	13,91	Franco arenoso
40-60	8,41	41,10	34,21	15,68	Franco

*Metodologia: método da pipeta: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Apêndice B. Variação do armazenamento de água em função da capacidade de água disponível no solo e excesso hídrico no solo ao longo do ciclo de cultivares de soja pertencentes ao grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, em semeadura realizada no dia 01 de novembro de 2009, no solo Vacacaí.



Apêndice C. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante o ciclo da soja, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Fc	Pr>Fc
GMR 5.9 – 6.8					
DS	6	1562,85	260,47	2,23	0,04
Solo	1	5297,51	5297,51	45,46	0,00
DS*Solo	6	68,55	11,42	0,10	0,99
Erro	586	68286,13	116,53		
Total	599	75215,04			
GMR 6.9 – 7.3					
DS	7	2680,81	382,97	2,93	0,00
Solo	1	7045,67	7045,67	53,99	0,00
DS*Solo	7	52,39	7,48	0,06	0,99
Erro	672	87692,59	130,49		
Total	687	97471,46			
GMR 7.4 – 8.0					
DS	9	2566,75	285,19	1,85	0,06
Solo	1	9164,76	9164,76	59,39	0,00
DS*Solo	9	159,52	17,72	0,115	0,99
Erro	843	130080,77	154,31		
Total	862	141971,80			

Apêndice D. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante os subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o grupo de maturidade relativa 5.9-6.8, para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Fc	Pr>Fc
S-EM					
DS	6	129,73	21,62	7,66	0,00
Solo	1	1,02	1,02	0,36	0,54
DS*Solo	6	0,63	0,10	0,04	0,99
Erro	420	1184,77	2,82		
Total	433	1316,17			
EM-V2					
DS	6	323,34	53,89	8,29	0,00
Solo	1	1,39	1,39	0,21	0,64
DS*Solo	6	1,04	0,17	0,03	0,99
Erro	409	2655,88	6,49		
Total	422	2981,66			
V2-R1					
DS	6	177,29	29,55	1,04	0,39
Solo	1	48,27	48,27	1,70	0,19
DS*Solo	6	18,68	3,11	0,11	0,99
Erro	452	12790,53	28,30		
Total	465	13034,77			
R1-R5					
DS	6	19,66	3,27	0,27	0,95
Solo	1	19,37	19,37	1,59	0,21
DS*Solo	6	13,07	2,18	0,18	0,98
Erro	167	2024,74	12,12		
Total	180	2076,85			
R5-R7					
DS	6	68,26	11,37	0,66	0,68
Solo	1	214,30	214,30	12,51	0,00
DS*Solo	6	57,40	9,56	0,56	0,76
Erro	295	5053,28	17,13		
Total	308	5393,25			
R7-R8					
DS	6	66,86	11,14	2,32	0,06
Solo	1	2,75	2,75	0,57	0,45
DS*Solo	6	5,45	0,90	0,19	0,98
Erro	232	1115,58	4,80		
Total	245	1190,67			

Apêndice E. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante os subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o grupo de maturidade relativa 6.9-7.3, para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Fc	Pr>Fc
S-EM					
DS	7	179,54	25,65	9,162	0,00
Solo	1	0,13	0,14	0,049	0,82
DS*Solo	7	1,02	0,15	0,052	0,99
Erro	478	1338,19	2,80		
Total	493	1518,90			
EM-V2					
DS	7	610,83	87,26	11,24	0,00
Solo	1	1,75	1,75	0,23	0,63
DS*Solo	7	0,61	0,09	0,01	1,00
Erro	484	3756,92	7,76		
Total	499	4370,12			
V2-R1					
DS	7	169,52	24,22	0,71	0,66
Solo	1	115,64	115,65	3,40	0,06
DS*Solo	7	80,90	11,56	0,34	0,93
Erro	540	18364,93	34,01		
Total		18730,99			
R1-R5					
DS	7	40,48	5,78	0,45	0,86
Solo	1	36,35	36,35	2,86	0,09
DS*Solo	7	19,66	2,81	0,22	0,98
Erro	194	2463,93	12,70		
Total	209	2560,42			
R5-R7					
DS	7	92,59	13,22	0,76	0,62
Solo	1	168,27	168,27	9,70	0,00
DS*Solo	7	48,57	6,94	0,40	0,90
Erro	333	5777,77	17,35		
Total	348	6087,21			
R7-R8					
DS	7	146,30	20,90	3,41	0,00
Solo	1	1,15	1,15	0,18	0,66
DS*Solo	7	19,54	2,79	0,45	0,87
Erro	279	1710,53	6,13		
Total	294	1877,52			

Apêndice F. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante os subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para o grupo de maturidade relativa 7.4-8.0, para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Fc	Pr>Fc
S-EM					
DS	9	397,55	44,17	13,28	0,00
Solo	1	0,26	0,27	0,08	0,77
DS*Solo	9	2,91	0,32	0,09	0,99
Erro	621	2064,47	3,32		
Total	640	2465,20			
EM-V2					
DS	9	1206,78	134,09	17,10	0,00
Solo	1	3,04	3,04	0,39	0,53
DS*Solo	9	1,58	0,17	0,02	1,00
Erro	624	4892,66	7,84		
Total	643	6104,06			
V2-R1					
DS	9	182,61	20,29	0,47	0,89
Solo	1	260,78	260,78	6,11	0,01
DS*Solo	9	52,69	5,85	0,14	0,99
Erro	721	30787,93	42,70		
Total	740	31284,01			
R1-R5					
DS	9	102,01	11,33	1,34	0,22
Solo	1	29,68	29,68	3,51	0,06
DS*Solo	9	32,10	3,57	0,42	0,92
Erro	229	1935,43	8,45		
Total	248	2099,23			
R5-R7					
DS	9	228,02	25,33	1,09	0,36
Solo	1	132,94	132,94	5,74	0,02
DS*Solo	9	149,92	16,66	0,72	0,69
Erro	422	9771,71	23,15		
Total	441	10282,59			
R7-R8					
DS	9	618,45	68,71	6,92	0,00
Solo	1	0,05	0,05	0,00	0,94
DS*Solo	9	20,68	2,30	0,23	0,99
Erro	411	4082,73	9,93		
Total	430	4721,91			

Apêndice G. Análise de variância do número de dias com excesso hídrico no solo durante o ciclo da soja, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) simuladas de 1968 a 2012, nos solos São Gabriel e Vacacaí, considerando o fenômeno ENOS.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Fc	Pr>Fc
GMR 5.9 – 6.8					
DS	6	1562,84	260,47	2,29	0,03
Solo	1	5297,51	5287,51	46,73	0,00
Enos	2	2736,99	1368,49	12,07	0,00
DS*Solo	6	68,55	11,42	0,10	0,99
DS*Enos	12	2097,08	174,75	1,54	0,04
Solo*Enos	2	106,91	53,45	0,47	0,62
DS*Solo*Enos	12	91,66	7,63	0,07	1,00
Erro	558	63253,48	113,35		
Total	599	72215,04			
GMR 6.9 – 7.3					
DS	7	2680,81	382,97	3,07	0,00
Solo	1	7045,67	7045,67	56,44	0,00
Enos	2	3992,44	1996,22	15,99	0,00
DS*Solo	7	52,38	7,48	0,06	0,99
DS*Enos	14	3571,09	255,08	2,04	0,01
Solo*Enos	2	144,44	72,22	0,58	0,56
DS*Solo*Enos	14	98,49	7,03	0,05	1,00
Erro	640	79886,12	124,82		
Total	687	97471,46			
GMR 7.4 – 8.0					
DS	9	2566,75	285,19	1,93	0,06
Solo	1	9164,76	9164,76	62,11	0,00
Enos	2	5120,79	2560,39	17,35	0,00
DS*Solo	9	159,52	17,72	0,12	0,99
DS*Enos	18	6122,67	340,15	2,30	0,00
Solo*Enos	2	218,34	109,17	0,74	0,47
DS*Solo*Enos	18	143,32	7,96	0,05	1,00
Erro	803	118475,65	147,54		
Total	862	141971,80			