

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

Mateus Possebon Bortoluzzi

**RISCO DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO E DÉFICIT HÍDRICO NA
SOJA EM TERRAS BAIXAS**

TESE DE DOUTORADO

**Santa Maria, RS
2019**

Mateus Possebon Bortoluzzi

**RISCO DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO E DÉFICIT HÍDRICO NA SOJA EM
TERRAS BAIXAS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado 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 **Doutor em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr. Arno Bernardo Heldwein

Santa Maria, RS

2019

Bortoluzzi, Mateus Possebon
RISCO DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO E DÉFICIT HÍDRICO NA
SOJA EM TERRAS BAIXAS / Mateus Possebon Bortoluzzi.-
2019.
161 p.; 30 cm

Orientador: ARNO BERNARDO HELDWEIN
Coorientador: NEREU AUGUSTO STRECK
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Agronomia, RS, 2019

1. Glycine max 2. Risco climático 3. Análise numérica
4. Desenvolvimento da soja 5. Época de semeadura I.
HELDWEIN, ARNO BERNARDO II. STRECK, NEREU AUGUSTO III.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2019

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

Mateus Possebon Bortoluzzi

**RISCO DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO E DÉFICIT HÍDRICO NA SOJA EM
TERRAS BAIXAS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado 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 **Doutor em Agronomia**.

Aprovado em 21 de fevereiro de 2019:



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



Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM)



Astor Henrique Nied, Dr. (UFSM)



Edgar Ricardo Schöffel, Dr. (UFPel)



Roberto Trentin, Dr. (UFPel)

Santa Maria, RS

2019

DEDICATÓRIA

A minha mãe Lenir Maria e ao meu pai Irineo Antonio, que infelizmente não presencia essa conquista. São fontes de inspiração na minha vida e foram grandes incentivadores durante o caminho percorrido até aqui.

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais Irineo (in memorian) 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 doutorado.

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

Ao meu cunhado Diego Flores, pela amizade e companheirismo e pela ajuda ao longo desta caminhada.

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

Aos professores Roberto Trentin, Ivan Maldaner e Paulo Gubiani e à Engenheira Agrônoma Jocélia Rosa pelas inúmeras contribuições realizadas ao longo da elaboração do trabalho.

Ao professor Evandro Zanini Righi (in memorian), pela amizade, pelo exemplo e pelo incentivo para seguir a caminhada.

Aos amigos e colegas do setor de Agrometeorologia da UFSM, pela amizade, companheirismo e auxílio na elaboração desta tese.

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

Aos produtores rurais Germano Hadler e Luiz Carlos por permitirem a realização de análises em suas respectivas propriedades.

Ao professor Carlos Streck e sua equipe pelas análises realizadas no laboratório de física do solo do Instituto Federal Farroupilha, Câmpus de São Vicente do Sul.

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

A 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

RISCO DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO E DÉFICIT HÍDRICO NA SOJA EM TERRAS BAIXAS

AUTOR: Mateus Possebon Bortoluzzi
ORIENTADOR: Arno Bernardo Heldwein

O objetivo desse trabalho foi determinar a duração do ciclo de desenvolvimento da soja em função da data de semeadura e obter a probabilidade de ocorrência de excesso e déficit hídrico em Planossolos das bacias hidrográficas dos rios Vacacaí e Piratini, na Metade Sul do Rio Grande do Sul. O desenvolvimento da soja foi simulado considerando-se três conjuntos de cultivares de grupo de maturidade relativa (GMR) entre 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, em 11 datas de semeadura compreendidas entre 21 de setembro e 31 de dezembro. Foram utilizados dados meteorológicos diários de 1971 a 2017 da estação agroclimatológica de Pelotas e de 1968 a 2017 da estação climatológica principal de Santa Maria. A partir do cálculo da evapotranspiração e do balanço hídrico sequencial diário da cultura foram obtidos o excesso hídrico (dias) e o déficit hídrico (mm). Os dados de duração dos subperíodos e do ciclo de desenvolvimento da soja, déficit e excesso hídrico nos subperíodos e no ciclo para cada GMR foram demonstrados através da análise exploratória BoxPlot e submetidos à análise de variância e a comparação de médias através do teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro. Os dados também foram submetidos à análise de distribuição de probabilidades, em que foram testados os ajustes das funções densidade de probabilidade exponencial, gama, lognormal, normal e weibull, utilizando os testes de aderência qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 10%. A duração do ciclo de desenvolvimento é maior em Pelotas do que em Santa Maria e é decrescente da primeira para a última data de semeadura em ambos os locais. O risco climático de ocorrência de excesso hídrico no ciclo da soja diminui ao longo do calendário de semeadura. No estabelecimento da cultura da soja, não ocorre excesso hídrico em cerca de um a cada quatro anos, mas essa frequência tende a reduzir a partir de meados de novembro. Para o período entre o início da floração (R1) e início do enchimento de grãos (R5) a frequência média de ocorrência de excesso hídrico é de dois a cada três anos. Há pouca diferença de risco de ocorrência de excesso hídrico entra as datas de semeadura para o subperíodo R1-R5, porém há uma redução a partir de 11 de novembro para o estabelecimento inicial da soja. O risco de déficit hídrico diminui para o subperíodo R1-R5 e para o ciclo total da soja a partir do início de novembro. A definição do momento de semeadura deve ser analisada especificamente para cada propriedade, mas de maneira geral, considerando de forma conjunta o potencial produtivo e os riscos históricos de ocorrência de excesso e déficit hídrico, o planejamento deve ser realizado de forma que o início do processo de semeadura ocorra a partir de primeiro de novembro.

Palavras-chave: *Glycine max*. Risco climático. Análise numérica. Desenvolvimento da soja. Época de semeadura.

ABSTRACT

RISK OF OCCURENCE OF WATER EXCESS AND DEFICIT FOR SOYBEANS IN LOWLAND SOILS

AUTHOR: Mateus Possebon Bortoluzzi

ADVISOR: Arno Bernardo Heldwein

The objective of this study was to determine the duration of the soybean development cycle as a function of the sowing date and to obtain the probability of water excess and deficit in Planosols of the Vacacaí and Piratini river basins in the southern half of Rio Grande do Sul. Soybean development was simulated considering three sets of cultivars of relative maturity groups (RMG) between 5.9-6.8, 6.9-7.3 and 7.4-8.0, in 11 sowing dates comprised between September 21 and December 31. Daily meteorological data were used from 1971 to 2017 obtained from the Pelotas agroclimatological station and from 1968 to 2017 from the main climatological station of Santa Maria. Water excess (days) and water deficit (mm) were obtained from the calculation of evapotranspiration and daily sequential crop water balance. Data of duration of subperiods and soybean development cycle, deficit and water excess in the subperiods and cycle for each RMG were demonstrated through the BoxPlot exploratory analysis and subjected to analysis of variance and mean comparison by the Scott-Knott test at 5% error probability. Data were also subjected to the probability distribution analysis, in which the exponential, gamma, lognormal, normal and weibull probability density functions adjustments were tested using Chi-square and Kolmogorov-Smirnov adhesion tests, with a 10% significance level. The development cycle duration is higher in Pelotas than in Santa Maria and there was a decrease from the first to the last sowing date in both locations. The climatic risk of occurrence of water excess in the soybean cycle decreases throughout the sowing date calendar. There is no water excess in about one every four years during the soybean crop establishment, but this frequency tends to reduce starting from mid-November. The mean frequency of water excess is two every three years for the period between the beginning of flowering (R1) and beginning of grain filling (R5). There are small differences in the risk of occurrence of water excess between the sowing dates of the R1-R5 subperiod, but there is a reduction starting from November 11 for the soybean initial establishment. The risk of water deficit decreases from the beginning of November for the subperiod R1-R5 and for the total soybean cycle. The sowing date must be defined specifically for each farm location. However, the sowing procedure should be planned to start from November 1st when considering jointly acquiring high soybean yield potential and the lowest historical risks of occurrence of water excess and deficit.

Keywords: *Glycine max.* Climatic risk. Numerical analysis. Soybean development. Sowing date.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO I

- Figura 1. Variabilidade interanual e duração média do ciclo de desenvolvimento da soja, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), em função de 11 datas de semeadura em Santa Maria, RS (A, C e E) e Pelotas, RS (B, D e F). 27
- Figura 2. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, simulado para a série histórica diária de 1968 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Santa Maria, RS..... 29
- Figura 3. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, simulado para a série histórica diária de 1968 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Santa Maria, RS..... 30
- Figura 4. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, simulado para a série histórica diária de 1968 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Santa Maria, RS..... 31
- Figura 5. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, simulado para a série histórica diária de 1971 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Pelotas, RS..... 32
- Figura 6. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, simulado para a série histórica diária de 1971 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Pelotas, RS..... 33
- Figura 7. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, simulado para a série histórica diária de 1971 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Pelotas, RS..... 34

CAPÍTULO II

- Figura 1. Representação esquemática dos limites de conteúdo de umidade da metodologia do tempo de drenagem dos macroporos até 10 cm de profundidade, representada pelo conteúdo de água no solo entre a saturação (θ_{sat}) e a microporosidade (θ_{mic})

(CAD_{mac}), em que a CAD_1 trata-se do conteúdo de água entre a θ_{mic} e o ponto de muita permanente (θ_{pmp}) até 30 cm de profundidade (Z) e a CAD_2 é o somatório da CAD_{mac} e CAD_144

Figura 2. Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) ao longo do ciclo da cultura da soja e da microporosidade (θ_{mic}) em Planossolo Háplico, nas camadas de 0-10 cm (A), 10-20 cm (B) e 20-30 cm (C). *As setas representam os dias com excesso hídrico obtidos pela nova metodologia de cálculo do balanço hídrico sequencial..... 50

CAPÍTULO III

- Figura 1. Localização da área de abrangência da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí. Fonte: SEMA, 2015.64
- Figura 2. Localização da área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Rio Piratini e suas sub-bacias. Adaptado de Munar e Collischonn (2017)..... 65
- Figura 3. Número médio e variabilidade interanual de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as diferentes datas de semeadura simuladas para o solo Vacacaí em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS (A, C e E) e para o solo Piratini de 1971 a 2017, em Pelotas, RS (B, D e F).....72
- Figura 4. Número médio e variabilidade interanual de dias com excesso hídrico nos 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), no solo Vacacaí, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.76
- Figura 5. Número médio e variabilidade interanual de dias com excesso hídrico nos 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), no solo Vacacaí, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.78
- Figura 6. Número médio e variabilidade interanual de dias com excesso hídrico nos 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), no solo Vacacaí, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.79
- Figura 7. Número médio e variabilidade interanual 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS..... 82
- Figura 8. Número médio e variabilidade interanual 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. 83

Figura 9. Número médio e variabilidade interanual 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. 84

Figura 10. Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico igual ou maior que 25, 30, 35, 40 e 45 dias 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 o solo Vacacaí (A, C e E) e Piratini (B, D e F), considerando onze datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017 em Santa Maria e 1971 a 2017 em Pelotas, em Santa Maria, RS. 86

Figura 11. Probabilidade de ocorrência de 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), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS. 89

Figura 12. Probabilidade de ocorrência de 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), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS. 90

Figura 13. Probabilidade de ocorrência de 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), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS. 91

Figura 14. Probabilidade de ocorrência de 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), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Piratini em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. 94

- Figura 15. Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja: sementeira - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Piratini em onze datas de sementeira simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. 95
- Figura 16. Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja: sementeira - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Piratini em onze datas de sementeira simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. 96
- Figura 17. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) ao longo do ciclo da cultura da soja considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as diferentes datas de sementeira simuladas para o solo Vacacaí, em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS (A, C e E) e para o solo Piratini de 1971 a 2017, em Pelotas, RS (B, D e F)..... 99
- Figura 18. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de sementeira (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 o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, para as diferentes datas de sementeira simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS. 102
- Figura 19. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de sementeira (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 o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, para as diferentes datas de sementeira simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS. 103
- Figura 20. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de sementeira (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 o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, para as diferentes datas de sementeira simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS. 104
- Figura 21. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de sementeira (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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, para as diferentes datas de sementeira simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. . 107
- Figura 22. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) nos subperíodos da cultura da soja compreendidos entre as datas de sementeira (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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. 108

- Figura 23. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. 109
- Figura 24. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 50, 75, 100 e 150 mm 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 o solo Vacacaí (A, C e E) e Piratini (B, D e F), considerando onze datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017 em Santa Maria e 1971 a 2017 em Pelotas, respectivamente..... 111
- Figura 25. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí, em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS..... 112
- Figura 26. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí, em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS..... 113
- Figura 27. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí, em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS..... 115
- Figura 28. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Piratini, em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS..... 116
- Figura 29. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira

folha trifoliolada – início da floração (V2-R1), 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 o solo Piratini, em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. 117

Figura 30. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1), 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 o solo Piratini, em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS. 118

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

- Tabela 1. Umidade do solo diária medida* ($m^3 m^{-3}$), chuva (mm) e dias com excesso hídrico (EXC), considerando a capacidade de armazenamento de água (CAD) do solo para as profundidades de 10 cm (CAD_{10}), 20 cm (CAD_{20}) e 30 cm (CAD_{30}), utilizando a precipitação medida (PM) e a precipitação efetiva (PE) considerando um tempo de drenagem de dois dias após o conteúdo de água no solo exceder a CAD, para dias em que houve excesso hídrico ao longo do ciclo da soja em um Planossolo Háptico, no ano agrícola 2014/2015, em Santa Maria, RS..... 46
- Tabela 2. Umidade do solo diária medida* ($m^3 m^{-3}$), chuva (mm) e dias com excesso hídrico (EXC), considerando a capacidade de armazenamento de água (CAD) do solo calculada para a profundidade de 30 cm (CAD_{30}), utilizando a precipitação medida (PM) e a precipitação efetiva calculada (PE), para dias em que houve excesso hídrico ao longo do ciclo da soja em um Planossolo Háptico, no ano agrícola 2014/2015, em Santa Maria, RS. 49

CAPÍTULO III

- Tabela 1. Datas de semeadura utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturidade relativa (GMR)..... 66
- Tabela 2. Variáveis meteorológicas obtidas do banco de dados da Estação Climatológica Principal de Santa Maria (SM) e da Estação Agroclimatológica de Pelotas. 66
- Tabela 3. Variáveis meteorológicas estimadas a partir de dados meteorológicos medidos e suas respectivas funções matemáticas..... 67
- 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). 69
- Tabela 5. Frequência (%) 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 2017, em Santa Maria, RS. 74
- Tabela 6. Frequência (%) de anos com registro de ocorrência de excesso hídrico nos 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), no solo Piratini, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR) e as datas de semeadura (DS) simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS..... 81

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A. Características físicas de solos de terras baixas da bacia hidrográfica do Rio Piratini	133
APÊNDICE B. Ajuste de funções densidade de probabilidade (fdp) para resultados de análise numérica de excesso e déficit hídrico no ciclo e subperíodos de desenvolvimento da soja...	140

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. CAPÍTULO I - ANÁLISE NUMÉRICA CLIMÁTICA DO DESENVOLVIMENTO DA SOJA EM DATAS DE SEMEADURA EM CLIMA SUBTROPICAL ÚMIDO DO RIO GRANDE DO SUL	22
RESUMO	22
ABSTRACT.....	22
INTRODUÇÃO	23
MATERIAL E MÉTODOS	24
RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
CONCLUSÕES.....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
3. CAPÍTULO II - METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DO EXCESSO HÍDRICO PARA A CULTURA DA SOJA EM TERRAS BAIXAS	39
RESUMO	39
ABSTRACT	39
INTRODUÇÃO	40
MATERIAL E MÉTODOS	42
RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
4 . CAPÍTULO III - RISCO DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO E DÉFICIT HÍDRICO NA SOJA EM TERRAS BAIXAS NA METADE SUL DO RIO GRANDE DO SUL	54
RESUMO	54
ABSTRACT	54
INTRODUÇÃO	55
Época de semeadura e o potencial de produtividade da soja.....	56
Déficit hídrico e seus efeitos ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja.....	57
Excesso hídrico e seus efeitos para a soja ao longo do ciclo de desenvolvimento	59
Simulação do desenvolvimento da soja associado ao balanço hídrico sequencial.....	62
Justificativa e objetivo	63
MATERIAL E MÉTODOS	63
RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
CONCLUSÕES.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
5. DISCUSSÃO.....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
APÊNDICES	133

1. INTRODUÇÃO

A soja é a cultura com maior área semeada no Brasil, com aproximadamente 35 milhões de hectares na safra 2017/18, sendo cultivados 5,7 milhões de hectares no Rio Grande do Sul (RS) (CONAB, 2019). A rotação de culturas e a utilização da soja como alternativa no controle de plantas daninhas, como o arroz vermelho, em lavouras de arroz irrigado têm impulsionado a sua expansão para terras baixas, atingindo aproximadamente 300 mil hectares na safra 2017/18 no RS (IRGA, 2019). Entretanto, nessas áreas existem diversos fatores limitantes, tais como a acidez e baixa fertilidade do solo, doenças radiculares e compactação do solo (MUNDSTOCK et al., 2017, p. 28; SARTORI et al., 2016).

Para semeaduras realizadas em terras baixas também há limitação por ocorrência de estresse hídrico. Os períodos de excesso hídrico ao longo do ciclo de desenvolvimento são comuns quando ocorre precipitação pluviométrica devido ao hidromorfismo característico desses solos. Além disso, períodos de deficiência hídrica são potencializados tendo em vista o menor aprofundamento do sistema radicular e, em consequência, a menor capacidade de armazenamento de água disponível às plantas (CAD) do solo (ROCHA et al., 2017).

Dentre as possíveis práticas de manejo que podem ser utilizadas para a mitigação desses entraves, a escolha da data de semeadura e a adoção de cultivares com diferentes grupos de maturidade relativa praticamente não provocam aumento do custo de produção e são alternativas para diminuir a coincidência da ocorrência de estresse hídrico com os períodos mais críticos da soja, principalmente, com os estágios reprodutivos (OYA et al., 2004; BOYER et al., 2015; SILVA et al., 2018). Assim, tendo em vista a dificuldade para prever o momento de ocorrência do estresse devido à variabilidade anual e interanual das condições meteorológicas, estudos que envolvem uma longa série de dados meteorológicos são importantes, pois auxiliam na identificação de períodos de semeadura com menor risco climático de ocorrência de eventos adversos.

A variação da disponibilidade hídrica e as probabilidades de ocorrência de estresses hídricos podem ser obtidas através da realização do balanço hídrico sequencial (BHS) diário de uma série longa de observações meteorológicas, associado aos diferentes subperíodos de desenvolvimento das plantas de soja para diferentes datas de semeadura. Para isso, faz-se necessário o uso da modelagem matemática do desenvolvimento da cultura e também da análise numérica de risco utilizando funções de probabilidade.

A análise de risco de ocorrência de estresse por excesso e déficit hídrico, utilizando um intervalo curto de tempo, tal como um dia, permite identificar níveis críticos que não seriam verificados através de determinações em intervalos de tempo mais longos, como por exemplo, em períodos mensais, decendiais ou mesmo quinquidiais (CARDOSO, 2005; SILVA et al., 2008), ainda utilizados no zoneamento de risco climático de inúmeras culturas. A análise de probabilidade em nível diário não é considerada para a confecção do calendário de semeadura da soja no Rio Grande do Sul (BRASIL, 2018), o qual têm extrema importância para o acesso ao sistema financeiro de crédito. Essa informação ainda não está disponível para a cultura da soja considerando as propriedades físico-hídricas e a CAD dos Planossolos das regiões produtoras na Metade Sul do Rio Grande do Sul e pode dar suporte para uma recomendação mais adequada com relação à data de semeadura, contribuindo assim para o incremento de produção da cultura da soja nessas áreas, tradicionalmente utilizadas para arroz irrigado e pastagem.

A rápida expansão da cultura da soja nos últimos anos nesses solos do Rio Grande do Sul não pode ser assistida de forma passiva e fundamentada nos resultados de produção de apenas alguns anos, o que representa maior risco de frustração de safra, mas deve ter como base as informações dos reais riscos esperados. Essa informação também pode ser utilizada para nortear as políticas de seguridade agrícola pública e privada, a qual apresenta forte tendência de expansão. Assim, é imprescindível conhecer as probabilidades de ocorrência de níveis de excedentes e déficits hídricos para a soja semeada em diferentes épocas, em razão da sensibilidade das plantas quando submetidas a essas condições nos diferentes estágios de desenvolvimento.

O objetivo desse trabalho foi determinar a duração dos subperíodos fenológicos e do ciclo total de desenvolvimento da soja, ajustar funções de probabilidade aos dados de déficit e excesso hídrico e estimar seus riscos climáticos de ocorrência em diferentes datas de semeadura, considerando grupos de maturidade relativa da soja e a capacidade de armazenamento de água e as propriedades físicas dos Planossolos das bacias hidrográficas dos rios Vacacaí e Piratini na Metade Sul do Rio Grande do Sul.

O texto desta tese foi organizado em quatro capítulos, visando uma melhor apresentação dos resultados de forma que os objetivos fossem atendidos. Buscou-se primeiramente obter as durações dos ciclos nas diferentes datas de semeadura de todos os anos agrícolas considerado. Foi realizado o ajuste do cálculo do balanço hídrico visando obter dados de excesso hídrico representativos das condições de lavoura. Após, os riscos de ocorrência de déficit e excesso hídrico foram estimados e por fim foi realizada uma discussão

geral visando definir de uma janela de semeadura com alto potencial produtivo, contextualizando com dados obtidos em condição de campo. Os capítulos foram intitulados da seguinte maneira: Capítulo I - Análise numérica climática do desenvolvimento da soja em datas de semeadura em clima subtropical úmido do Rio Grande do Sul; Capítulo II - Validação de metodologia de cálculo do excesso hídrico para a cultura da soja em Planossolos; Capítulo III - Risco de ocorrência de excesso e déficit hídrico para a soja em Planossolos da Metade Sul do Rio Grande do Sul; Capítulo IV – Discussão geral.

2. CAPÍTULO I - ANÁLISE NUMÉRICA CLIMÁTICA DO DESENVOLVIMENTO DA SOJA EM DATAS DE SEMEADURA NO CLIMA SUBTROPICAL ÚMIDO DO SUL DO RIO GRANDE DO SUL

RESUMO

A variabilidade interanual e espacial das condições meteorológicas ocasionam significativas diferenças de produtividade entre safras. Assim, torna-se importante a utilização de modelos de simulação do desenvolvimento das culturas, os quais podem ser associados à análise de probabilidade para a determinação de riscos na produção agrícola. O objetivo deste trabalho foi determinar a duração média e a variabilidade interanual dos subperíodos fenológicos e do ciclo total de desenvolvimento da soja para as condições de clima subtropical úmido do estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizados dados meteorológicos diários de 1971 a 2017 da estação agroclimatológica de Pelotas e de 1968 a 2017 da estação climatológica principal de Santa Maria. A simulação do desenvolvimento da soja foi realizada considerando-se três conjuntos de cultivares de grupo de maturidade relativa (GMR) entre 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com intervalos entre as datas de semeadura de aproximadamente 10 dias compreendidas entre 21 de setembro e 31 de dezembro. Os dados de duração dos subperíodos fenológicos e do ciclo total de desenvolvimento foram submetidos à análise exploratória BoxPlot, análise de variância e comparação de médias pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, considerando como fonte de variação as datas de semeadura. A duração do ciclo de desenvolvimento é maior em Pelotas do que em Santa Maria. Houve decréscimo da duração do ciclo da soja da primeira para a última data de semeadura para ambos os locais. Devido à redução do fotoperíodo, a duração do subperíodo R1-R5 é decrescente de outubro até dezembro.

PALAVRAS-CHAVE: *Glycine max.* Soma térmica. Fotoperíodo. Modelagem. Fenologia.

NUMERICAL CLIMATIC ANALYSIS OF SOYBEAN DEVELOPMENT IN SOWING DATES IN THE HUMID SUBTROPICAL CLIMATE OF SHOUTHERN OF RIO GRANDE DO SUL STATE

ABSTRACT

The interannual and spatial variability of meteorological conditions entail significant yield differences between harvests. Therefore, the use of crop development simulation models becomes important as they can be associated with the probability analysis for risk determination in agricultural production. The objective of this study was to determine the mean duration and the interannual variability of phenological subperiods and total soybean development cycle for 11 sowing dates in the humid subtropical climate conditions of the state of Rio Grande do Sul. Daily meteorological data were used from 1971 to 2017 obtained from the Pelotas agroclimatological station and from 1968 to 2017 from the main climatological station of Santa Maria. The soybean development simulation was performed considering three sets of cultivars of relative maturity groups (RMG) between 5.9-6.8, 6.9-7.3 and 7.4-8.0, with intervals between the sowing dates of approximately 10 days, comprising September 21 to December 31. The data of phenological subperiods duration and total development cycle were subjected to the exploratory analysis BoxPlot, analysis of variance and mean comparison by the Scott-Knott test, with 5% of probability, considering the sowing dates as the source of variation. The development cycle duration is greater in Pelotas than in

Santa Maria. There was a decrease in soybean cycle duration from the first to the last sowing date for both locations. The R1-R5 subperiod duration is decreasing from October to December due to photoperiod reduction.

KEY WORDS: *Glycine max*; Thermal time; Photoperiod; Modeling; Phenology.

INTRODUÇÃO

A soja é a aleuro-oleaginosa de maior importância agrícola mundial, sendo a cultura com maior área semeada no Brasil ($35 \cdot 10^6$ ha) na safra 2017/2018. No Rio Grande do Sul, terceiro maior produtor brasileiro, foram cultivados 5,7 milhões de hectares, obtendo-se produtividade média de $3,0 \text{ t ha}^{-1}$ neste ano agrícola (CONAB, 2019). Apesar do avanço tecnológico ocorrido no sistema produtivo da soja, a diferença de produtividade entre os anos é significativa, o que está diretamente relacionado à variabilidade interanual e espacial das condições meteorológicas.

O ciclo de desenvolvimento da soja é basicamente dividido em fase vegetativa, a qual inicia a partir da emergência e em fase reprodutiva, que inicia no momento da abertura da primeira flor na haste principal da planta (FEHR; CAVINESS, 1977). 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 maior sobreposição 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. A temperatura do ar contribui positivamente para o desenvolvimento da planta, desde que seja maior que a temperatura base inferior e inferior à temperatura base superior (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 soma térmica da 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). Assim, espera-se um aumento do ciclo de desenvolvimento em regiões mais distantes da linha do equador, mas também ocorre alteração em função da data de semeadura, além da variabilidade da soma térmica entre anos.

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 e riscos na produção. Além disso, também podem ser utilizados no planejamento de

práticas agrícolas, como irrigação, adubação e tratamentos fitossanitários, bem como na determinação do risco de ocorrência de um evento meteorológico adverso em determinado estágio de desenvolvimento como, por exemplo, a ocorrência de geada, alta temperatura do ar, déficit ou excesso hídrico e dano mecânico e morfofisiológico por vento excessivo.

Dentre os modelos que podem ser utilizados para simular o desenvolvimento das plantas de soja estão os propostos por Sinclair (1986) e Setiyono et al. (2007). Entretanto, esses modelos requerem informações específicas para cultivares ou grupos de maturidade relativa e que ainda não estão disponíveis para as cultivares mais recentes de hábito de crescimento indeterminado do Brasil. O modelo SoySim (SETIYONO et al., 2010) foi desenvolvido utilizando cultivares de grupo de maturidade relativa (GMR) entre 0,8 e 4,2 em condições de clima temperado dos EUA. Cera et al. (2017) verificaram um desempenho insatisfatório desse modelo para condições de baixa latitude do Brasil utilizando cultivares de GMR 4,8 a 8,2 e alertam para os problemas do seu uso nas condições brasileiras.

Trentin et al. (2013) utilizaram a combinação de diferentes modelos de desenvolvimento para estimar os estágios de emergência (EM), emissão da primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início de enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8) da soja. O momento de ocorrência desses estágios praticamente não varia em função do hábito de crescimento da soja (ZANON et al., 2018, p. 59). Assim, é possível inferir que essa metodologia é uma excelente alternativa, tendo em vista a utilização de parâmetros e coeficientes obtidos no Rio Grande do Sul. Neste contexto, o objetivo deste capítulo foi determinar a duração média (e variabilidade interanual) dos subperíodos fenológicos e do ciclo total de desenvolvimento da soja em 11 datas de semeadura para as condições de clima subtropical úmido do estado do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados meteorológicos diários de temperatura máxima do ar (T_x , °C), temperatura mínima do ar (T_n , °C) e insolação (horas) foram coletados na estação agroclimatológica de Pelotas localizada no município de Capão do Leão, RS, Brasil (31°52'S, 52° 21'W à altitude de 13,2 m), de setembro de 1971 a junho de 2017 (com ausência de dados entre junho/1989 e agosto/1991) e na estação climatológica principal de Santa Maria, RS, Brasil (29°43'23"S, 53°43'15"W, à altitude de 95 m), de setembro de 1968 a junho de 2017, o que totalizou 44 e 49 anos de observações, respectivamente. O fotoperíodo diário para Pelotas e Santa Maria foi calculado conforme Kiesling (1982), considerando a duração do crepúsculo civil de 6° abaixo

do plano do horizonte. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo subtropical úmido (Cfa) (ALVARES et al., 2013).

Para a simulação do desenvolvimento, foram considerados três conjuntos compostos por cultivares de grupo de maturidade relativa (GMR) entre 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0. Apesar de cultivares de menor GMR serem utilizadas, essa faixa representa a grande maioria das cultivares utilizada em terras baixas, como por exemplo, NA 5909 RR e TECIRGA 6070 RR (GMR 6.3), BRS 246RR (GMR 7.2) e TEC 7849 IPRO (GMR 7.8). Adotaram-se intervalos entre as datas de semeadura (DS) de 10 ou 11 dias dentro do período de semeadura compreendido entre 21 de setembro e 31 de dezembro.

O estudo e os cálculos foram realizados de acordo com a metodologia proposta por Trentin et al. (2013). Para estimar a data de emergência, utilizou-se o cálculo da soma térmica, tendo-se adotado o valor acumulado de 92,5°C dia, a partir da temperatura base de 10°C (SCHNEIDER et al., 1987), com uso da temperatura média diária do ar (T), que foi obtida a partir da média aritmética entre Tx e Tn, para Pelotas e média ponderada entre Tx, Tn, temperatura do ar medida as 9 horas (T9) e 15 horas (T15), (INMET, 1992) para Santa Maria. A data de ocorrência do estágio de emissão da primeira folha trifoliada (V2) foi estimada por meio do modelo Soydev (SETIYONO et al., 2007), com uso de coeficientes obtidos por Streck et al. (2009).

A data de início da floração (R1) foi simulada com o modelo não linear de resposta do desenvolvimento à temperatura do ar e com o fotoperíodo proposto por Sinclair et al. (1991), com uso de diferentes coeficientes conforme o grupo de maturidade. A data de ocorrência do estágio de início de enchimento de grãos (R5) foi estimada pelo modelo proposto por Sinclair et al. (2007), por meio de regressão linear baseada no fotoperíodo e em coeficientes variáveis de acordo com o grupo de maturidade.

A data do estágio de maturação fisiológica (R7) foi simulada a partir da data de ocorrência do estágio R5, por meio do cálculo da soma térmica, adotando-se a temperatura base de 10°C e a soma térmica acumulada de 554°C dia (MARTORANO et al., 2012). A data da maturação de colheita (R8) foi simulada pelo modelo proposto por Sinclair (1986), sem a função de resposta ao déficit hídrico no algoritmo e utilizaram-se os valores de plastocrono obtidos por Streck et al. (2008). Para o uso do modelo de Sinclair (1986), também foi necessário estimar a densidade de fluxo da radiação solar global incidente (Rg), utilizando-se a equação de Ångström-PreScott com coeficientes mensais ajustados para Santa Maria (BURIOL et al., 2012) e para Pelotas (STEINMETZ; ASSIS, 1999).

Os dados de duração dos subperíodos fenológicos e do ciclo total de desenvolvimento foram submetidos à análise exploratória BoxPlot, análise de variância e comparação de médias pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, considerando como fonte de variação as datas de semeadura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

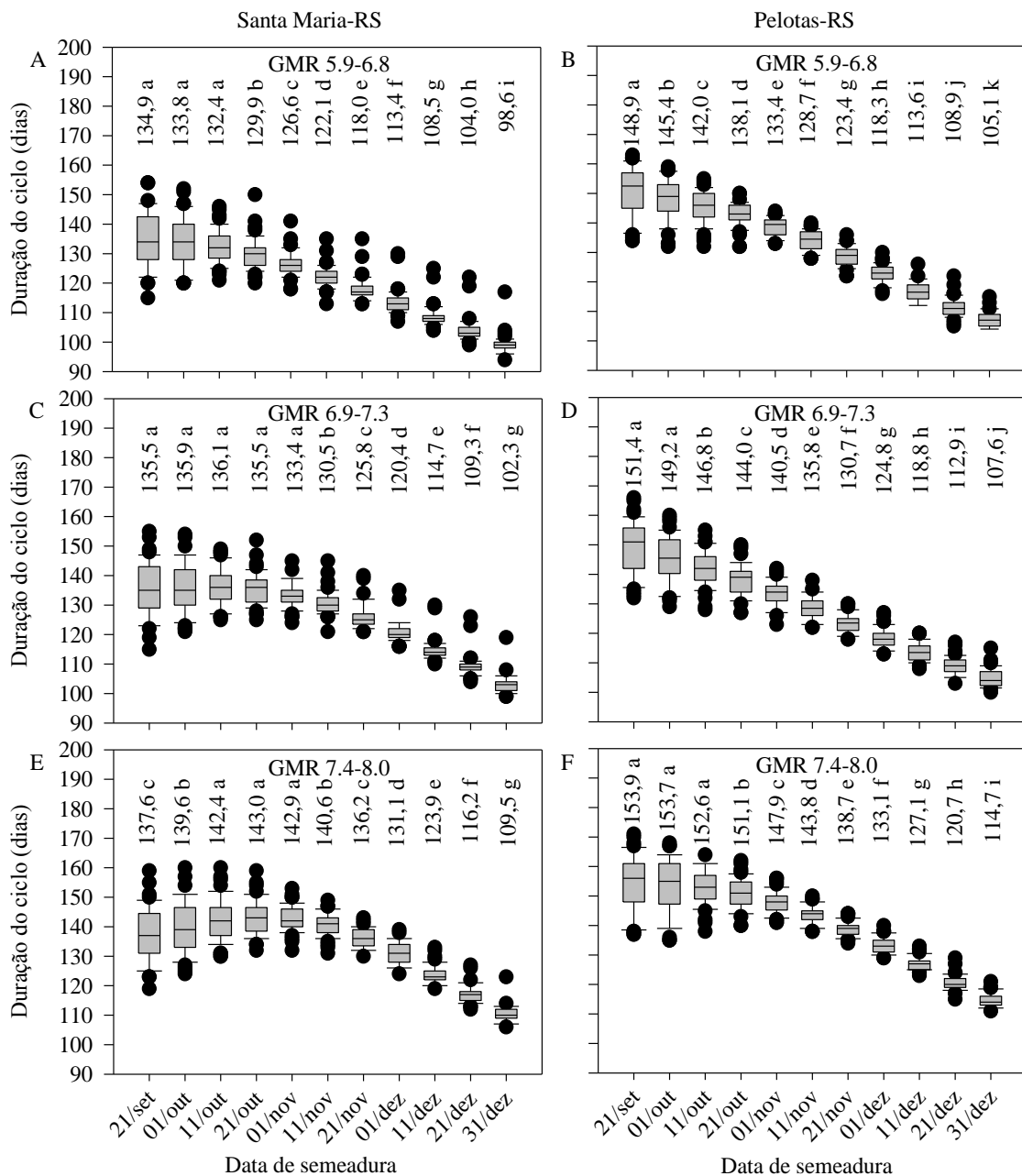
A duração do ciclo de desenvolvimento da soja nos grupos de maturidade relativa considerados (GMR: 5.9–6.8; 6.9–7.3; 7.4–8.0) apresentou decréscimo em todas as 11 datas de semeadura, com exceção do GMR 7.4-8.0 para Santa Maria em que houve menor duração para a semeadura de setembro (Figura 1). Houve redução total da ordem de 28 e 24 % entre a primeira (21/set) e a última data (31/dez) para Santa Maria (Figura 1A, 1C, 1E) e Pelotas (Figura 1B, 1D, 1F), respectivamente. Isso se deve principalmente ao aumento gradativo da temperatura do ar desde setembro a janeiro, o que aumenta a soma térmica diária, além da maior indução fotoperiódica à floração nas semeaduras mais tardias, que afeta principalmente o(s) subperíodo(s) V2-R1 e R1-R5, conforme demonstrado por Sinclair et al. (1991) e Sinclair et al. (2007) e pelos resultados desse trabalho (Figuras 2 a 7).

Zanon et al. (2018, p. 65) apresentam valores de duração média do ciclo de desenvolvimento da soja no Rio Grande do Sul, para diferentes GMR e datas de semeadura. De maneira geral, independentemente do GMR, os valores de duração obtidos para Pelotas foram bastante semelhantes, principalmente considerando as semeaduras de novembro e dezembro. Todavia, houve uma tendência de subestimativa de aproximadamente 10 dias para semeaduras realizadas em outubro. Considerando o GMR 7.4-8.0 houve pouca diferença de duração do ciclo entre Santa Maria e Pelotas para semeaduras de novembro e dezembro (Figura 1), tal como obtido por Zanon et al. (2018, p. 65). Para os GMR 5.9-6.8 e 6.9-7.3 os dados obtidos em Santa Maria apresentaram diferença máxima de 11 dias nas semeaduras de novembro e dezembro e menor desempenho em outubro, com diferença de até 23 dias em relação aos apresentados por Zanon et al. (2018, p. 65).

A diferença do ciclo entre os três GMR da soja foi menor nas primeiras datas de semeadura (21/set a 21/out), sendo o GMR 7.4-8.0 sempre o de maior ciclo (Figura 1). Esse resultado era esperado tendo em vista que, em uma mesma região, quando maior o GMR, maior deverá ser a duração do ciclo de desenvolvimento de uma cultivar (ZANON et al., 2018, p. 62). Verificou-se também maior amplitude entre o primeiro e o quarto quartil da análise exploratória box-plot nas primeiras datas de semeadura (Figura 1). Isso ocorreu devido

às maiores variações nas condições térmicas entre anos no mês de outubro, influenciando principalmente na duração dos subperíodos iniciais de desenvolvimento da soja.

Figura 1. Variabilidade interanual e duração média do ciclo de desenvolvimento da soja, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), em função de 11 datas de semeadura em Santa Maria, RS (A, C e E) e Pelotas, RS (B, D e F).



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Analisando os valores extremos foi possível obter informações acerca da amplitude de duração histórica do ciclo da soja. Para a semeadura de 21 de setembro em Santa Maria, por exemplo, a duração mínima e máxima obtida para os GMR 5.9-6.3 e GMR 6.3-7.4 foi de 115 e 154 dias, respectivamente. Para o GMR 7.4-8.0 a duração do ciclo para todos os anos estudados ficou entre 119 e 159 dias (Figura 1A, 1C, 1E). Essa interpretação pode ser utilizada para todas as datas de semeadura e GMR.

O efeito da latitude ficou evidenciado quando comparadas as durações do ciclo para Santa Maria (Figura 1A, 1C, 1E) e Pelotas (Figura 1B, 1D, 1F). Houve maior duração do ciclo de desenvolvimento para Pelotas, verificando-se uma diferença decrescente entre os locais ao longo do calendário de semeadura. Essa menor diferença ocorreu devido a menor indução ao florescimento pelo fotoperíodo mais longo próximo ao solstício de verão, assim como pela menor disponibilidade térmica para Pelotas, que apresenta temperatura média do ar de 1,2°C menor do que Santa Maria, considerando o banco de dados dos dois locais. A menor temperatura do ar em Pelotas também está relacionada ao maior efeito da oceanidade e diferença do vento predominante.

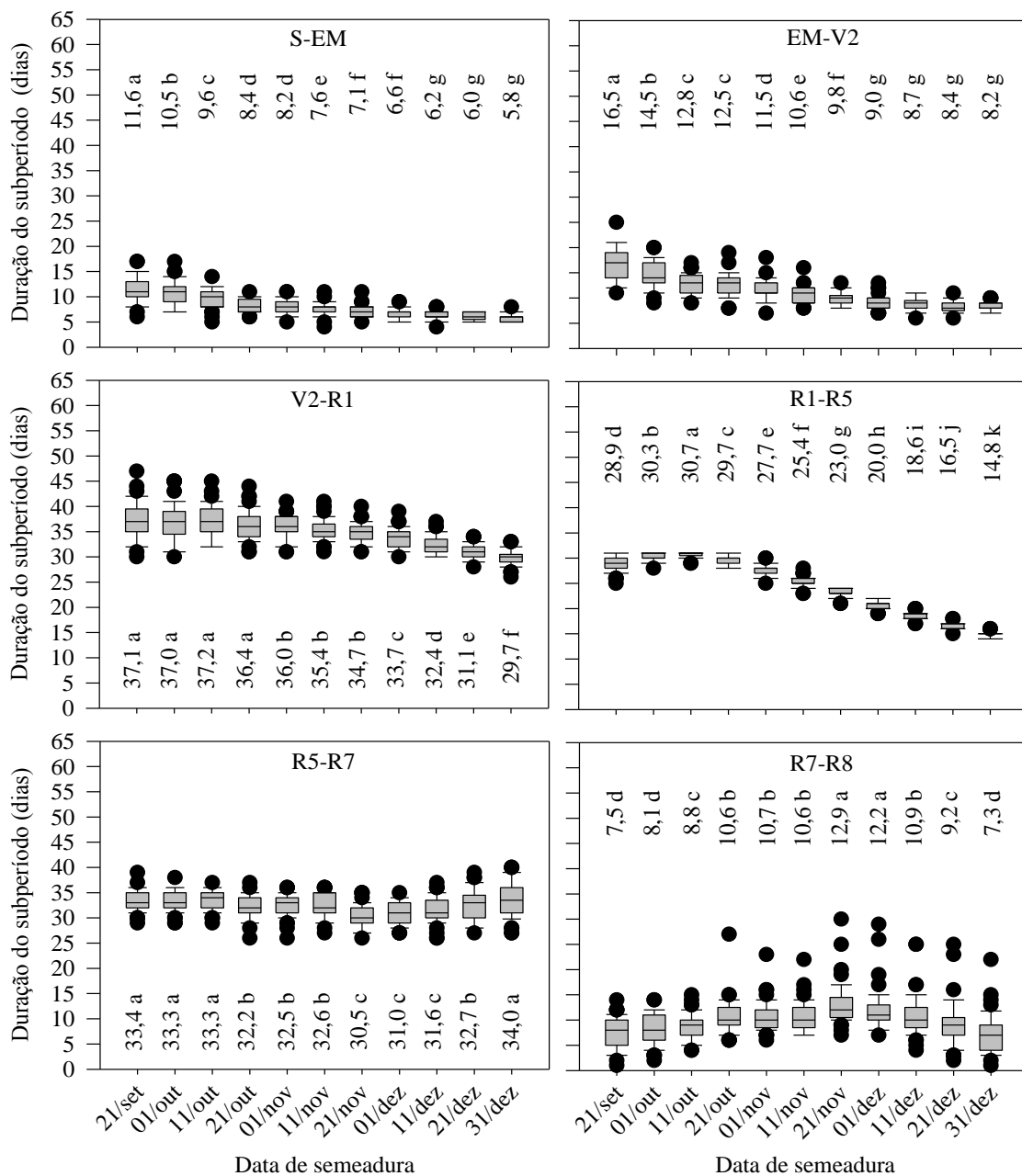
O subperíodo S-E apresentou maior duração nas primeiras datas de semeadura devido a menor temperatura do ar e do solo no ambiente de cultivo. Nas semeaduras simuladas até 21 de outubro, verificou-se uma duração do subperíodo entre 8 e 11 dias para Santa Maria (Figuras 2, 3 e 4) e entre 9 e 13 dias para Pelotas (Figuras 5, 6 e 7), sendo essa diferença devido à maior disponibilidade térmica em Santa Maria.

Com relação ao subperíodo emergência (E) até a primeira folha trifoliada (V2), independentemente do GMR, verificou-se redução da duração média ao longo do período de semeadura, principalmente pelo aumento da disponibilidade térmica, obtendo-se maior duração desse subperíodo para Pelotas. Essa tendência foi observada para todos os GMR, sendo que a duração desse subperíodo foi levemente superior para o GMR 7.4-8.0 (Figuras 4 e 7).

Já para o subperíodo V2-R1, além do efeito da temperatura do ar, observa-se um efeito mais destacado do fotoperíodo na indução ao florescimento, em que as primeiras datas de semeadura (até 11/out) apresentam menor duração, principalmente para as cultivares de maior GMR, independentemente do local (Figuras 2 a 7). Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por Zanon et al. (2015a) em semeaduras realizadas fora do período recomendado (setembro, janeiro e fevereiro), em que verificaram redução da duração fase vegetativa em função da exposição a fotoperíodos curtos, principalmente em cultivares de

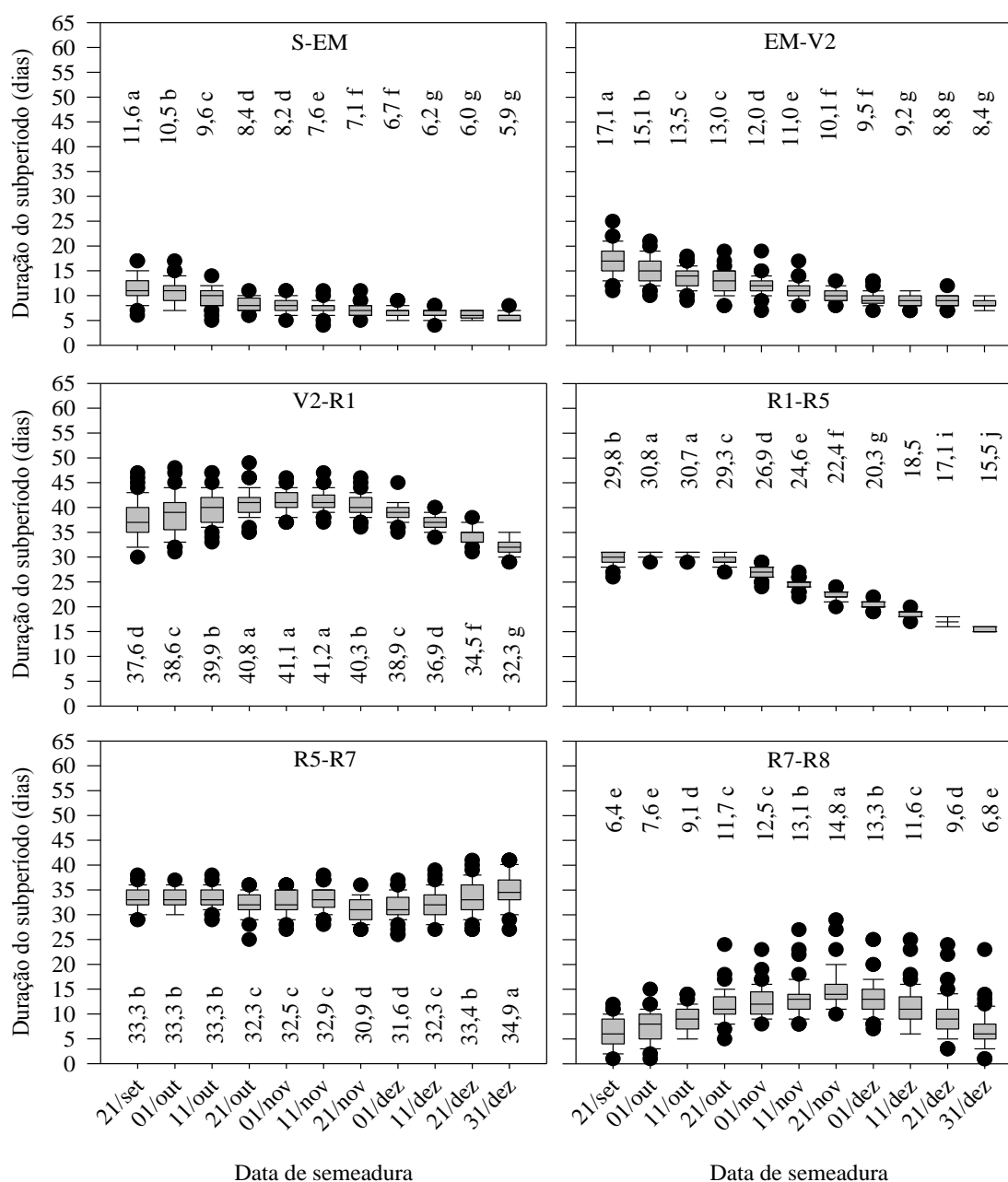
hábito de crescimento determinado, especialmente as mais antigas, por não possuírem o gene de juvenildade (CARPENTIERI-PÍPOLO; ALMEIDA; KIIHL, 2002).

Figura 2. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a sementeira (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, simulado para a série histórica diária de 1968 a 2017, em função de 11 datas de sementeira em Santa Maria, RS.



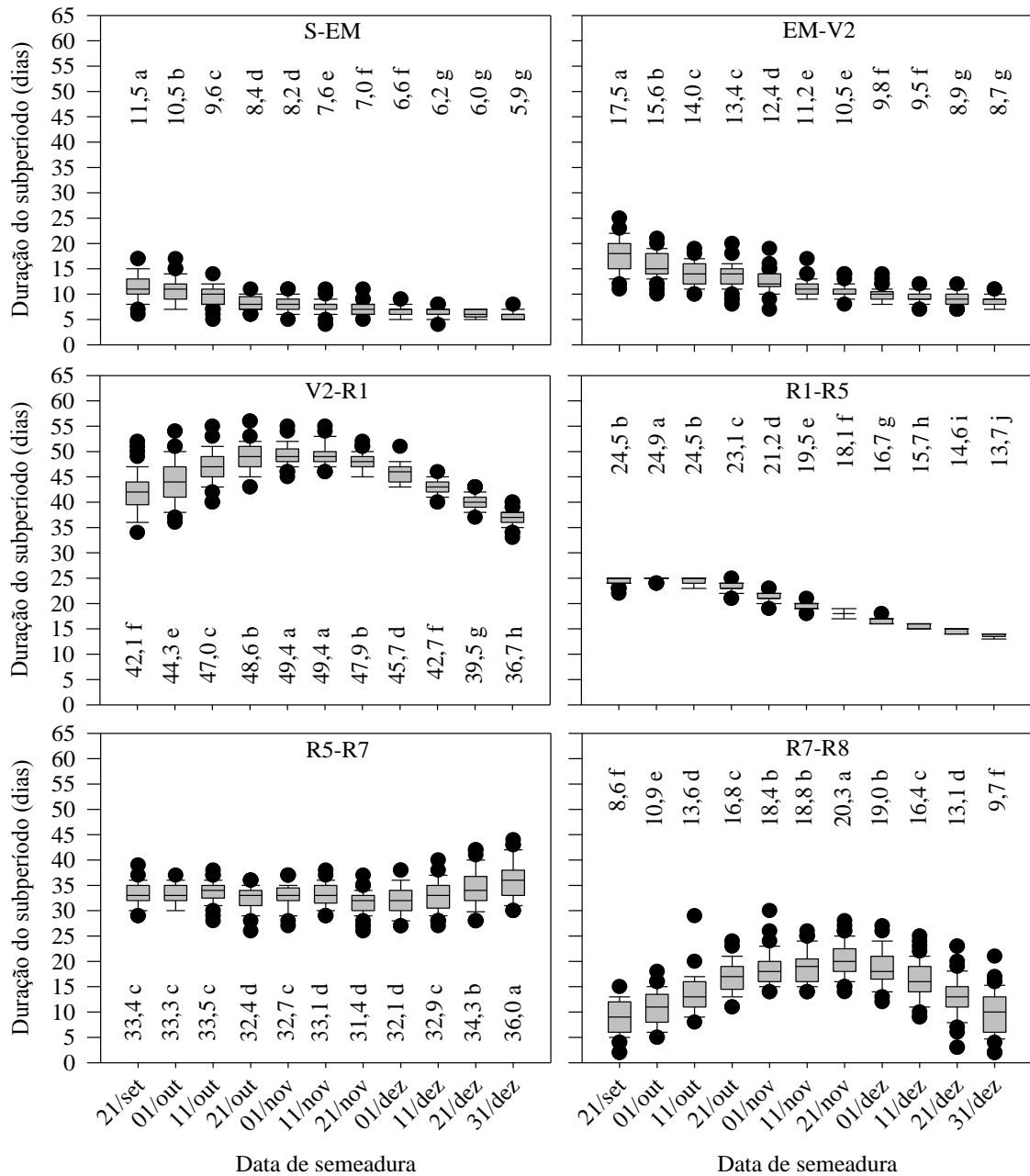
*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 3. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, simulado para a série histórica diária de 1968 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Santa Maria, RS.



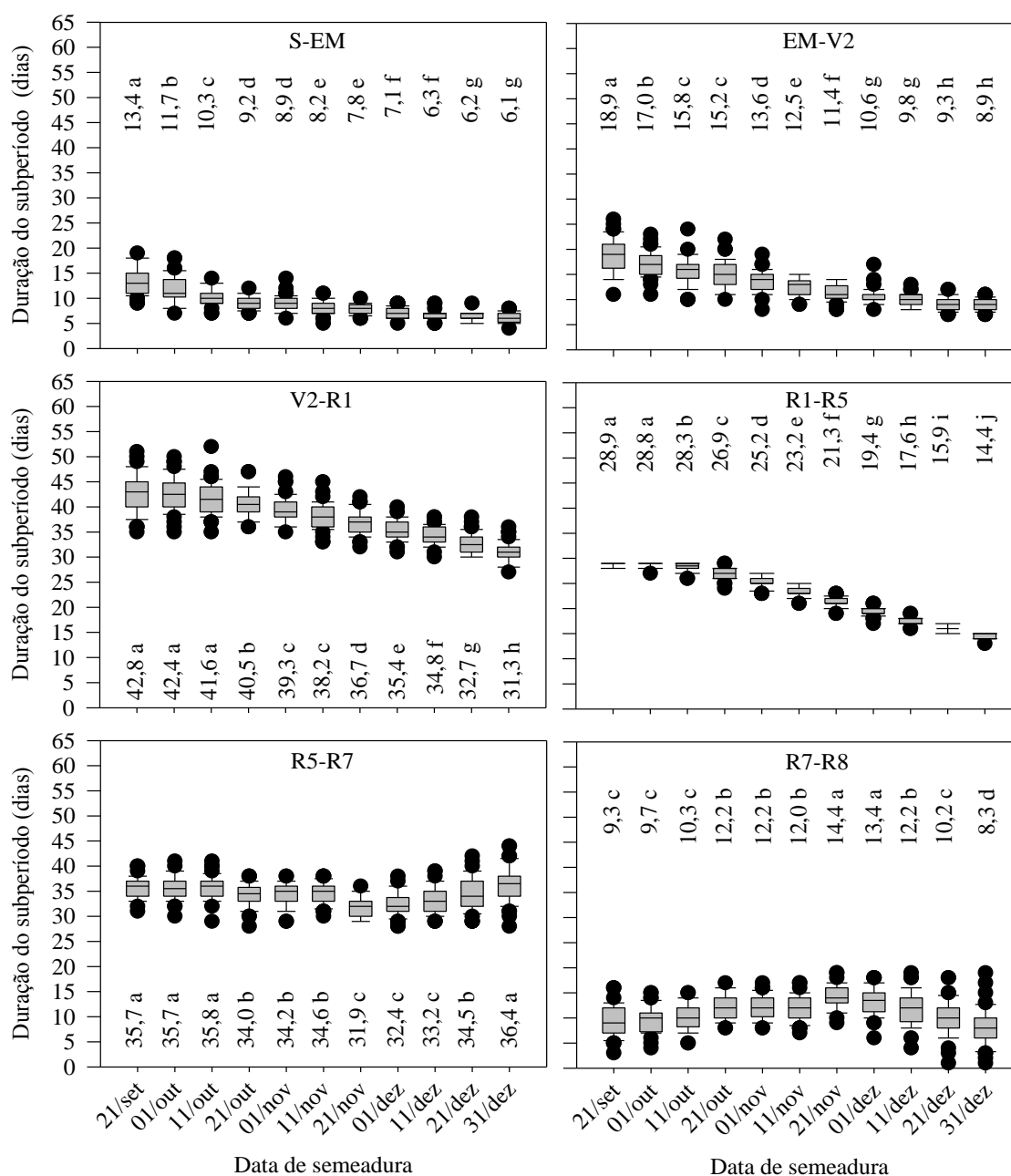
*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 4. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, simulado para a série histórica diária de 1968 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Santa Maria, RS.



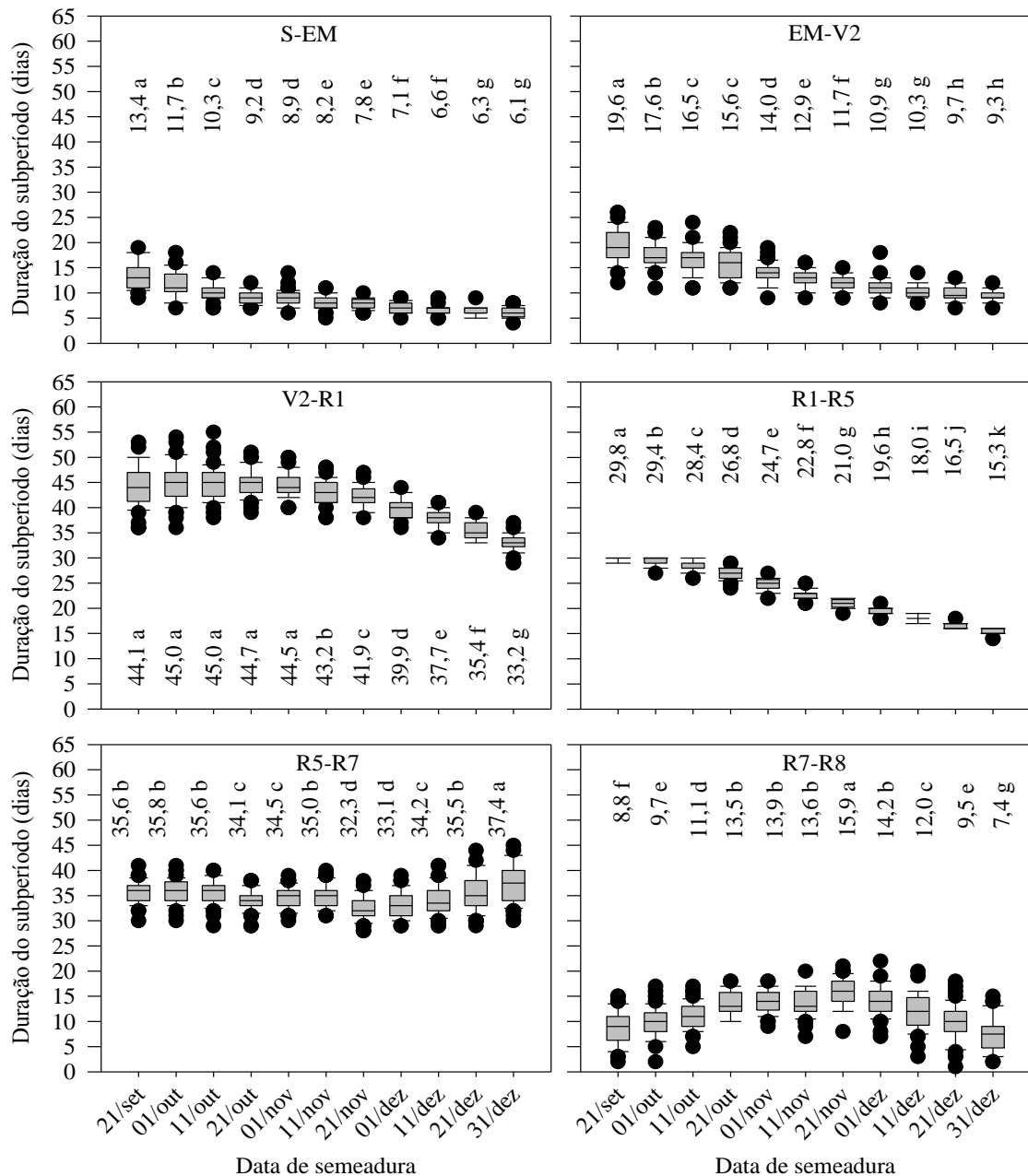
*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 5. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, simulado para a série histórica diária de 1971 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Pelotas, RS.



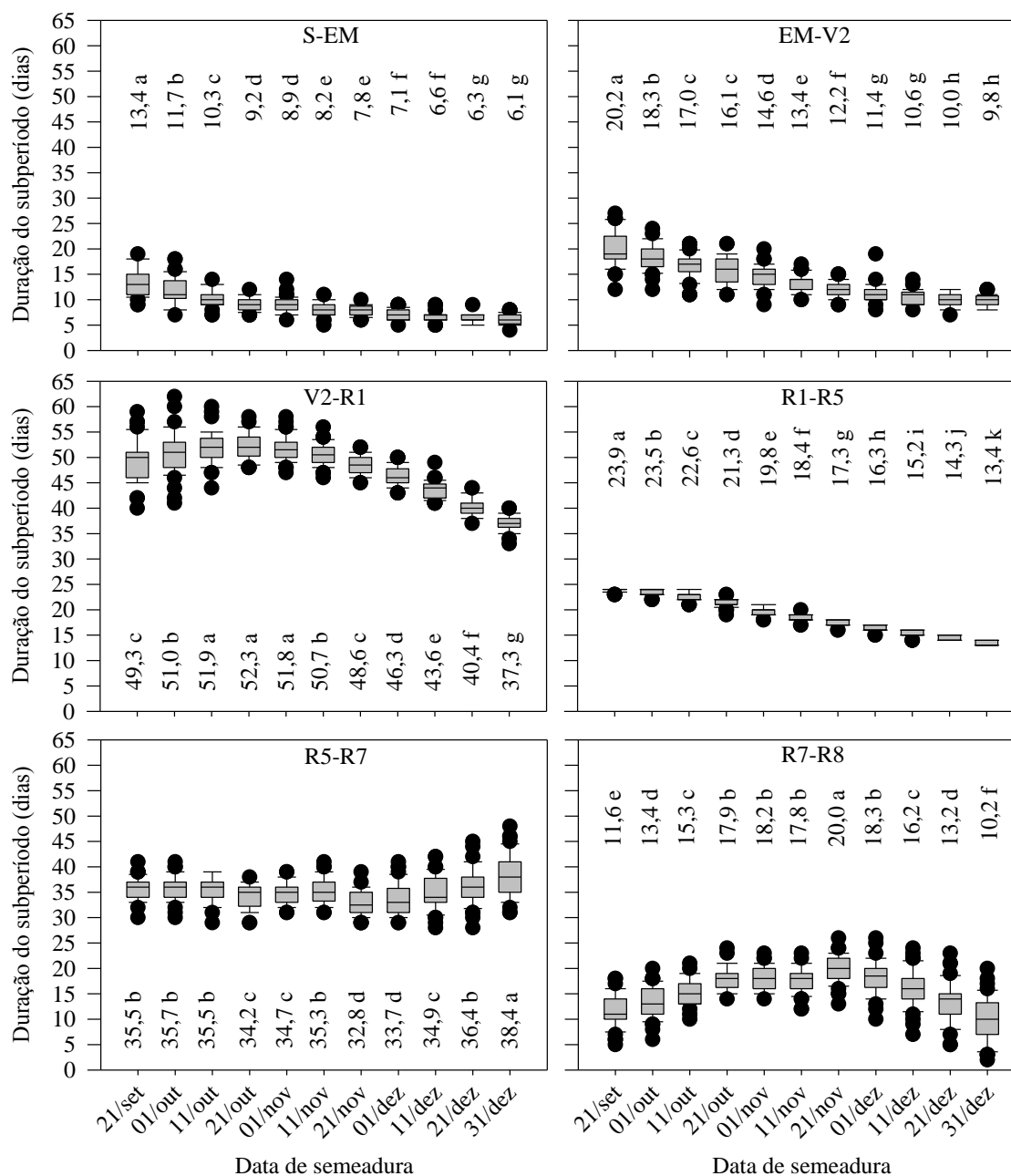
**Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade; ^{ns}Não significativo.

Figura 6. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, simulado para a série histórica diária de 1971 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Pelotas, RS.



**Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade; ^{ns}Não significativo.

Figura 7. Variabilidade interanual e duração média dos subperíodos de desenvolvimento da soja compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8), considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, simulado para a série histórica diária de 1971 a 2017, em função de 11 datas de semeadura em Pelotas, RS.



**Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade; ^{ns}Não significativo.

O desenvolvimento da soja, assim como o seu crescimento, está atrelado ao hábito de crescimento das cultivares e à data de semeadura. Nos últimos anos, houve um aumento expressivo na utilização de cultivares de hábito indeterminado, as quais possuem um período

de sobreposição entre a fase vegetativa e reprodutiva e o crescimento em estatura e emissão de nós entre R1 e R5 maiores (ZANON et al., 2016). Se por um lado existe maior competitividade por fotoassimilados entre as estruturas vegetativas e reprodutivas, também existe uma maior plasticidade para contornar condições adversas, como a ocorrência de estresse hídrico e danos por pragas. Porém, os dados de desenvolvimento da soja obtidos nesse trabalho podem ser utilizados para todas as cultivares, tendo em vista que o momento de ocorrência dos estágios V2 e R1 praticamente não variam em função do hábito de crescimento da soja (ZANON et al., 2018, p. 59).

O subperíodo R1-R5 é o que apresenta a menor variabilidade entre anos para os três GMR nos dois locais (Figuras 2 a 7), o que permite inferir um controle fotoperiódico significativamente maior do que a temperatura do ar sobre sua duração, conforme expressa o modelo de Sinclair et al. (2007). De maneira geral, para ambos os locais de estudo, para as datas de semeadura a partir de 01 de novembro, verifica-se uma acentuada redução do subperíodo R1-R5 (Figuras 2 a 7), o que está associado à diminuição do fotoperíodo (SINCLAIR et al., 2007), que se acentua cerca de 10 dias após o solstício de verão. Por isso, tanto para Santa Maria quanto para Pelotas, a menor duração desse subperíodo é verificada para a última data de semeadura.

Além disso, houve menor duração do subperíodo R1-R5 para o GMR 7.4-8.0, evidenciando uma maior indução fotoperiódica. Assim, deve-se ter cuidado na utilização dessas cultivares em função de que esse subperíodo é o mais crítico à ocorrência de estresses como déficit hídrico (MONTROYA et al., 2017; SIONIT; KRAMER, 1977) e excesso hídrico (BEUTLER et al., 2014), principalmente em terras baixas (ROCHA et al., 2017).

A duração do subperíodo compreendido entre R5 e R7 foi a que apresentou a menor variação entre datas de semeadura, em que a média foi de aproximadamente 30 a 35 dias. Essa pequena variabilidade obtida para esse subperíodo, deve-se a uma leve tendência de maior duração para as últimas datas de semeadura (Figuras 2 a 7), em função da menor disponibilidade térmica, típica dos meses de março e abril em relação aos meses de verão. Para o subperíodo R7-R8 houve maior duração para semeaduras próximas ao mês de novembro.

Segundo Rocha et al. (2017) há pouca diferença no desenvolvimento da soja em função do cultivo em terras altas ou em terras baixas. Dessa forma, além do ambiente de terras altas, em que a soja é tradicionalmente cultivada, os resultados obtidos nesse trabalho indicam a amplitude da duração do ciclo de desenvolvimento para praticamente a totalidade

da área cultivada com soja em terras baixas, pois levam em consideração condições climáticas mais distintas da Metade Sul do Rio Grande do Sul.

CONCLUSÕES

A duração do ciclo de desenvolvimento da soja é maior para Pelotas em relação à Santa Maria devido à menor disponibilidade térmica e ao fotoperíodo mais longo próximo ao solstício de verão.

A duração da fase vegetativa é reduzida em sementeiras precoces devido à exposição a fotoperíodos curtos, principalmente para as cultivares de maior grupo de maturidade relativa (GMR).

A duração do subperíodo R1-R5 é decrescente de outubro até dezembro e está relacionada à diminuição do fotoperíodo nas sementeiras mais tardias.

As cultivares de GMR entre 7.4 e 8.0 apresentaram maior e menor duração da fase vegetativa e reprodutiva, respectivamente, em relação aos demais GMR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BEUTLER, A. N. et al. Soil hydric excess and soybean yield and development in Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, n. 10, p. 1461-1466, 2014.

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

CARPENTIERI-PÍPOLO, V.; ALMEIDA, L. A. de; KIIHL, R. A. de S. Inheritance of a long juvenile period under short-day conditions in soybean. **Genetics and Molecular Biology**, v. 25, n. 4, p. 463-469, 2002.

CERA, J. C. et al. Extending the evaluation of the SoySim model to soybean cultivars with high maturation groups. **Field Crops Research**, v. 201, n. 1, p.162-174, 2017.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Soja - Brasil: Série histórica de área plantada e de produtividade / Companhia Nacional de Abastecimento**. – Brasília: Conab, 2019. Online. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras> Acessado em: 08 de janeiro de 2019.

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

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

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.

MONTOYA, F. et al. Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 30–45, 2017.

ROCHA, T. S. M. et al. Performance of soybean in hydromorphic and nonhydromorphic soil under irrigated or rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 5, p. 293-302, 2017.

RODRIGUES, O. et al. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 431-437, 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**, v. 17, n. 4, p. 299-308, 1987.

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**, v. 100, n. 2-3, p. 257-271, 2007.

SETIYONO, T. D. et al. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. **Field Crops Research**, v. 119, n. 1, p. 161-174, 2010.

SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain productivity. I. Model development. **Field Crops Research**, 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**, 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.

SIONIT, N.; KRAMER, P. J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, v. 69, n. 2, p. 274-278, 1977.

STEINMETZ, S.; ASSIS, F. N. Estimativa da radiação solar global a partir da insolação na região de Pelotas, Rio Grande do Sul. **Revista Agropecuária de Clima Temperado**, v. 2, n. 1, 1999.

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

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

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

ZANON, A. J. et al. Development of soybean cultivars as a function of maturation group and growth type in high lands and in lowlands. **Bragantia**. v. 74, p. 400-411, 2015.

ZANON, A. J. et al. Growth habit effect on development of modern soybean cultivars after beginning of bloom in Rio Grande do Sul. **Bragantia**, v. 75, n. 4, p. 445-458, 2016.

ZANON A. J. et al. **Ecofisiologia da soja**: visando altas produtividades. Santa Maria, RS. Palloti, 2018. 136 p.

3. CAPÍTULO II - METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DO EXCESSO HÍDRICO PARA A CULTURA DA SOJA EM TERRAS BAIXAS

RESUMO

O excesso hídrico é um dos principais fatores limitantes à expansão do cultivo de soja em terras baixas. Assim, faz-se necessária a correta determinação dessa variável a partir do cálculo do balanço hídrico sequencial (BHS) diário, a qual deve ser representativa do que ocorre em condição de campo. O objetivo deste trabalho foi validar uma nova metodologia de cálculo do balanço hídrico sequencial, a qual considera o tempo de drenagem da água dos macroporos do solo, através da comparação com a ocorrência de excesso hídrico determinado pela medição da umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cultura da soja em Planossolo Háplico. A nova metodologia proposta utiliza dois valores de capacidade de armazenamento de água (CAD), sendo que em um deles a macroporosidade é considerada. Após a saturação do solo, o tempo necessário para a drenagem dos macroporos é calculado, sendo considerada uma condição de excesso hídrico durante esse período. A metodologia foi testada utilizando dados de precipitação efetiva calculada e precipitação medida. Como referência para os resultados obtidos com o cálculo do BHS foram utilizados os dados de umidade volumétrica do solo monitorados ao longo do ciclo da soja no ano agrícola 2014/15. A microporosidade foi utilizada como limite inferior da ocorrência de excesso hídrico na área. Assim, o excesso hídrico foi considerado sempre que a umidade volumétrica diária do solo foi maior que $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Ao longo do ciclo da soja, os dados de umidade do solo na camada de 0-10 cm indicaram a presença de excesso hídrico em 38 dias. A partir do BHS utilizando a precipitação medida, foram encontrados 35 dias de excesso hídrico, coincidindo adequadamente com os dados medidos, exceto para o final do ciclo em que houve superestimativa do excesso hídrico calculado. A metodologia do tempo de drenagem dos macroporos apresentou bom desempenho, sendo recomendada para a utilização em estudos relacionados ao excesso hídrico em terras baixas. O uso da precipitação efetiva calculada se mostrou inadequado para a obtenção do excesso hídrico em terras baixas.

PALAVRAS-CHAVE: *Glycine max*, Balanço hídrico, Planossolos, Precipitação efetiva.

METHODOLOGY OF WATER EXCESS DETERMINATION FOR SOYBEAN CROP IN LOWLAND SOILS

ABSTRACT

Water excess is one of the main limiting factors to the soybean crops expansion in the lowlands. Thus, a correct determination of this variable is necessary from the daily sequential water balance (DSB) calculation, which must be representative of field condition. The objective of this study was to validate a new methodology for the daily sequential water balance, which considers the water drainage time of the soil macropores, through the comparison with the water excess occurrence determined by the soil moisture measurement throughout the soybean cycle on a Haplic Planosol. The proposed new methodology uses two values of available water capacity (AWC), and the macroporosity is considered in one of them. After soil saturation, the time required for the macropores drainage is calculated, being considered water excess condition during this period. The methodology was tested using measured rainfall and calculated effective rainfall data. As a reference for the results obtained with the DSB calculation, soil moisture data monitored throughout the soybean cycle in the

agricultural year 2014/15 were used. Microporosity was used as inferior limit for the water excess occurrence in the area. Thus, the water excess was considered whenever the daily soil moisture was greater than $0.39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. During the soybean cycle, soil moisture content in the 0-10 cm layer indicated the presence of water excess in 38 days. From the DSB using the measured rainfall, 35 days of water excess were found, coinciding adequately with the measured data, except for the final cycle in which there was an overestimation of the calculated water excess. The macropores drainage time methodology presented good performance and is recommended for use in studies related to water excess in lowland soils. The use of calculated effective rainfall is inadequate to obtaining water excess in lowland soils.

KEY WORDS: *Glycine max.* Water balance. Planosols. Effective rainfall.

INTRODUÇÃO

Um dos princípios para a avaliação de modelos matemáticos é a realização de teste da acurácia dos dados resultantes dos modelos utilizados comparados aos valores observados (WALTER et al., 2012). Bortoluzzi (2015) realizou uma análise de risco de excesso hídrico para a cultura da soja em terras baixas na região central do Rio Grande do Sul simulando o desenvolvimento da cultura conforme modelo proposto por Trentin et al. (2013), sob condições hídricas do solo também simuladas através do cálculo de balanço hídrico sequencial (BHS) diário (THORNTHWAITE; MATHER, 1955). Entretanto, o uso dessa metodologia em condições de campo pode requerer ajustes no modelo, além de ser necessária a aferição e consequente calibração do modelo ao confrontar suas estimativas com dados obtidos em condição de campo.

Os solos que ocorrem em terras baixas apresentam lençol freático mais superficial, presença de horizonte B altamente impermeável e maior desestruturação e compactação nas camadas mais superficiais, 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 (SARTORI et al., 2016). O cultivo de soja em terras baixas é característico de poucos locais do mundo, como por exemplo, no sul do Brasil (GUBIANI et al., 2018), na Ásia (VANTOAI et al., 2010) e nos EUA (SCOTT et al., 1989).

No modelo usado por Bortoluzzi (2015), a capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) foi calculada considerando que as raízes exploravam uma camada de zero até 40 cm de profundidade. Em Latossolo, Fietz e Rangel (2008) também utilizaram uma profundidade de 40 cm para o cálculo do BHS. Porém, em Planossolos e terras baixas em geral, os estudos tem mostrado que as raízes de soja se concentram em camadas mais superficiais, o que exige redefinição da camada a ser utilizada no cálculo da CAD. Por

exemplo, Marchesan et al. (2013) relatam que a profundidade da raiz pivotante não foi superior à 23 cm, devido a restrições físicas do Planossolo, sobretudo pela presença de camada de solo compactada. Resultado semelhante foi observado por Hansel (2015) em que o aprofundamento radicular da soja foi no máximo próximo a 20 cm. Em condição de terras baixas em Cachoeirinha, Rocha (2016) identificou um aprofundamento radicular da soja de no máximo 13 cm e de 30 cm para terras altas em Santa Maria.

O aprofundamento de raízes é frequentemente restringido nas áreas de terras baixas porque o nível do lençol freático muitas vezes está próximo à superfície. Gubiani et al. (2018) verificaram que a umidade do solo ficou próxima à umidade de saturação durante praticamente todo o ciclo da cultura da soja na camada de 30-40 cm.. Nesse caso, há forte impedimento do aprofundamento radicular, tendo em vista que a saturação do solo pode ocasionar a morte da raiz principal da soja e aumentar o crescimento de raízes laterais e adventícias (PIRES; SOPRANO; CASSOL, 2002).

No cálculo do BHS realizado por Bortoluzzi (2015), o excesso hídrico foi considerado presente sempre que o conteúdo de água no solo esteve acima da capacidade de campo. Também foi considerado que seriam necessários dois dias de drenagem para o conteúdo de água decrescer até a capacidade de campo após a saturação do solo. Além disso, a infiltração de água no solo foi considerada como a precipitação efetiva (PE) do U. S. Soil Conservation Service, conforme descrito por Frizzzone et al. (2005), a qual consideram que parte da chuva é perdida pela interceptação pela vegetação, enchimento de rugosidades superficiais do solo e por escoamento superficial.

Porém, tendo em vista que a capacidade de infiltração em terras baixas é pequena (Apêndice A) e que há pouco escoamento superficial devido ao relevo plano, buscou-se desenvolver e testar outra metodologia alternativa ao uso da precipitação efetiva e que não considere perdas por escoamento. Essa metodologia consiste em considerar o tempo necessário para a drenagem da água livre presente nos macroporos, o qual também é ponderado pela influência da demanda atmosférica após a ocorrência de chuvas e saturação do solo, juntamente com o estágio de desenvolvimento das plantas, expressos na forma da evapotranspiração diária da cultura, o que não era considerado anteriormente.

O uso da evapotranspiração é adequado tendo em vista que a quantidade de água retirada pelas plantas quando os solos apresentam conteúdo de água acima da capacidade de campo é significativa (VAN LIER, 2017). Nos Planossolos, essa retirada de água pelo sistema radicular das plantas pode ser uma das principais formas de redução do conteúdo de água no

solo, principalmente na camada de 0-10 cm, tendo em vista a declividade reduzida e a dificuldade de escoamento superficial e por drenagem profunda da água.

O objetivo deste trabalho foi propor e testar uma nova metodologia de cálculo do BHS, a qual considera o tempo de drenagem da água dos macroporos do solo, através da comparação com a ocorrência de excesso hídrico determinado pela medição da umidade volumétrica ao longo do ciclo da cultura da soja em Planossolo Háplico.

MATERIAL E MÉTODOS

Visando avaliar o efeito da profundidade do sistema radicular no excesso hídrico resultante, calculou-se o balanço hídrico sequencial (BHS) diário considerando três valores de capacidade de armazenamento de água (CAD) do solo calculados para as profundidades de 10, 20 e 30 cm. Foi realizado o teste do modelo proposto por Bortoluzzi (2015), o qual consiste na utilização de dados de precipitação efetiva (PE) calculados pela metodologia do U. S. Soil Conservation Service (FRIZZONE et al., 2005) e considerando de forma conjunta um tempo de drenagem de dois dias após o conteúdo de água no solo exceder a CAD. Além disso, testou-se também o uso da precipitação medida (PM) ocorrida sem considerar o tempo de drenagem.

Como referência para os resultados obtidos com o cálculo do BHS foram utilizados os dados de umidade volumétrica do solo monitorados ao longo do ciclo da soja no ano agrícola 2014/15, em Santa Maria (GUBIANI et al., 2018). A semeadura da soja foi realizada no dia 14 de novembro de 2014 após cultivo de arroz no verão anterior, com revolvimento da palha após a colheita, nivelamento com lâmina remaplan e pousio no inverno com dessecação pré-semeadura. A maturação fisiológica ocorreu em 26 de março de 2015, totalizando um ciclo de 133 dias. As medições da umidade volumétrica do solo iniciaram no dia 06 de dezembro de 2014 e se estenderam até o fim do ciclo, totalizando 111 dias. Para isso, foi instalado um TDR100 e nele foram conectadas sondas metálicas de 19 cm, que foram alocadas em quatro unidades experimentais (GUBIANI et al., 2018).

Com os dados obtidos por Gubiani et al. (2018), em intervalos de 30 minutos, foi calculada a média diária da umidade volumétrica do solo apenas para a camada de 0-10 cm de profundidade, onde está concentrada a maior parte das raízes da soja e também é menos influenciada pela variação do lençol freático.

A microporosidade foi utilizada como balizadora da ocorrência de excesso hídrico na área e foi determinada pela relação entre o conteúdo volumétrico de água na tensão de 60 cm e o volume da amostra. A microporosidade foi utilizada devido à indisponibilidade do valor referente à umidade volumétrica na capacidade de campo do Planossolo utilizado como referência nesse trabalho (GUBIANI et al., 2018). De qualquer forma, o solo está muito próximo da capacidade de campo após a drenagem dos macroporos e, conseqüentemente, com os microporos totalmente preenchidos com água (OTTONI FILHO et al., 2014). Ademais, o conteúdo de água do solo para uma porosidade de aeração crítica de $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, em que teoricamente inicia a deficiência de oxigênio para as plantas (GRABLE; SIEMER, 1968), também ficou bastante próximo do conteúdo de água na microporosidade do solo (GUBIANI et al., 2018). Dessa forma, considerou-se a presença de excesso hídrico sempre que a umidade volumétrica diária do solo foi maior que $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Com relação ao teste da nova metodologia proposta, a qual considera o tempo de drenagem dos macroporos, foram utilizados dois valores de CAD, conforme expresso nas Equações 1, 2 e 3 e representada na Figura 1.

$$\text{CAD}_1 = (\theta_{\text{mic}} - \theta_{\text{pmp}}) \cdot Z_1 \quad (1)$$

$$\text{CAD}_{\text{mac}} = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{mic}}) \cdot Z_2 \quad (2)$$

$$\text{CAD}_2 = \text{CAD}_1 + \text{CAD}_{\text{mac}} \quad (3)$$

em que:

θ_{mic} – Conteúdo volumétrico de água na microporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

θ_{pmp} – Conteúdo volumétrico de água no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

Z_1 – Profundidade do sistema radicular, variável ao longo do ciclo (mm);

θ_{sat} – Conteúdo volumétrico de água na saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

CAD_{mac} – Conteúdo de água no solo entre a θ_{sat} e a θ_{mic} (mm).

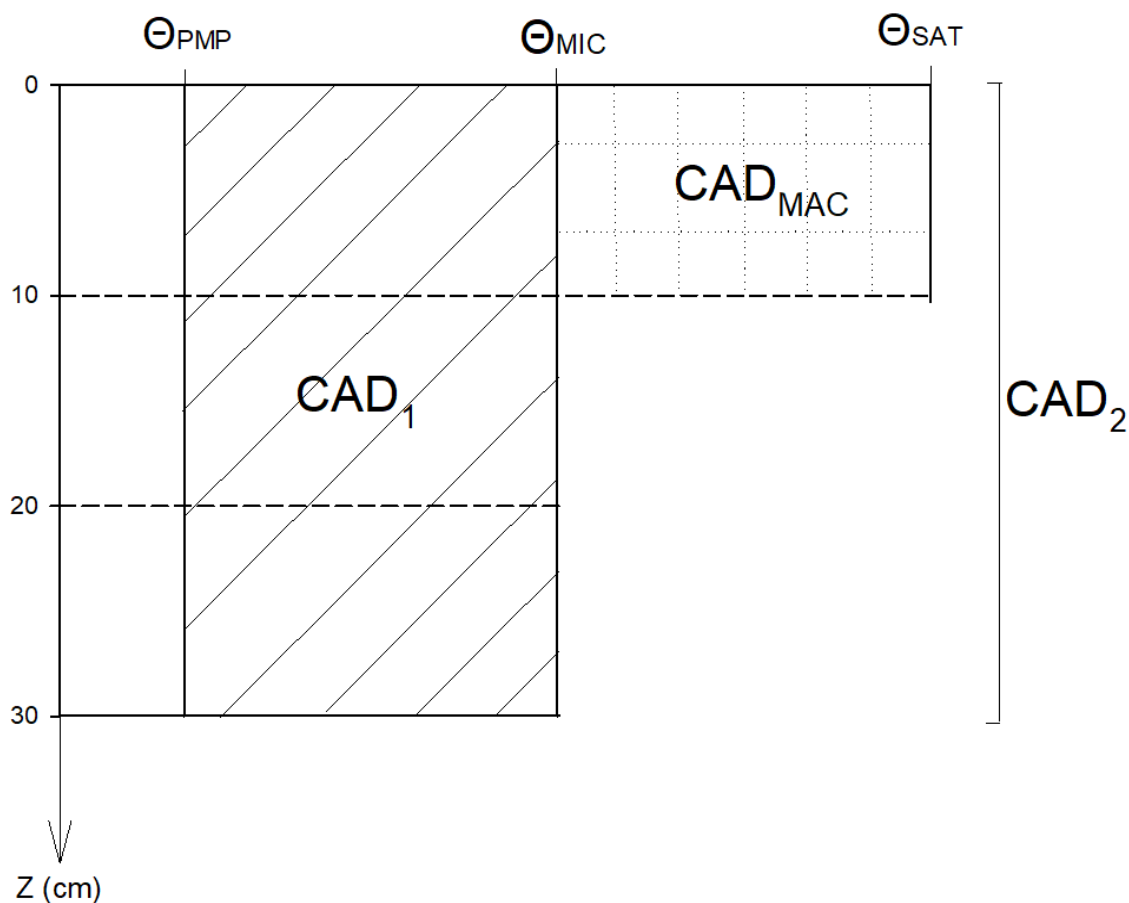
Z_2 – Profundidade do sistema radicular para cálculo da CAD_{mac} (100 mm);

A CAD_1 refere-se ao conteúdo de água entre o θ_{mic} e o θ_{pmp} na camada de solo atrelada aos estágios de desenvolvimento da soja, até uma profundidade máxima de 30 cm (Figura 1). A CAD_2 , por sua vez, consiste no somatório da CAD_1 com o conteúdo de água nos macroporos (CAD_{mac}), ou seja, entre a θ_{sat} e a θ_{mic} . A CAD_{mac} foi considerada apenas para a camada de 0-10 cm, pois essa é mais independente das flutuações do lençol freático, além de

ser a camada do solo com maior concentração de raízes e que possui maior impacto para as plantas.

Nessa metodologia, após a ocorrência de precipitação pluviométrica suficiente para completar a CAD_2 , inicia-se o processo de drenagem da água livre por ação da força gravitacional, que associado à evapotranspiração da cultura gera sucessivos valores de “negativo acumulado de drenagem” no cálculo do BHS. Consequentemente, há uma redução do armazenamento de água no solo até chegar ao limite superior da CAD_1 , equivalente ao θ_{mic} . Durante esse período, considera-se que a planta está submetida a uma condição de excesso hídrico, com restrição de oxigênio. Assim, esse processo vai depender basicamente da condição de demanda evaporativa da atmosfera após a chuva, do estágio de desenvolvimento e do crescimento da cultura.

Figura 1. Representação esquemática dos limites de conteúdo de umidade da metodologia do tempo de drenagem dos macroporos até 10 cm de profundidade, representada pelo conteúdo de água no solo entre a saturação (θ_{sat}) e a microporosidade (θ_{mic}) (CAD_{mac}), em que a CAD_1 trata-se do conteúdo de água entre a θ_{mic} e o ponto de mucha permanente (θ_{pmp}) até 30 cm de profundidade (Z) e a CAD_2 é o somatório da CAD_{mac} e CAD_1 .



A CAD_1 inicial de 23 mm foi determinada para a profundidade do sistema radicular de 10 cm, sendo considerada até a primeira folha trifoliolada (V2), considerando os dados de microporosidade e ponto de murcha permanente obtidos por Gubiani et al. (2018). Para o subperíodo entre V2 e o início da floração (R1) foi utilizada uma curva de crescimento sigmoidal do sistema radicular (DOURADO NETO et al., 1999). A CAD_1 final, utilizada após R1, foi de 66 mm e calculada para a profundidade de 30 cm. Os valores calculados de CAD_2 inicial e final foram 29 e 72 mm, respectivamente, conforme dados de macroporosidade obtidos por Gubiani et al. (2018).

Realizou-se então o cálculo do BHS diário, contabilizando a precipitação efetiva (PE) calculada (FRIZZONE et al., 2005) e a precipitação pluviométrica medida (PM), visando definir qual possibilita a obtenção de resultados mais próximos aos verificados em condição de campo. Como referência, utilizaram-se novamente os dados de umidade volumétrica do solo medidos com TDR ao longo do ciclo da soja conduzida no ano agrícola de 2014/2015 (GUBIANI et al., 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os 111 dias de medição da umidade volumétrica do solo na área cultivada com soja no ano agrícola de 2014/2015, registrou-se uma precipitação pluvial total de 551 mm. O conteúdo de água do solo esteve acima daquela retida nos microporos (θ_{mic}) em 38 dias (Tabela 1). O mesmo número de dias foi observado quando realizado o BHS para a profundidade de 10 cm (CAD_{10} PE) (Tabela 1), utilizando a precipitação efetiva (PE) e adição de um tempo de drenagem de dois dias de excesso hídrico (BORTOLUZZI, 2015). Por outro lado, utilizando a precipitação medida (CAD_{10} PM) e sem levar em consideração o tempo de drenagem, verificou-se a ocorrência de apenas 17 dias de excesso hídrico.

Considerando a CAD_{10} PE, verificou-se a ocorrência de oito dias de excesso hídrico através do cálculo do BHS, porém não foi observado através do acompanhamento da umidade do solo por TDR ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja. Para as demais profundidades (CAD_{20} PE e CAD_{30} PE), isso foi verificado apenas no dia 24 de dezembro (Tabela 1). Essa diferença entre o excesso hídrico medido e o simulado através do BHS ocorreu devido ao uso do tempo necessário para a drenagem da água presente nos macroporos após o conteúdo de água no solo exceder a CAD, o qual foi de dois dias (BORTOLUZZI, 2015). Porém, trata-se de um tempo médio de drenagem, o qual pode variar em função da magnitude do excesso hídrico ocorrido no dia considerado.

Tabela 1. Umidade do solo diária medida* ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), chuva (mm) e dias com excesso hídrico (EXC), considerando a capacidade de armazenamento de água (CAD) do solo para as profundidades de 10 cm (CAD_{10}), 20 cm (CAD_{20}) e 30 cm (CAD_{30}), utilizando a precipitação medida (PM) e a precipitação efetiva (PE) considerando um tempo de drenagem de dois dias após o conteúdo de água no solo exceder a CAD, para dias em que houve excesso hídrico ao longo do ciclo da soja em um Planossolo Háplico, no ano agrícola 2014/2015, em Santa Maria, RS.

Data	Umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	PM (mm)	CAD_{10} PM	CAD_{10} PE	CAD_{20} PM	CAD_{20} PE	CAD_{30} PM	CAD_{30} PE
10/12/2014	0,428*	22,6	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC
11/12/2014	0,409	0	-	EXC	-	EXC	-	EXC
12/12/2014	0,395	0	-	EXC	-	EXC	-	EXC
16/12/2014	0,401	0,5	-	-	-	-	-	-
17/12/2014	0,438	29,1	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC
18/12/2014	0,430	0	-	EXC	-	EXC	-	EXC
19/12/2014	0,397	0	-	EXC	-	EXC	-	EXC
21/12/2014	0,439	71,6	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC
22/12/2014	0,429	21,2	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC
23/12/2014	0,404	0	-	EXC	-	EXC	-	EXC
24/12/2014	-	0	-	EXC	-	EXC	-	EXC
27/12/2014	0,434	101,1	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC
28/12/2014	0,428	0,7	-	EXC	-	EXC	-	EXC
29/12/2014	0,430	3,5	-	EXC	-	EXC	-	EXC
30/12/2014	0,418	0	-	-	-	-	-	-
31/12/2014	0,406	0	-	-	-	-	-	-
01/01/2015	0,407	0	-	-	-	-	-	-
02/01/2015	0,445	23,8	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC
03/01/2015	0,427	0	-	EXC	-	EXC	-	EXC
04/01/2015	0,403	0	-	EXC	-	EXC	-	EXC
09/01/2015	0,421	18,6	-	-	-	-	-	-
10/01/2015	0,432	14,7	EXC	-	EXC	-	EXC	-
11/01/2015	0,433	13,0	EXC	EXC	EXC	-	EXC	-
12/01/2015	0,420	0,1	-	EXC	-	-	-	-
13/01/2015	-	0	-	EXC	-	-	-	-
14/01/2015	0,417	19,8	EXC	-	EXC	-	EXC	-
15/01/2015	0,441	8,8	EXC	-	EXC	-	EXC	-
16/01/2015	0,430	0	-	EXC	-	-	-	-
17/01/2015	0,437	10,5	EXC	-	EXC	-	EXC	-
18/01/2015	0,429	0	-	EXC	-	-	-	-
19/01/2015	-	0	-	EXC	-	-	-	-
29/01/2015	0,448	33,8	EXC	EXC	EXC	-	EXC	-
30/01/2015	0,434	3,4	-	EXC	-	-	-	-
31/01/2015	0,394	0	-	EXC	-	-	-	-
11/02/2015	0,406	31,4	EXC	EXC	-	-	-	-
12/02/2015	-	0,8	-	EXC	-	-	-	-
13/02/2015	-	0	-	EXC	-	-	-	-
20/02/2015	0,426	29,4	EXC	EXC	EXC	-	-	-
21/02/2015	0,396	0,1	-	EXC	-	-	-	-
22/02/2015	-	0	-	EXC	-	-	-	-
26/02/2015	0,428	16,8	EXC	-	EXC	-	-	-
27/02/2015	0,417	4,6	EXC	EXC	EXC	-	-	-
02/03/2015	0,397	15,8	EXC	EXC	EXC	-	EXC	-
03/03/2015	-	0	-	EXC	-	-	-	-
04/03/2015	-	0	-	EXC	-	-	-	-
05/03/2015	0,398	5,9	-	-	-	-	-	-

(*) Umidade do solo determinada a partir de dados medidos por Gubiani et al. (2018) na camada de 0-10 cm; (-) dias sem ocorrência de excesso hídrico.

A capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) é pequena até a profundidade de 10 cm, o que contribuiu para uma maior frequência de excesso hídrico nos dados simulados, tendo em vista que essa camada atingiu mais facilmente a saturação após a ocorrência das chuvas ao longo do ciclo. Entretanto, exceto em áreas de elevada compactação ou em anos de chuvas muito frequentes e excessivas, na grande maioria das vezes a profundidade de raízes é superior a 10 cm, mesmo em ambiente hidromórfico (MARCHESAN et al., 2013). Assim, apesar de apresentar resultados próximos do observado a campo, torna-se inapropriado o uso dessa profundidade do sistema radicular no cálculo do BHS.

Considerando a CAD calculada para as profundidades de 20 e 30 cm, verificou-se a ocorrência de 16 dias de excesso hídrico quando utilizada a precipitação efetiva e o tempo de drenagem (CAD₂₀ PE e CAD₃₀ PE) (Tabela 1). De maneira geral, os resultados foram muito semelhantes ao medido no experimento até o início de janeiro (Tabela 1). Entretanto, após esse período o uso da precipitação efetiva calculada penalizou demasiadamente a chuva ocorrida, não refletindo a ocorrência de excesso hídrico verificada a campo (38 dias).

Quando se utilizou a precipitação medida (PM), obteve-se 16 e 13 dias de excesso hídrico, considerando as CAD₂₀ e CAD₃₀, respectivamente (Tabela 1). Dessa forma, nota-se que ao realizar o cálculo do balanço hídrico para profundidades do sistema radicular mais próximas da real, os resultados foram bastante distintos dos 38 dias de excesso hídrico obtidos pela medição da umidade volumétrica a campo (GUBIANI et al., 2018), tanto com o uso da PE como da PM. Esses resultados insatisfatórios permitiram inferir sobre a necessidade de readequação do cálculo do balanço hídrico em Planossolos ou terras baixas em geral, tendo em vista as características intrínsecas relativas a esse tipo de solo.

Considerando a pequena diferença obtida entre o uso das profundidades de 20 e 30 cm no cálculo da CAD utilizada no BHS, ambas poderiam ser utilizadas sem grandes diferenças nos resultados obtidos. Porém, o aprofundamento radicular da soja pode ir além de 20 cm e é bastante dependente das condições específicas de solo e do regime pluviométrico durante o ciclo da cultura. A profundidade da raiz principal da soja no cultivo utilizado como balizador da ocorrência de excesso hídrico desse trabalho ficou entre 8 e 16 cm, dependendo da condição de manejo utilizada (GUBIANI et al., 2018). Entretanto, a chuva acumulada durante o ciclo da soja foi elevada e provavelmente o aprofundamento das raízes seria maior em outro ano agrícola com menor ocorrência de excesso hídrico.

Assim, optou-se por utilizar a profundidade do sistema radicular de 30 cm para o teste da nova metodologia proposta, tendo em vista que dificilmente as raízes ultrapassam essa camada e ao mesmo tempo não são raros os casos em que o aprofundamento ocorre além da profundidade de 20 cm. Obteve-se então o número de dias com excesso hídrico ao longo do ciclo da soja, para as duas formas de cômputo da precipitação pluviométrica (PM e PE) e posteriormente comparados com os valores diários de umidade do solo (GUBIANI et al., 2018) (Tabela 2).

De acordo com os valores de umidade do solo medidos por TDR na camada 0-10 cm ao longo do ciclo da soja, ocorreram 38 dias com excesso hídrico (Tabela 2). Esse resultado foi bastante semelhante ao encontrado quando se utilizou a PM (35 dias), porém muito superior em relação aos 17 dias com excesso hídrico obtidos utilizando a PE (Tabela 2).

De maneira geral, os resultados de excesso hídrico obtidos por simulação utilizando dados de PM foram bastante semelhantes àqueles medidos por TDR para a camada de 0-10 cm, exceto para o final do ciclo (Figura 2A). Em condição de campo, o excesso hídrico foi considerado sempre que o conteúdo volumétrico de água esteve acima do limite da microporosidade dessa camada. Os dias em que se obteve excesso hídrico a partir do BHS estão representados pelas setas verticais (Figura 2A). A menor acurácia no final do ciclo da soja se deve a pequena evapotranspiração da cultura, a qual foi em média de 2 mm dia^{-1} , sendo insuficiente para a redução da CAD_2 até o limite superior da CAD_1 .

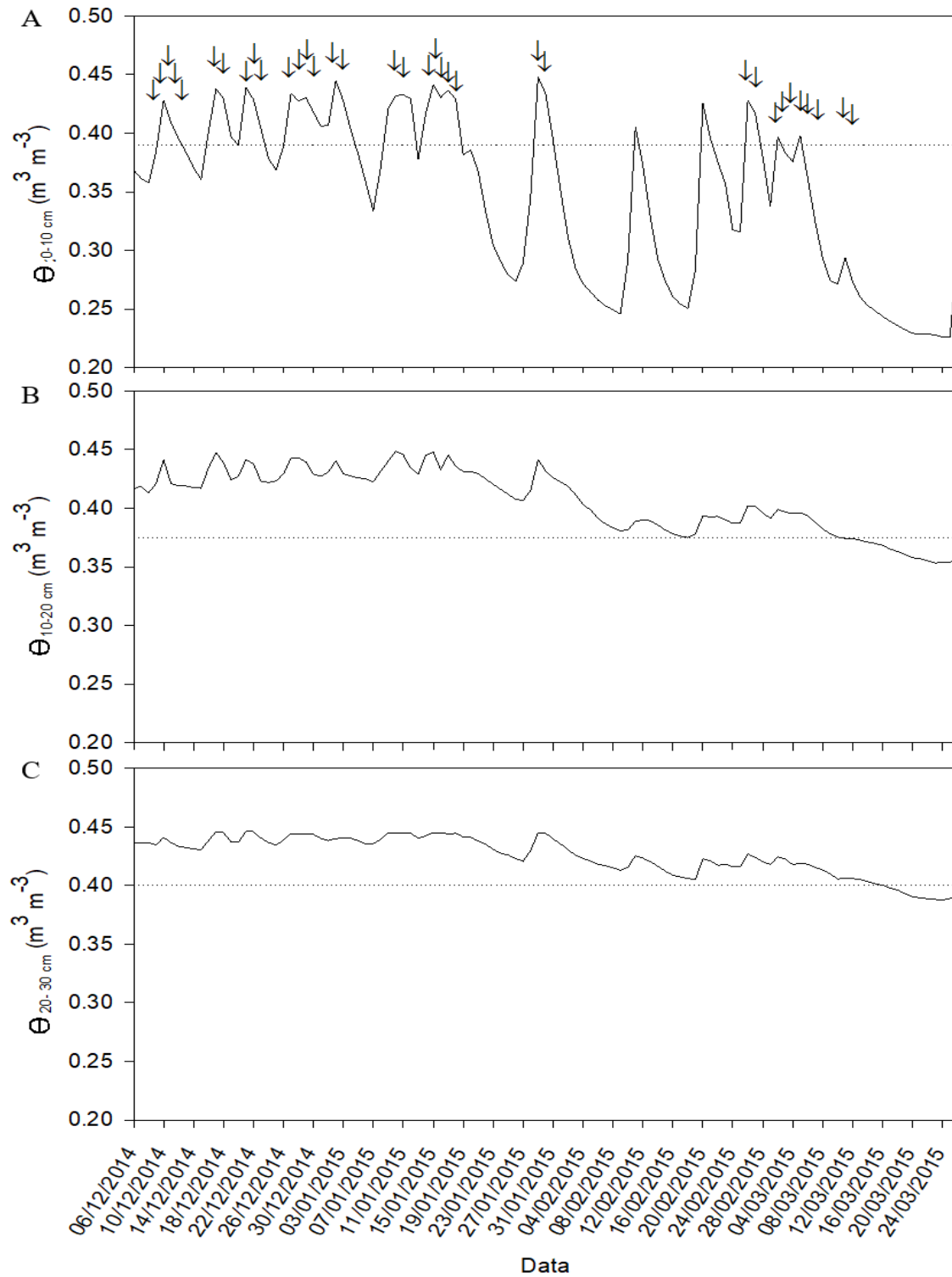
Considerando, por exemplo, que a umidade volumétrica medida pelo TDR foi de 0,39 a 0,29 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ do dia 05 ao dia 08 de março (Figura 2A), indica a presença de outros processos de retirada de água além da evapotranspiração. Provavelmente isso ocorra por drenagem profunda, tendo em vista que, embora em menor magnitude, também houve redução da umidade do solo nas camadas de 10-20 cm (Figura 2B) e 20-30 cm (Figura 2C) e manutenção a partir da profundidade de 30 cm. Essa tendência também foi verificada em outras sequencias de dias após a ocorrência de chuvas. De qualquer forma, essa baixa acurácia verificada influenciaria especialmente nos resultados de excesso hídrico para os estágios finais de desenvolvimento da soja, os quais apresentam importância relativa menor em relação às fases vegetativa e reprodutiva da soja (BEUTLER et al., 2014).

Tabela 2. Umidade do solo diária medida* ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), chuva (mm) e dias com excesso hídrico (EXC), considerando a capacidade de armazenamento de água (CAD) do solo calculada para a profundidade de 30 cm (CAD_{30}), utilizando a precipitação medida (PM) e a precipitação efetiva calculada (PE), para dias em que houve excesso hídrico ao longo do ciclo da soja em um Planossolo Háplico, no ano agrícola 2014/2015, em Santa Maria, RS.

Data	Umidade do solo* ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	PM (mm)	CAD_{30} PM	CAD_{30} PE
09/12/2014	-	12,6	EXC	-
10/12/2014	0,427	22,6	EXC	EXC
11/12/2014	0,409	0	EXC	EXC
12/12/2014	0,395	0	EXC	EXC
13/12/2014	-	0	EXC	EXC
16/12/2014	0,401	0,5	-	-
17/12/2014	0,437	29,1	EXC	EXC
18/12/2014	0,429	0	EXC	EXC
19/12/2014	0,397	0	-	-
21/12/2014	0,438	71,6	EXC	EXC
22/12/2014	0,428	21,2	EXC	EXC
23/12/2014	0,403	0	EXC	EXC
27/12/2014	0,433	101,1	EXC	EXC
28/12/2014	0,427	0,7	EXC	EXC
29/12/2014	0,430	3,5	EXC	EXC
30/12/2014	0,418	0	EXC	-
31/12/2014	0,405	0	-	-
01/01/2015	0,406	0	-	-
02/01/2015	0,444	23,8	EXC	EXC
03/01/2015	0,427	0	EXC	EXC
04/01/2015	0,403	0	-	-
09/01/2015	0,421	18,6	-	-
10/01/2015	0,432	14,7	EXC	-
11/01/2015	0,432	13	EXC	EXC
12/01/2015	0,429	0,1	-	-
14/01/2015	0,417	19,8	EXC	EXC
15/01/2015	0,441	8,8	EXC	-
16/01/2015	0,430	0	EXC	-
17/01/2015	0,436	10,5	EXC	EXC
18/01/2015	0,428	0	EXC	-
29/01/2015	0,448	33,8	EXC	-
30/01/2015	0,433	3,4	EXC	-
31/01/2015	0,394	0	-	-
11/02/2015	0,405	31,4	-	-
20/02/2015	0,425	29,4	-	-
21/02/2015	0,395	0,1	-	-
26/02/2015	0,427	16,8	EXC	-
27/02/2015	0,416	4,6	EXC	-
02/03/2015	0,397	15,8	EXC	-
03/03/2015	-	0	EXC	-
04/03/2015	-	0	EXC	-
05/03/2015	0,398	5,9	EXC	-
06/03/2015	-	0	EXC	-
07/03/2015	-	0	EXC	-
11/03/2015	-	9	EXC	-
12/03/2015	-	0	EXC	-

(*) Umidade do solo determinada a partir de dados medidos por Gubiani et al. (2018) na camada de 0-10 cm; (-) dias sem ocorrência de excesso hídrico.

Figura 2. Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) ao longo do ciclo da cultura da soja e da microporosidade (θ_{mic}) em Planossolo Háplico, nas camadas de 0-10 cm (A), 10-20 cm (B) e 20-30 cm (C). *As setas representam os dias com excesso hídrico obtidos pela nova metodologia de cálculo do balanço hídrico sequencial.



A drenagem superficial lateral também pode ter contribuído para essa redução da umidade volumétrica na camada superficial. A utilização de drenos superficiais é importante para o escoamento da água em terras baixas, porém as camadas logo abaixo desses drenos permanecem saturadas por um tempo bem maior devido à condutividade hidráulica ser extremamente limitada em profundidade para esses solos (PINTO; LAUS NETO; PAULETTO, 2004). Durante a maior parte do ciclo de desenvolvimento da soja, o conteúdo volumétrico de água no solo ficou acima do θ_{mic} , os quais foram 0,375 e 0,40 $m^3 m^{-3}$, respectivamente, para as camadas de 10-20 e 20-30 cm. Em apenas 16 dias na camada de 10-20 cm e 10 dias na camada de 20-30 cm o conteúdo de água no solo esteve abaixo do θ_{mic} , ficando sempre acima de 0,35 e 0,38 $m^3 m^{-3}$, respectivamente. Além disso, após a ocorrência de elevada precipitação pluviométrica o lençol freático ficou mais próximo da superfície por um período de tempo considerável (GUBIANI et al., 2018).

De maneira geral, a partir da infiltração da água no solo espera-se que a saturação do perfil ocorra das camadas mais profundas para as superficiais. O uso da CAD₂, na nova metodologia proposta, considerou o conteúdo de água contido nos macroporos apenas da camada de 0-10 cm como se essa fosse a primeira a saturar. Por outro lado, essa camada é a primeira a drenar após a saturação do solo. Tendo em vista que em condições de terras baixas as camadas de solo mais profundas estão próximas da saturação na maior parte do tempo (Figura 1B, 1C) esse erro se torna muito pequeno.

CONCLUSÕES

A CAD calculada para a profundidade do sistema radicular de 30 cm é a mais precisa em relação a profundidades inferiores para a determinação do excesso hídrico através do cálculo do BHS para a cultura da soja em terras baixas.

A metodologia de cálculo da precipitação efetiva mostra-se inadequada para uso em terras baixas, os quais apresentam características distintas das condições de terras altas.

A metodologia do tempo de drenagem dos macroporos foi representativa da condição de excesso hídrico obtida em condição de campo, sendo recomendada para a utilização em estudos relacionados ao excesso hídrico em terras baixas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEUTLER, A. N. et al. Soil hydric excess and soybean yield and development in Brazil. **Australian Journal of Crop Science**. v. 8, n. 10, p. 1461-1466, 2014.

BORTOLUZZI, M. P. **Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico para a cultura da soja em planossolos da região central do Rio Grande do Sul**. 2015. 87f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

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

FIETZ, C. R.; RANGEL, M. A. S. Época de semeadura da soja para a região de Dourados - MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 666-672, 2008.

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

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. **Soil Science Society of America Journal**. v. 32, p. 180-186, 1968.

GUBIANI, P. I. et al. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1-14, 2018.

HANSEL, D. S. S. **Resposta da soja à aplicação de nitrogênio em sistemas de implantação em ambiente de várzea e modificações anatômicas em condições de hipoxia**. 2015. 81f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MARCHESAN, E. et al. **Sistema de implantação e seus efeitos na resistência mecânica do solo à penetração de raízes e na produtividade de soja em área de várzea**. In: VIII congresso brasileiro de arroz irrigado, 2013, Santa Maria. v. 02. p. 120-1123.

OTTONI FILHO, T. B. et al. Revisiting field capacity (fc): variation of definition of fc and its estimation from pedotransfer functions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1750-1764, 2014.

PINTO, L. F. S.; LAUS NETO, J. A.; PAULETTO, E. A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JR., A. M., eds. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 75-95.

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

ROCHA, T. S. M. **Desempenho da soja cultivada em solo hidromórfico e não hidromórfico com e sem irrigação suplementar**. 2016. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

SARTORI, G. M. S. et al. Soil tillage systems and seeding on grain yield of soybean in lowland area. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 492-498, 2016.

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

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

VAN LIER, Q. J. Field capacity, a valid upper limit of crop available water? **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 214–220, 2017.

VANTOAI, T. T. et al. Flooding tolerance of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] germplasm from southeast asia under field and screen-house environments. **The Open Agriculture Journal**, v. 4, p. 38-46, 2010.

WALTER, L. C. et al. Adaptação e avaliação do modelo infocrop para simulação do rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 510-521, 2012.

4. CAPÍTULO III - RISCO DE OCORRÊNCIA DE EXCESSO E DÉFICIT HÍDRICO NA SOJA EM TERRAS BAIXAS NA METADE SUL DO RIO GRANDE DO SUL

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi determinar os valores médios e a probabilidade de ocorrência de excesso e déficit hídrico na soja em terras baixas das bacias hidrográficas dos rios Vacacaí e Piratini, em função da data de semeadura na Metade Sul do Rio Grande do Sul. O desenvolvimento da soja foi simulado considerando-se três conjuntos de cultivares de grupo de maturidade relativa (GMR) entre 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com intervalos entre as datas de semeadura de 10 ou 11 dias compreendidas entre 21 de setembro e 31 de dezembro. Foram utilizados dados meteorológicos diários de 1971 a 2017 da estação agroclimatológica de Pelotas e de 1968 a 2017 da estação climatológica principal de Santa Maria. A partir do cálculo da evapotranspiração e do balanço hídrico sequencial diário da cultura foram obtidos o excesso hídrico (dias) e o déficit hídrico (mm). Os dados de déficit e excesso hídrico nos subperíodos e no ciclo para cada GMR foram demonstrados através da análise exploratória BoxPlot e submetidos à análise de variância e comparação de médias através do teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro. Os dados também foram submetidos à análise de distribuição de probabilidades, em que foram testados os ajustes das fdps exponencial, gama, lognormal, normal e weibull, utilizando os testes de aderência qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 10%. O risco climático de ocorrência de excesso hídrico no ciclo da soja diminui ao longo do calendário de semeadura. No estabelecimento da cultura da soja, não ocorre excesso hídrico em cerca de um a cada quatro anos, mas essa frequência tende a reduzir a partir de meados de novembro. Para o período entre o início da floração (R1) e início do enchimento de grãos (R5) a frequência média é de dois a cada três anos. Há pouca diferença de risco de ocorrência de excesso hídrico entre as datas de semeadura para o subperíodo R1-R5, porém há uma redução a partir de 11 de novembro para o estabelecimento inicial da soja. O déficit hídrico é menor na região de Pelotas do que em Santa Maria. Semeaduras realizadas a partir de 11 de novembro e 01 de novembro apresentam o menor risco de ocorrência de déficit hídrico ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja em Santa Maria e Pelotas, respectivamente. Para o subperíodo R1-R5, o risco de déficit hídrico é decrescente a partir do início de novembro.

PALAVRAS-CHAVE: *Glycine max*. Análise numérica. Balanço hídrico. Época de semeadura.

RISK OF OCCURENCE OF WATER EXCESS AND DEFICIT FOR SOYBEANS IN PLANOSOLS OF THE SOUTHERN HALF OF RIO GRANDE DO SUL

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the mean values and probability of water excess and deficit in soybean in lowlands of the Vacacaí and Piratini river basins as a function of the sowing date in the southern half of Rio Grande do Sul. Soybean development was simulated considering three sets of cultivars of relative maturity groups (RMG) between 5.9-6.8, 6.9-7.3 and 7.4-8.0, with intervals of ten or 11 days between the sowing dates comprised between September 21 and December 31. Daily meteorological data were used from 1971 to 2017 obtained from the Pelotas agroclimatological station and from 1968 to 2017 from the main climatological station of Santa Maria. Water excess (days) and water deficit (mm) were obtained from the calculation of evapotranspiration and daily sequential crop water balance.

Data of deficit and water excess in the subperiods and cycle for each RMG were demonstrated through the BoxPlot exploratory analysis and subjected to analysis of variance and mean comparison by the Scott-Knott test at 5% error probability. Data were also subjected to the probability distribution analysis, in which the exponential, gamma, lognormal, normal and weibull probability density function (pdf) adjustments were tested using Chi-square and Kolmogorov-Smirnov adhesion tests, with a 10% significance level. The climatic risk of occurrence of water excess in the soybean cycle decreases throughout the sowing date calendar. There is no water excess in about one every four years during the soybean crop establishment, but this frequency tends to reduce starting from mid-November. The mean frequency of water excess is two every three years for the period between the beginning of flowering (R1) and beginning of grain filling (R5). There are small differences in the risk of occurrence of water excess between the sowing dates of the R1-R5 subperiod, but there is a reduction starting from November 11 for the soybean initial establishment. The water deficit is lower in the Pelotas region than in Santa Maria. Sowings performed from November 11 and November 1st present the lowest risk of occurrence of water deficit throughout the soybean cycle in Santa Maria and Pelotas respectively. For de the subperiod R1-R5, the risk of water deficit decreases from the beginning of November.

KEY WORDS: *Glycine max*. Numerical analysis. Water balance. Sowing date.

INTRODUÇÃO

A soja é a oleaginosa de maior expressão econômica e social no Brasil, o que favorece sua expansão. Nos últimos anos, no Rio Grande do Sul (RS), essa expansão acentuou-se para as áreas de terras baixas, antes quase exclusivamente utilizados com o cultivo de arroz irrigado e com a pecuária, principalmente por ser uma alternativa de rotação para o controle das plantas daninhas, assim como pela condição econômica favorável que atualmente a cultura tecnificada da soja propicia. A maioria dos solos que ocorrem nessas áreas pertencem à classe dos Planossolos, geralmente háplicos, os quais apresentam horizonte B plânico, com alto teor de argila e alta densidade do solo, tornando-os imperfeitamente drenados (STRECK et al., 2008).

Mundstock et al. (2017) apontam uma série de etapas para viabilizar a lavoura de soja em terras baixas, as quais vão desde a mudança na gestão da lavoura, drenagem da área até a fertilidade do solo. Dentre essas, a etapa da definição da época de semeadura não acarreta custos ao produtor e definem diversas práticas a serem adotadas durante o ciclo. Além do potencial produtivo ser modificado em função da data de semeadura (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2006) outros fatores restritivos podem ser alterados, dentre os quais o excesso e o déficit hídrico. Desta forma, estudos voltados para essa temática são extremamente importantes no intuito de garantir o retorno ao investimento e gerar lucro aos produtores.

Época de semeadura e o potencial de produtividade da soja

O potencial de rendimento de grãos da cultura da soja está atrelado à época de semeadura, sendo importante defini-la adequadamente (BOYER et al., 2015; BATTISTI et al., 2018; SILVA et al., 2018). A época de semeadura influencia também na disponibilidade de água ao longo do ciclo da soja e juntamente com práticas de manejo insuficientes, constituem os dois principais fatores responsáveis pela lacuna de produtividade da soja no Brasil (SENTELHAS et al., 2015; BATTISTI et al., 2018).

O fotoperíodo é um dos principais fatores que podem afetar, mesmo que indiretamente, o rendimento de grãos, pois, juntamente com a temperatura do ar, são os principais determinantes do desenvolvimento das plantas de soja. A função de resposta do desenvolvimento é decrescente à medida que o fotoperíodo aumenta, ou seja, a taxa de desenvolvimento da soja é reduzida (SETIYONO et al., 2007). Trentin et al. (2013) verificaram redução na duração do ciclo de desenvolvimento com o avanço da data de semeadura, atribuindo essa redução principalmente ao efeito do fotoperíodo mais curto a que as plantas são submetidas em semeaduras mais tardias (dezembro). Em semeaduras realizadas fora do período recomendado (setembro, janeiro e fevereiro), Zanon et al. (2015a) verificaram redução da duração da fase vegetativa em função da exposição a fotoperíodos mais curtos, principalmente em cultivares de hábito de crescimento determinado, especialmente as mais antigas, por não possuírem o gene de juvenilidade.

De maneira geral, verifica-se uma redução do potencial de produtividade em cultivos de soja semeados após o dia 4 de novembro, o qual é influenciado principalmente pelo suprimento de água e pelo coeficiente fototérmico (Q), que por sua vez é obtido a partir da razão entre a radiação solar incidente e a temperatura média do ar (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016). A produtividade da cultura da soja e o Q estão diretamente relacionados, principalmente entre o estágio R3 e R7 (Q_{R3-R7}) da cultura da soja (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016). Entretanto, o Q_{R3-R7} tende a diminuir à medida que se avança no calendário de semeadura, o que reduz o potencial de rendimento da soja. Porém, nota-se que a resposta ao Q_{R3-R7} é mais pronunciada em condição irrigada do que não irrigada, o que demonstra a influência da disponibilidade hídrica na produtividade da cultura. Assim, a variação de outros fatores, tais como o excesso e o déficit hídrico também devem ser considerados para uma definição mais adequada do momento de semeadura.

Apesar desses resultados obtidos por Zanon; Streck e Grassini (2016) serem basicamente voltados para condições de terras altas, espera-se que a influência da ocorrência

de estresse hídrico, por exemplo, em áreas de Planossolos de terras baixas não seja muito diferente, podendo inclusive ser intensificada. Devido às características hidromórficas dos solos de terras baixas e por sua baixa capacidade de armazenamento de água, as plantas cultivadas nesse ambiente são frequentemente submetidas a períodos de estresse hídrico (STRECK et al., 2008; ROCHA et al., 2017), causando redução significativa da produtividade. Além disso, o ciclo da cultura em terras altas e em terras baixas é praticamente o mesmo (ZANON et al., 2015b). Cabe ao produtor lançar mão de estratégias de manejo para mitigar esses efeitos, como por exemplo, o uso do sistema plantio direto e manutenção da palhada sobre a superfície do solo visando aumentar a disponibilidade de água para as plantas (RIBEIRO et al., 2016) e o rompimento da camada superficial compactada visando melhorar o processo de drenagem (SARTORI et al., 2016).

Déficit hídrico e seus efeitos ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja

A disponibilidade hídrica adequada ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja, salvo em cultivos irrigados, é obtida através de uma distribuição uniforme da chuva nesse período, o que raramente ocorre tendo em vista a variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial. Segundo Zanon; Streck e Grassini (2016) uma lavoura de soja de alto potencial de produtividade necessita cerca de 800 mm de água ao longo do ciclo para expressá-lo. Assim, devido a distribuição irregular das chuvas, são frequentes os períodos em que as plantas são submetidas à deficiência hídrica no estado do Rio Grande do Sul. A precipitação pluviométrica média acumulada nos meses de outubro a março é de 833 mm, mas com desvio padrão mensal de 74 a 92 mm, em Santa Maria (BURIOL et al., 2006) e de 670 mm em Pelotas, conforme o banco de dados utilizado nesse trabalho.

O déficit hídrico condiciona a redução do potencial osmótico e total das folhas emitidas, assim como da condutância estomática e transpiração (SIONIT; KRAMER, 1977; VILLALOBOS-RODRIGUEZ; SHIBLES, 1985; WIJEWARDANA et al., 2018), reduzindo o turgor celular e a taxa de crescimento. Dessa forma, também há redução do índice de área foliar e da altura das plantas (ECK; MATHERS; MUSICK, 1987).

De maneira geral, o déficit hídrico é prejudicial em qualquer estágio de desenvolvimento das plantas em maior ou menor escala, afetando os componentes de produtividade primários e secundários. O conteúdo de água no solo deve ser adequado, por exemplo, para promover uma alta taxa de germinação, visando estabelecer uma população de plantas condizente com o nível de alta produtividade que se deseja obter. O arranjo de plantas

influencia diretamente no número de legumes por área, outro importante componente de produtividade (ZANON et al., 2018, p. 82), o qual também depende do adequado suprimento de água e da radiação solar na fase reprodutiva para a produção e fixação das flores. O número e principalmente o peso de grãos de soja podem ser reduzidos substancialmente em caso de déficit hídrico durante o enchimento de grãos (SIONIT; KRAMER, 1977). Nesse caso, esse subperíodo pode ter sua duração reduzida com senescência precoce de folhas e prejudicar a translocação de fotoassimilados para os grãos, os quais podem ter o tamanho reduzido (DE SOUZA; EGLI; BRUENING, 1997; WIJEWARDANA et al., 2018; ZANON et al., 2018, p. 85) e com menor teor de óleo (ROTUNDO; WESTGATE, 2010).

A intensidade de redução do rendimento de grãos depende do estágio, da magnitude e do período em que o estresse ocorre, sendo expressa pelo fator de resposta de produtividade (Ky) da cultura (DOORENBOS; KASSAM, 1979). O adequado suprimento de água durante o ciclo da cultura e principalmente na fase reprodutiva é muito importante para a obtenção de altas produtividades. Karam et al. (2005) em experimento realizado no Líbano, verificaram que cerca de 65% da água consumida durante o ciclo da soja ocorre entre os estágios R3-R5. Quando as plantas foram submetidas a duas semanas de déficit hídrico no estágio R5 houve redução do rendimento de grãos. Porém, isso não foi verificado quando o estresse foi aplicado a partir do estágio R2, o que evidencia um efeito compensatório entre os componentes de produtividade da soja (KARAM et al., 2005).

Eck; Mathers e Musick (1987) verificaram redução do rendimento de grãos de 9 a 13% submetendo as plantas ao déficit hídrico a partir do estágio R1 aos estágios R2 e R3. Porém, quando o estresse foi aplicado entre os estágios R5 e R6, o rendimento de grãos foi reduzido de 15% a 46% no ano em que houve maior estresse devido à menor precipitação pluviométrica no período. Assim, a redução na fixação de flores ocasionada pelo déficit hídrico próximo do início do florescimento (R1) pode ser compensada posteriormente com o aumento do peso de sementes. Por outro lado, quando o estresse ocorre nos estágios posteriores, a compensação para o abortamento de legumes e redução do peso de grãos é atenuada (ECK; MATHERS; MUSICK, 1987). Tendência semelhante foi observada por Andriani et al. (1991) para uma cultivar de tipo de crescimento indeterminado na Argentina, em que não houve diferença de produtividade entre as plantas submetidas ao déficit hídrico entre os estágios R1 e R4 e a testemunha sem déficit hídrico. Porém, houve redução da produtividade quando aplicado entre R4 e R6, devido principalmente à redução do número de legumes.

O período de sobreposição entre as fases vegetativa e reprodutiva é maior para as cultivares de hábito de crescimento indeterminado, em que a emissão de nós cessa aproximadamente no início do enchimento de grãos (R5) (ZANON et al., 2016). Assim, verifica-se maior tolerância a curtos períodos de déficit hídrico, tornando as cultivares do tipo indeterminado mais estáveis (ZANON et al., 2018, p. 58). Essa estabilidade e maior potencial de produtividade sob condições de estresse também é reportada por Wijewardana et al. (2018) em que as plantas foram submetidas a diferentes níveis de déficit hídrico a partir do florescimento até a maturação fisiológica, verificando-se maior número de nós e ramificações para a cultivares de tipo de crescimento indeterminado, o que contribuiu para um maior número de legumes e de grãos.

Villalobos-Rodriguez e Shibles (1985) verificaram maior capacidade de recuperação das cultivares de tipo de crescimento indeterminado em relação as do tipo determinado, quando submetidas ao déficit hídrico antes do florescimento e em florescimento pleno (R2) devido ao maior número de legumes por nó e maior índice de área foliar. Por outro lado, existe a hipótese de que cultivares de tipo de crescimento semi-determinado são mais tolerantes ao déficit hídrico em relação às do tipo indeterminado, tendo em vista que houve maior fixação de legumes proporcionalmente ao número de flores produzidas e que isso está associado à menor competição por fotoassimilados com a parte vegetativa (NEYSHABOURI; HATFIELDT, 1986).

O uso de cultivares com maior tolerância ao déficit hídrico pode ser uma alternativa para diminuir as perdas de produtividade. Oya et al. (2004) verificaram que cultivares mais tolerantes ao déficit hídrico apresentam alta taxa de crescimento durante a ocorrência do estresse nos estágios reprodutivos. Essa característica também é importante antes do florescimento da soja, viabilizando um adequado crescimento vegetativo. Porém, a tolerância ao déficit hídrico também está relacionada ao crescimento radicular (HIRASAWA et al., 1994; SADRAS; CALVIÑO, 2001; BATTISTI; SENTELHAS, 2017).

A alocação de cultivares de alto potencial produtivo deve ser preferida em condições de adequado suprimento de água, pois podem reduzir substancialmente a produtividade em caso de déficit hídrico (BATTISTI; SENTELHAS, 2015). Esses autores recomendam que em situações em que a evapotranspiração relativa é menor que 60%, devem ser preferidas cultivares de alta tolerância ao déficit hídrico.

Excesso hídrico e seus efeitos para a soja ao longo do ciclo de desenvolvimento

O excesso hídrico se estabelece pela ocorrência de elevadas precipitações, irrigações excessivas, drenagem deficiente do solo ou pela combinação entre estes fatores. A partir do encharcamento, o lençol freático se eleva e permanece próximo à superfície por períodos relativamente longos. Os sintomas ocasionados pelo excesso hídrico nas plantas vão desde o fechamento estomático, redução da taxa de fotossíntese, amarelecimento e o murchamento de folhas, podendo evoluir para senescência e abscisão foliar (OOSTERHUIS et al., 1990; SCHÖFFEL, 1997).

Em condições normais no ambiente edáfico, as raízes estão em contato com o oxigênio a uma pressão parcial semelhante à encontrada na atmosfera (SAIRAM et al., 2008). Entretanto, quando há excesso hídrico no solo ocorre a redução na quantidade de oxigênio (hipoxia) (LINKEMER; BOARD; MUSGRAVE, 1998), ou até mesmo anoxia, quando o oxigênio se torna ausente (SAIRAM et al., 2008). Além disso, a soja também apresenta sensibilidade a elevada concentração de CO₂ na zona radicular, que ocasiona atrofia 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).

Os efeitos prejudiciais para a soja iniciam logo após a redução do oxigênio no solo em que o metabolismo anaeróbico provoca redução na produção de ATP e formação de espécies reativas de oxigênio submetendo as plantas a estresse oxidativo (GARG; MANCHANDA, 2009). No entanto, a intensidade de dano é dependente do período em que as plantas ficam submetidas à condição de excesso hídrico e do estágio de desenvolvimento em que se encontram no momento do estresse. A emergência é prejudicada pela rápida embebição de água pela semente que ocasiona ruptura da membrana das células do embrião, redução da respiração aeróbica da semente e produção de substâncias tóxicas (TIAN; NAKAMURA; KOKUBUN, 2005), o que reduz a germinação e é prejudicial ao desenvolvimento da plântula (WUEBKER; MULLEN; KOEHLER, 2001; KIRKPATRICK; ROTHROCK; RUPE, 2006).

Considerando a fase vegetativa da cultura da soja, verifica-se uma maior susceptibilidade ao excesso hídrico nos estágios iniciais de desenvolvimento, tais como V2 e V3. Em condições de sete dias de alagamento Linkemer; Board e Musgrave (1998) verificaram maiores reduções nos componentes de produtividade quando o estresse ocorre em V2 do que nos demais estágios vegetativos. Os efeitos mais pronunciados no início da fase vegetativa podem estar relacionados à fixação biológica de nitrogênio através da simbiose com bactérias do gênero *Rizhobium*, as quais possuem elevada demanda de oxigênio e que em condições de alagamento tem fixação de nitrogênio reduzida (BACANAMWO; PURCELL, 1999a). Em trabalho realizado por Board (2008), a redução da produtividade foi atrelada ao

decréscimo da concentração de nitrogênio nas folhas. 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.

Kirkpatrick; Rothrock e Rupe (2006) não observaram redução da população de plantas submetendo-as a sete dias de excesso hídrico a partir do estágio V4, sendo que houve redução da massa de plantas em apenas um dos três anos de estudo. Essa tolerância ao excesso hídrico possui relação com modificações morfofisiológicas em resposta ao alagamento, como o alargamento da base do caule, formação de aerênquima e crescimento de raízes laterais e adventícias, fazendo com que haja melhor recuperação do suprimento de oxigênio para as raízes (BACANAMWO; PURCELL, 1999b; PIRES; SOPRANO; CASSOL, 2002; SCHÖFFEL, 1997; THOMAS; GUERREIRO; SODEK, 2005),

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. A redução da população de plantas também pode estar relacionada à ocorrência de doenças de solo, ocasionadas pelos fungos *Phytophthora sojae*, *Pythium* spp e *Rhizoctonia solani* (MUNDSTOCK et al., 2017, p. 34). Esses patógenos são de difícil controle principalmente em condições de alagamento, em que medidas preventivas precisam ser adotadas em conjunto, tendo em vista que apenas o tratamento de sementes geralmente não é suficiente (WU et al., 2017).

Griffin e Saxton (1988) observaram redução da altura da planta quando o excesso hídrico ocorre no período vegetativo, porém há uma compensação através de um maior número de ramificações. Por outro lado, verificaram que o número de legumes por planta, o número de sementes por legume e o rendimento de grãos são mais restringidos quando o excesso hídrico ocorre na fase reprodutiva em relação à vegetativa e por um período maior que dois dias (GRIFFIN; SAXTON, 1988).

De maneira geral, diversos trabalhos apontam que as maiores perdas ocasionadas pelo excesso hídrico são verificadas quando este ocorre durante a fase reprodutiva da cultura provocando redução da matéria seca e do rendimento de grãos (SCOTT et al., 1989; LINKEMER; BOARD; MUSGRAVE 1998; RHINE et al., 2010). Schöffel et al. (2001) observaram que plantas de soja expostas a dez dias de excesso hídrico no estágio R4 obtiveram rendimento de grãos 37% menor em relação àquelas submetidas a 15 dias no estágio V6.

Assim, 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. 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.

Simulação do desenvolvimento da soja associado ao balanço hídrico sequencial

O ciclo da soja é basicamente dividido em uma fase vegetativa, a qual inicia a partir da emergência e se estende até o aparecimento da última folha trifoliolada emitida e outra fase reprodutiva, que inicia no momento da abertura da primeira flor na haste principal da planta (R1), passa pelo início da formação de vagens (R3), início do enchimento de grãos (R5) e maturação fisiológica (R7) (FEHR; CAVINESS, 1977).

Apesar de outros elementos apresentarem menor importância no desenvolvimento da soja, como por exemplo, a deficiência hídrica, os principais fatores abióticos que influenciam o desenvolvimento da cultura da soja são a temperatura do ar e o fotoperíodo. A temperatura do ar contribui positivamente para o desenvolvimento da planta na faixa compreendida entre a temperatura base inferior e superior (SETIYONO et al., 2007). Tendo em vista que a soja é uma planta de dias curtos, há um aumento da fase vegetativa quando submetida a condições de fotoperíodo longo, pois há uma redução da taxa de desenvolvimento.

O desenvolvimento da soja, assim como o crescimento, está bastante atrelado ao hábito de crescimento das cultivares. Nos últimos anos, houve um aumento expressivo na utilização de cultivares indeterminadas, as quais possuem um período de sobreposição entre a fase vegetativa e reprodutiva e o crescimento em estatura e emissão de nós entre R1 e R5 maiores (ZANON et al., 2016). Entretanto, há pouca diferença no desenvolvimento da soja em função do cultivo em terras altas ou em terras baixas (ZANON et al., 2015b).

A simulação do desenvolvimento da cultura em várias épocas associada ao cálculo do balanço hídrico sequencial (BHS) diário permite obter dados de excesso e déficit hídrico em um número considerável de anos agrícolas. Quando esses resultados são associados à análise de probabilidade é possível obter a magnitude do risco para diferentes datas de semeadura e subperíodos de desenvolvimento da cultura.

O BHS contabiliza as entradas e saídas de água em um determinado volume controle de solo, em um determinado tempo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). A chuva e a evapotranspiração são as principais fontes de entrada e saída de água, respectivamente. Utilizando o BHS, Mota et al. (1996) demonstraram as necessidades de

irrigação em diferentes épocas de semeadura para oito locais do Rio Grande do Sul. Trabalho semelhante foi realizado por Trentin (2013), em que determinou a frequência e a lâmina de irrigação necessária para diferentes solos e datas de semeaduras. Cunha et al. (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.

Justificativa e objetivo

Tendo em vista que a sustentabilidade do sistema de produção de uma cultura, isto é, sua capacidade de permanecer no mercado, preservar o ambiente e obter alta produtividade é frequentemente ameaçada por fatores de risco, tornam-se necessários estudos para buscar respostas ou técnicas adequadas para minimizá-los. Assim, tendo em vista os impactos negativos ocasionados tanto pelo déficit quando pelo excesso hídrico para a cultura da soja, torna-se importante gerar informações acerca do risco de ocorrência desses estresses ao longo do calendário de semeadura.

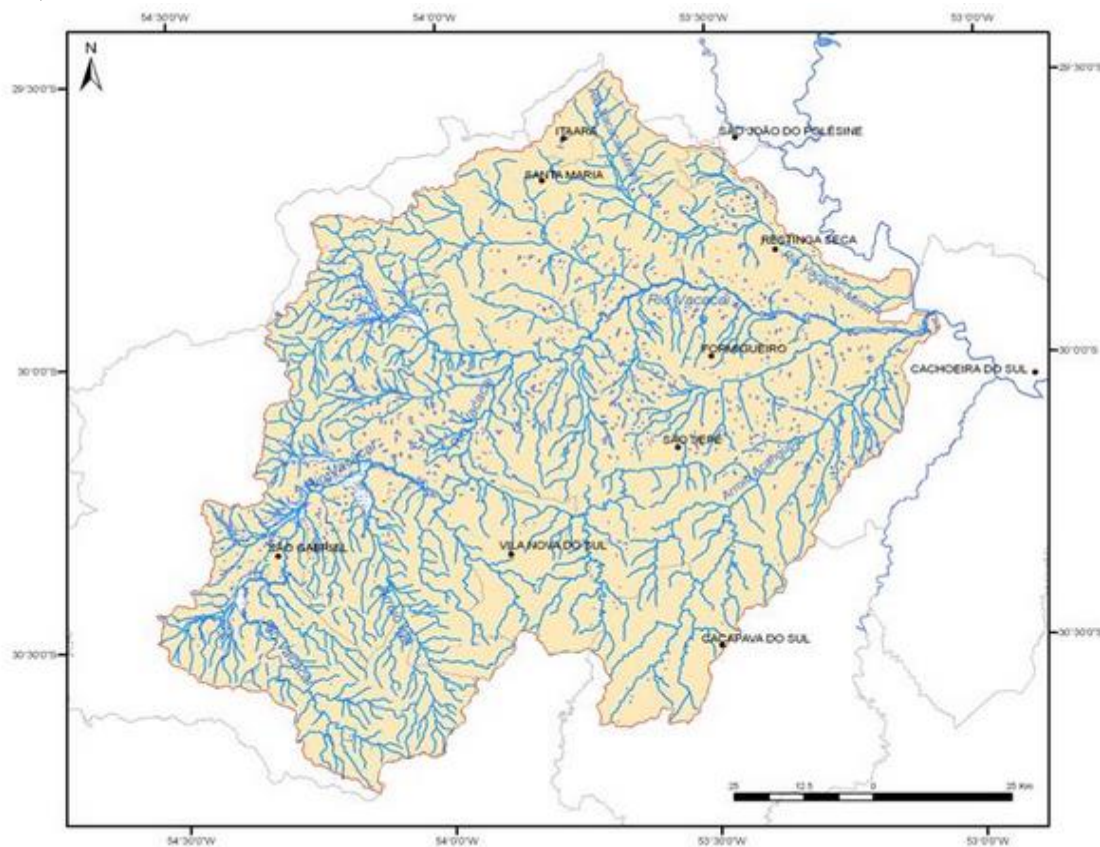
O objetivo desse trabalho foi determinar os valores médios, a variabilidade interanual e os riscos climáticos de ocorrência de excesso e déficit hídrico nos diferentes subperíodos de desenvolvimento da cultura da soja em função da data de semeadura, considerando a capacidade de armazenamento de água e as propriedades físicas dos Planossolos das bacias hidrográficas dos rios Vacacaí e Piratini na Metade Sul do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de abrangência do estudo compreende as bacias hidrográficas dos rios Vacacaí e Piratini, situados na Metade Sul do Rio Grande do Sul. A bacia hidrográfica do rio Vacacaí situa-se no centro-sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas 29°35' a 30°45' de latitude Sul e 53°04' a 54°34' de longitude Oeste, totalizando uma área de aproximadamente 11.000 km² (Figura 1).

O solo pertencente à Unidade de Mapeamento (UM) Vacacaí – Planossolo Háptico Eutrófico arênico - predomina em terras baixas nessa bacia hidrográfica e apresenta textura bastante arenosa, com espessura entre 50 e 100 cm do horizonte A ou A+E. Em regiões próximas ao município de São Gabriel também é frequente a ocorrência do Planossolo Háptico Eutrófico vertissólico (UM São Gabriel).

Figura 1. Localização da área de abrangência da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí. Fonte: SEMA, 2015.

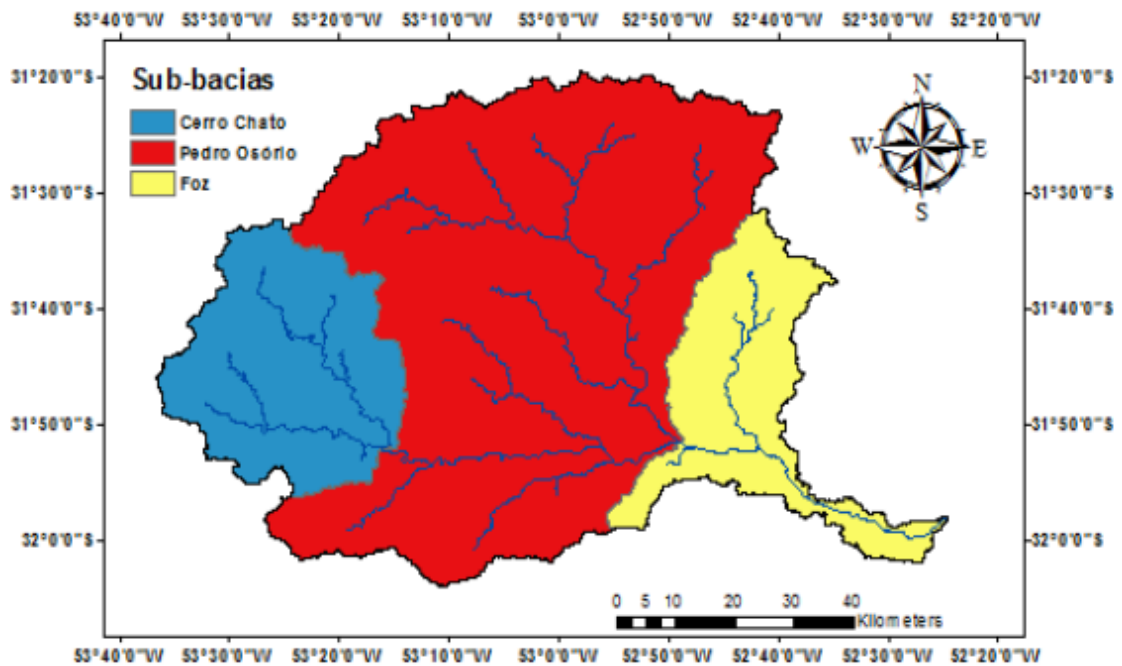


A bacia hidrográfica do rio Piratini situa-se no sul do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas $31^{\circ}30'$ e $32^{\circ}30'$ de latitude Sul e $53^{\circ}31'$ e $55^{\circ}15'$ de longitude Oeste, totalizando uma área de aproximadamente 8.750 km^2 abrangendo parcial ou totalmente os municípios de Arroio Grande, Capão do Leão, Herval, Morro Redondo, Pelotas, Pinheiro Machado e Piratini (Figura 2). Em terras baixas predominam os Planossolos Háplicos Eutróficos solódicos, pertencentes à UM Pelotas. Esses solos podem apresentar limitação quanto ao teor de sódio, principalmente quando utilizados com culturas de sequeiro (STRECK et al., 2008).

A simulação do desenvolvimento das plantas foi realizada para o período compreendido entre 21/set e 31/dez em sementeiras espaçadas de 10 ou 11 dias (Tabela 1), conforme metodologia proposta por Trentin et al. (2013), com a duração média dos subperíodos fenológicos e do ciclo apresentada no Capítulo 1. Para a maioria dos municípios que fazem parte dessas bacias hidrográficas, sementeiras antes de 01/out não estão incluídas no período recomendado do zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) para a soja

(BRASIL, 2018), mas optou-se por considerá-la no intuito de gerar informações, assim como em caso de futura inclusão.

Figura 2. Localização da área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Rio Piratini e suas sub-bacias. Adaptado de Munar e Collischonn (2017).



As cultivares foram agrupadas conforme seu grupo de maturidade relativa (GMR), formando-se três conjuntos com cultivares de GMR entre 5.9 e 6.8, 6.9 e 7.3 e 7.4 e 8.0. Essa amplitude de GMR foi utilizada pois representam a maioria das cultivares utilizadas atualmente em áreas de várzea, como por exemplo, NA 5909 RR e TECIRGA 6070 RR (GMR 6.3), BRS 246RR (GMR 7.2) e TEC 7849 IPRO (GMR 7.8).

Dados meteorológicos diários das variáveis necessárias (Tabela 2) para a simulação do desenvolvimento da cultura e para o balanço hídrico sequencial (BHS) foram coletados na Estação Agroclimatológica de Pelotas localizada no município de Capão do Leão, RS, Brasil (31°52'S, 52° 21'W à altitude de 13,2 m), de setembro de 1971 a junho de 2017 (com ausência de dados entre junho/1989 e agosto/1991) e na Estação Climatológica Principal de Santa Maria, RS, Brasil (29°43'23"S, 53°43'15"W, à altitude de 95 m), de setembro de 1968 a junho de 2017, o que totalizou 44 e 49 anos agrícolas, respectivamente.

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	GMR 6.9 – 7.3	GMR 7.4 – 8.0
21/09	1	1	1
01/10	2	2	2
11/10	3	3	3
21/10	4	4	4
01/11	5	5	5
11/11	6	6	6
21/11	7	7	7
01/12	8	8	8
11/12	9	9	9
21/12	10	10	10
31/12	11	11	11

Tabela 2. Variáveis meteorológicas obtidas do banco de dados da Estação Climatológica Principal de Santa Maria (SM) e da Estação Agroclimatológica de Pelotas.

Variável	SM	Pelotas	Descrição
T _{mn}	x	x	Temperatura mínima do ar (°C)
T _{mx}	x	x	Temperatura máxima do ar (°C)
T ₉	x		Temperatura do ar medida às 9 horas (°C)
T ₁₅	x		Temperatura do ar medida às 15 horas (°C)
T ₂₁	x		Temperatura do ar medida às 21 horas (°C)
UR ₉	x		Umidade relativa do ar das 9 horas (%)
UR ₁₅	x		Umidade relativa do ar das 15 horas (%)
UR ₂₁	x		Umidade relativa do ar das 21 horas (%)
UR _{med}		x	Umidade relativa do ar média diária (%)
U ₂	x	x	Velocidade do vento à 2 m acima do solo (Km·dia ⁻¹)
N	x	x	Insolação diária (h)
Prec	x	x	Precipitação pluviométrica diária (mm)
EvP	x	x	Evaporação diária medida no Evaporímetro de Piche (mm)

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, caracterizado como subtropical úmido, com verões quentes e sem estação seca definida (KUINCHTNER; BURIOL, 2001). O fotoperíodo diário para Pelotas e Santa Maria foi calculado conforme Kiesling (1982), considerando a duração do crepúsculo civil de 6° abaixo do plano do horizonte.

Com as variáveis meteorológicas obtidas (Tabela 2), foram calculadas as médias diárias de temperatura do ar e umidade relativa do ar (Santa Maria), 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, 2 e 3) 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 ($^{\circ}\text{C}$) – Santa Maria	$T_{med} = 0,2 \cdot (T_9 + T_{mx} + T_{mn} + 2 \cdot T_{21})$	1
Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) – Pelotas	$T_{med} = 0,5 \cdot (T_{mx} + T_{mn})$	2
Umidade relativa média do ar (%)	$UR_m = 0,25 \cdot (UR_9 + UR_{15} + 2 \cdot UR_{21})$	3
Pressão de saturação de vapor do ar (kPa)	$e_s = 0,6107 \cdot \exp\left(\frac{17,2694 \cdot T_{med}}{237,3 + T_{med}}\right)$	4
Pressão parcial de vapor do ar (kPa)	$e = 0,01 \cdot e_s \cdot UR_m$	5
Déficit de saturação do ar (kPa)	$d = e_s - e$	6
Tangente à curva de saturação ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T_{med} + 237,2)^2}$	7
Densidade de fluxo de radiação global incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)	$Rg = K_0 \downarrow \cdot (b_0 + b_1 \cdot n \cdot N^{-1})$	8
Balço de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)	$L^* = -\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{med} + 273)^4 \cdot [0,56 - 0,09 \cdot (e)^{0,5}] \cdot (0,1 + 0,9 \cdot n \cdot N^{-1})$	9
Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)	$Q^* = Rg \cdot (1 - r) + L^*$	10
Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1})	$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta (Q^* - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 \cdot d}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \cdot U_2)}$	11
Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1})	$ET_0 = \frac{(\Delta \cdot \gamma^{-1}) \cdot (Q^* \cdot L^{-1}) + (a + b \cdot \text{EvP}) \cdot d}{(\Delta \cdot \gamma^{-1}) + 1}$	12

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 ($0,0662 \text{ kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); G o fluxo de calor no solo; U_2 a velocidade média diária do vento a 2 m de altura ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); d o déficit de saturação do ar (kPa); b_0 e b_1 são os coeficientes mensais determinados por BURIOL et al. (2012) e por STEINMETZ; ASSIS; SOARES (1999); L o calor latente de evaporação ($2,46 \text{ MJ kg}^{-1}$); a e b são coeficientes ajustados por Alberto et al. (2002) para estimativa do fator aerodinâmico (E_a) a partir da evaporação do evaporímetro de Piche (EvP), com valores de 0,42 e 0,0245, respectivamente.

A densidade de fluxo da radiação solar global incidente (R_g) foi estimada através da equação de Ångström-Prescott (Equação 8): $R_g = K_o \downarrow (b_o + b_1 n N^{-1})$, 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_o e b_1 os coeficientes mensais ajustados para Santa Maria por Buriol et al. (2012) e para Pelotas por Steinmetz e Assis (1999), n o tempo de brilho solar direto (insolação diária), registrado em heliógrafo ($h d^{-1}$) e N é o comprimento máximo do dia ($h d^{-1}$), calculado em função da declinação solar e da latitude de Santa Maria e Pelotas. Utilizando-se da radiação solar global incidente (Equação 8) e do saldo de radiação de onda longa calculado pela equação de Brunt-Penman (Equação 9), foi obtido o saldo de radiação pela equação 10 (BERLATO; MOLION, 1981).

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) foi realizada com uso do método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) (Equação 11). A equação de Penman (12) (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).

Para o cálculo do BHS foi utilizada a metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), descrito por Pereira; Villa Nova e Sediyaama (1997). O roteiro de cálculo foi realizado através de algoritmos desenvolvidos no software Statistical Analysis System (SAS, 2001) por Nied (2003) e 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 evapotranspiração da cultura (ET_c) foi utilizada a ET_o calculada e os valores de 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) (SINCLAIR et al., 1991) e no subperíodo R5-R7 em função da soma térmica durante este subperíodo (MARTORANO et al., 2012). Para o subperíodo R7-R8 foi utilizado o valor de K_c de 0,50 (Tabela 4).

A Capacidade de armazenamento de água (CAD) do solo foi calculada para os dois Planossolos utilizando-se os valores de Microporosidade (Mic) e Ponto de Murcha Permanente (PMP) obtidos até a profundidade de 30 cm por Gubiani et al. (2018) e Ribeiro et al. (2016), para a UM Vacacaí e Pelotas, respectivamente. Considerou-se a CAD 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 0,30 m. A CAD_i e a CAD_f calculadas foram de 23 mm e de 66 e 63 mm para os solos da UM Vacacaí (GUBIANI et al., 2018) e UM Pelotas (RIBEIRO et al., 2016), respectivamente.

Para o BHS voltado para a obtenção do excesso hídrico foram utilizados dois valores de CAD conforme metodologia apresentada no Capítulo 2. Para o cálculo da CAD₂, foi realizado o somatório da CAD₁ ($\theta_{mic} - \theta_{pmp}$), considerando a camada de 0-30 cm com a macroporosidade ($CAD_{mac} = \theta_{sat} - \theta_{mic}$), determinada para a camada de 0-10 cm (Capítulo 2). Os valores calculados de CAD₂ inicial e final foram 29 e 72 mm para a UM Santa Maria (GUBIANI et al., 2018) e de 29 e 69 mm para a UM Pelotas (RIBEIRO et al., 2016), respectivamente.

As variáveis utilizadas para a análise do déficit e do excesso hídrico foram contabilizadas em mm e em dias, respectivamente. O déficit hídrico diário foi obtido pela diferença entre a evapotranspiração máxima (ET_m) e a evapotranspiração real (ET_r) da soja. O excesso hídrico, por sua vez, foi considerado quando o conteúdo de água no solo excedeu a

CAD e os dias em que os solos permaneceram nesta condição após a saturação (Capítulo 2). 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 magnitude da lâmina do excesso hídrico, tendo em vista que após o solo atingir a saturação, o efeito prejudicial para as plantas é semelhante.

Os dados de déficit hídrico (mm) e de dias de excesso hídrico para o ciclo e subperíodos resultantes do balanço hídrico para cada GMR foram demonstrados através da análise exploratória BoxPlot e submetidos à análise de variância e comparação de médias através do teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade de erro. As diferentes datas de semeadura foram consideradas como fonte de variação, sendo os anos agrícolas considerados como repetições. Foi realizada também a contabilização dos anos em que houve ocorrência de excesso hídrico em cada subperíodo de desenvolvimento da soja para as diferentes datas de semeadura.

Os dados também foram submetidos à análise de distribuição de probabilidades (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 as variáveis analisadas - excesso hídrico (dias) e déficit hídrico (mm) - foram contabilizadas 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.

Após o ajuste das fdps, foram calculados os valores de probabilidade. Com relação ao déficit hídrico, foram calculadas as probabilidades de ocorrência de pelo menos 50, 75, 100 e 150 mm durante o ciclo da soja e 5, 10, 25, 50 e 75 mm de déficit hídrico em cada subperíodo de desenvolvimento. Para o excesso hídrico (dias), determinaram-se as probabilidades de ocorrência valores iguais ou superiores a 25, 30, 35, 40 e 45 dias para o ciclo da soja e 2, 4, 8 e 12 dias de excesso hídrico para os subperíodos de desenvolvimento.

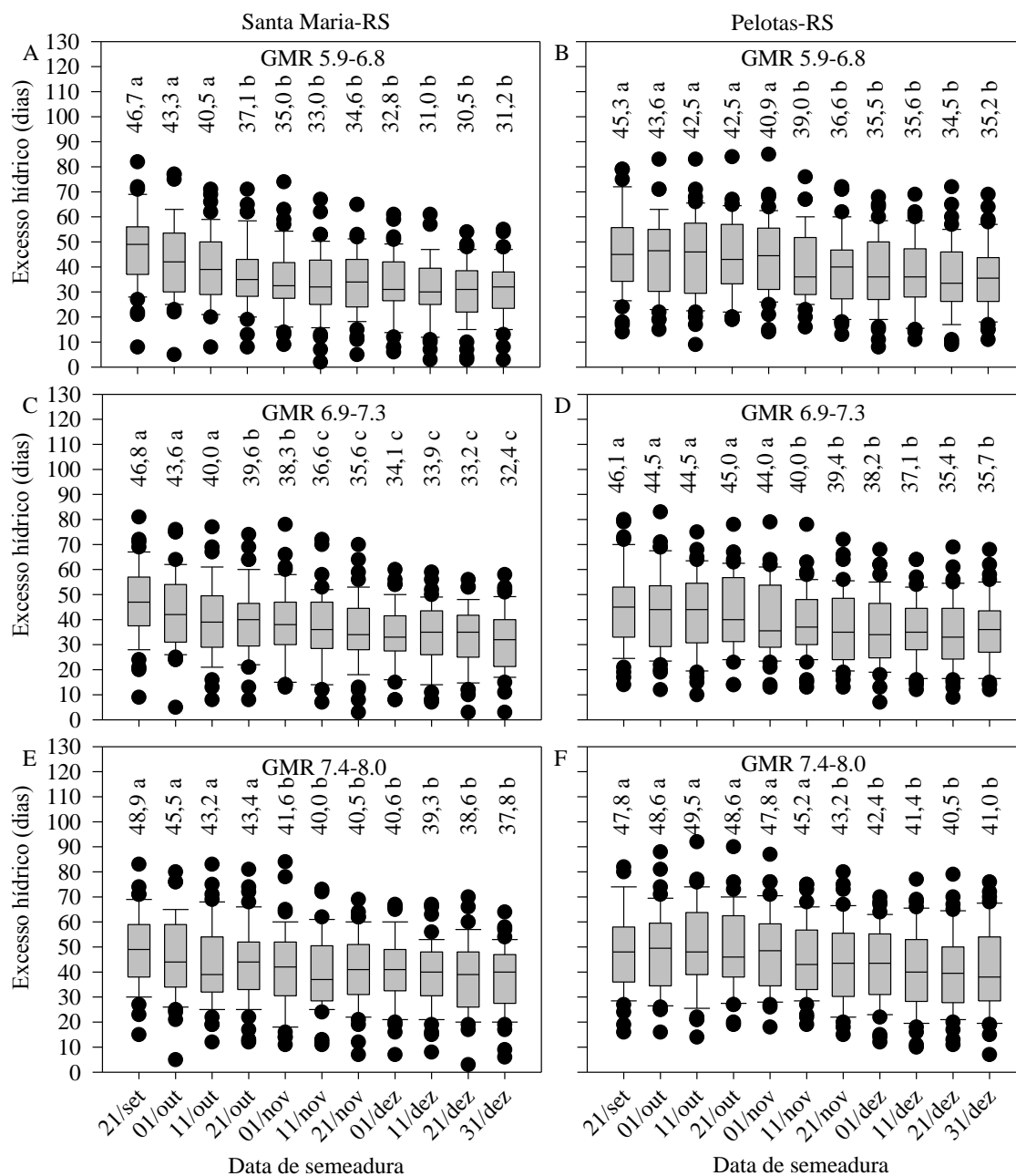
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A ocorrência de excesso hídrico foi constatada em todos os anos agrícolas da série histórica estudada, tanto para o solo Vacacaí, na região de abrangência de Santa Maria, quanto para o solo Piratini, na região de abrangência de Pelotas. No entanto, houve uma redução do número médio de dias com excesso hídrico durante o ciclo de desenvolvimento da primeira data de semeadura (21 de setembro) até 31 de dezembro para Santa Maria, exceto para o GMR 5.9-6.8, com tendência a estabilização a partir de início de dezembro (Figura 3A). As semeaduras simuladas até 11 de outubro para GMR 5.9-6.8 e 6.9-7.3 e 21 de outubro (GMR 7.4-8.0) foram as que apresentaram a maior frequência de ocorrência de excesso hídrico no ciclo. A elevada quantidade de valores extremos de dias com excesso hídrico em todas as datas de semeadura demonstra a variabilidade que ocorre entre os anos agrícolas, principalmente com relação à chuva.

Para Pelotas (Figura 3B, 3D, 3F), embora seguindo a tendência verificada em Santa Maria, a redução do número de dias com excesso hídrico da primeira para a última data de semeadura foi menor. Os maiores valores médios de excesso hídrico ocorreram para semeaduras simuladas até 01/11 e 11/11 para as cultivares de GMR entre 5.9 e 7.3 e acima de 7.4, respectivamente. Nos dois locais, devido a maior duração do ciclo de desenvolvimento, a magnitude do excesso hídrico (dias) foi maior para as cultivares de maior GMR.

Considerando os resultados relativos ao excesso hídrico em todo o ciclo da cultura para as diferentes épocas nos dois locais (Figura 3) e que a partir do início de novembro o atraso da semeadura resulta em redução do potencial produtivo da soja (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016), pode-se inferir que semeaduras em 11/11 e 21/11 para as cultivares de GMR entre 5.9 e 7.3 e acima de 7.4, respectivamente, deveriam ser as preferenciais. Em Santa Maria, a semeadura das cultivares de GMR entre 5.9 e 7.3 poderia ser antecipada em até 20 dias (21/10) com aumento médio de três a quatro dias de excesso hídrico no ciclo. No entanto, a redução da produtividade da soja devido ao estresse por excesso hídrico é dependente do estágio de desenvolvimento em que ocorre (SCHÖFFEL et al., 2001; STATON, 2017) e, portanto, é importante avaliar os resultados dessa abordagem por subperíodo de desenvolvimento.

Figura 3. Número médio e variabilidade interanual de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as diferentes datas de semeadura simuladas para o solo Vacacaí em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS (A, C e E) e para o solo Piratini de 1971 a 2017, em Pelotas, RS (B, D e F).



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Ao contrário dos resultados obtidos para o ciclo da cultura, especificamente para os subperíodos de desenvolvimento da soja houve excesso hídrico em apenas parte dos 49 anos agrícolas simulados em Santa Maria em todas as datas de semeadura e GMR considerados,

principalmente por apresentarem menor duração (Tabela 5). Considerando os subperíodos EM-V2 e V2-R1 da semeadura simulada em 21/09 para todos os GMR, não se verificou a ocorrência de excesso hídrico apenas no ano agrícola de 1981/82 (Tabela 5). Nas demais datas de semeadura e subperíodos considerados não foi verificado excesso hídrico em no mínimo dois anos ou mais. Essa análise é muito importante, pois traz uma primeira diferenciação de risco de ocorrência de excesso hídrico entre datas de semeadura para os diferentes subperíodos. Considerando a fase de estabelecimento da cultura até a emissão da primeira folha trifoliolada (V2), verifica-se que a partir da semeadura de 01 de novembro se tem uma redução acentuada da frequência de anos com ocorrência de excesso hídrico. Em termos de valores médios para Santa Maria, pode-se dizer que em um de cada quatro e um de cada seis anos não se têm problemas com excesso hídrico nos subperíodos S-EM e EM-V2, respectivamente (Tabela 5), importante para possibilitar um adequado estabelecimento inicial da soja em parte dos anos.

Na grande maioria dos anos da série histórica, ocorreu pelo menos um dia de excesso hídrico para o subperíodo V2-R1, principalmente por apresentar grande duração (Capítulo I). Além disso, não houve diferença entre datas de semeadura, independentemente do GMR considerado (Tabela 5).

Tendo em vista que houve pouca variabilidade entre datas de semeadura e GMRs, pode-se afirmar que aproximadamente em 33% dos anos não há ocorrência de excesso hídrico para o subperíodo R1-R5 (Tabela 5), no qual os danos são acentuados (LINKEMER; BOARD; MUSGRAVE, 1998; SCHÖFFEL et al., 2001; BEUTLER et al., 2014) e dependentes do número de dias consecutivos de ocorrência (SCOTT et al., 1989).

As análises de comparação de médias e de probabilidade para os subperíodos de desenvolvimento consideraram, portanto, apenas os anos em que houve excesso hídrico. Independentemente do GMR, verificou-se que as semeaduras a serem realizadas no início do calendário de semeadura (até 21/10) são as que apresentam maior número médio de dias com excesso hídrico para os subperíodos S-EM e EM-V2 em Santa Maria (Figuras 4, 5 e 6). Isso ocorre pela menor demanda atmosférica nessa época do ano, resultando em um maior armazenamento de água no solo entre a ocorrência de chuvas. Além disso, a menor temperatura do ar e do solo nesse período prolonga o processo germinativo aumentando a duração desses subperíodos.

Tabela 5. Frequência (%) 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 2017, em Santa Maria, RS.

GMR	DS	Subperíodo					
		S-EM	EM-V2	V2-R1	R1-R5	R5-R7	R7-R8
5.9-6.8	21/set	88	98	98	65	86	61
	01/out	80	96	96	73	84	61
	11/out	90	96	96	69	84	61
	21/out	84	98	92	73	84	69
	01/nov	73	82	94	69	84	80
	11/nov	71	73	92	71	86	73
	21/nov	65	76	94	65	82	76
	01/dez	78	78	96	78	90	71
	11/dez	65	73	92	69	86	55
	21/dez	63	69	90	59	84	65
	31/dez	73	78	94	61	80	57
	Média	76	83	94	69	84	66
6.9-7.3	21/set	90	98	98	69	84	57
	01/out	82	96	94	73	84	65
	11/out	78	94	94	65	84	61
	21/out	84	98	96	71	86	80
	01/nov	90	84	92	71	86	78
	11/nov	73	78	96	67	88	76
	21/nov	63	78	96	71	90	71
	01/dez	65	80	94	73	86	69
	11/dez	73	71	94	63	88	71
	21/dez	71	73	96	61	82	65
	31/dez	78	78	94	63	78	53
	Média	77	84	95	68	85	68
7.4-8.0	21/set	90	98	98	63	86	67
	01/out	76	96	94	65	82	71
	11/out	78	96	96	59	84	76
	21/out	76	98	96	67	86	84
	01/nov	78	78	94	65	84	88
	11/nov	61	76	96	67	88	84
	21/nov	67	78	96	71	88	82
	01/dez	82	80	94	57	88	80
	11/dez	80	78	96	61	84	76
	21/dez	76	76	96	59	78	73
	31/dez	82	82	94	73	80	71
	Média	77	85	95	64	84	77

Considerando os valores médios obtidos para Santa Maria, solo Vacacaí, não houve diferença significativa para os subperíodos R1-R5 e R5-R7 para todos os GMR, assim como para V2-R1 para os GMR 6.9-7.3 e 7.4-8.0 (Figuras 5 e 6). Para o GMR 5.9-6.8 (Figura 4), o número de dias de excesso hídrico ao longo do subperíodo V2-R1 ficou acima de 13 dias em sementeiras realizadas até 01/10, o que pode ser bastante prejudicial principalmente se coincidir com o início do processo de fixação biológica de nitrogênio nas raízes (LINKEMER; BOARD; MUSGRAVE, 1998). Scott et al. (1989) submetendo as plantas de soja à inundação por períodos de 2 a 14 dias a partir do estágio V4, obtiveram perdas entre 53 e 124 kg.ha⁻¹.dia⁻¹, variável em função do tipo de solo considerado.

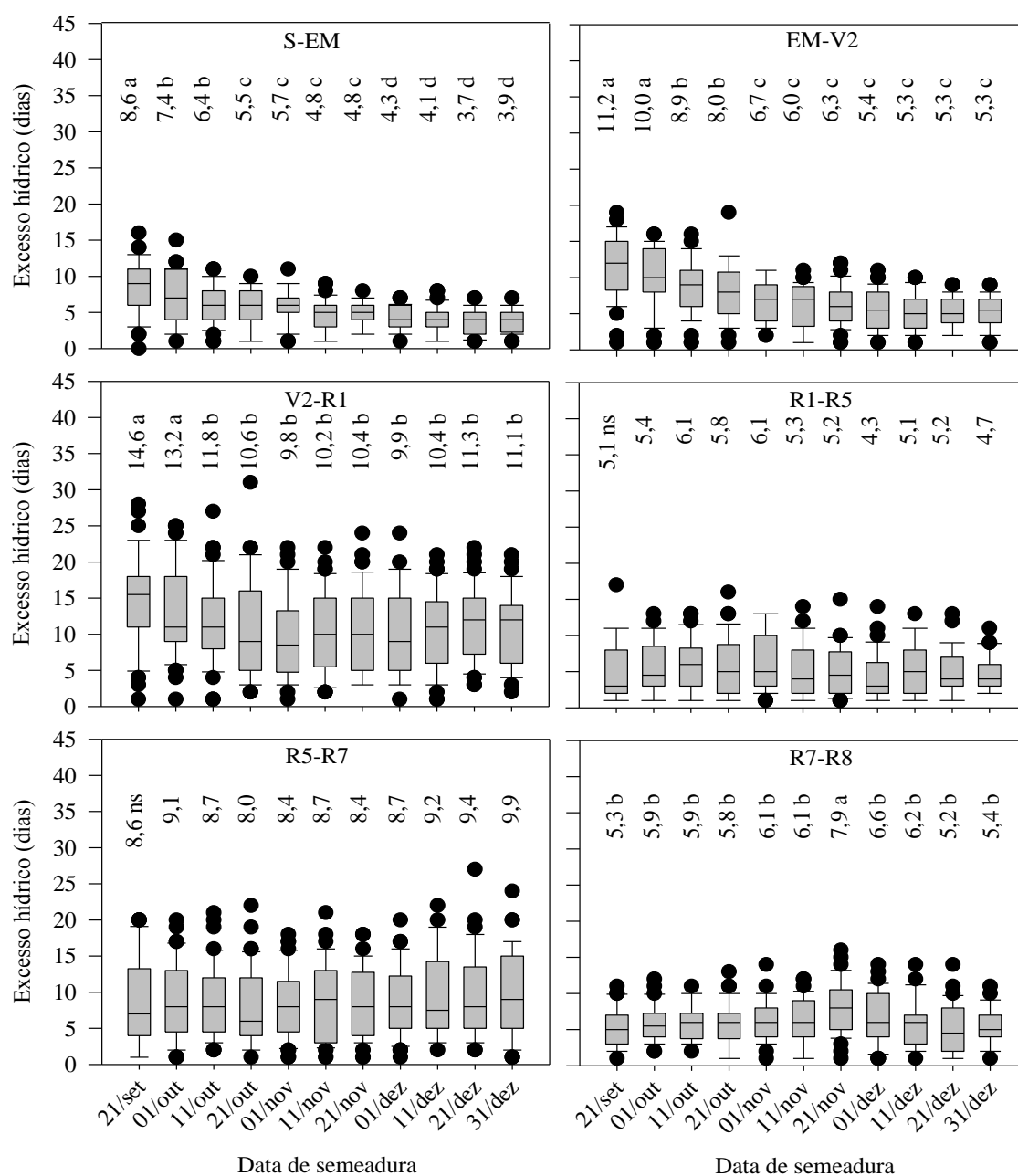
A sementeira simulada de 21 de novembro foi a que apresentou o maior número de dias de excesso hídrico no subperíodo R7-R8 para o GMR 5.9-6.8, diferindo das demais (Figura 4), mas junto com a sementeira de 11/nov foi a que apresentou os menores valores nos subperíodos mais críticos (S-EM, EM-V2, R1-R5), conforme Scott et al. (1989), Sionit e Kramer (1977), Sullivan et al. (2001) e Schöffel et al. (2001), considerando as datas de sementeira que ainda permitem obter alto potencial produtivo. As quatro datas de sementeira de dezembro são as que apresentam menor média de dias com excesso hídrico nesses três subperíodos mais críticos para a soja, mas são também as que proporcionam menor potencial produtivo (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016) em função da diminuição da disponibilidade de radiação solar e condição mais favorável às doenças fúngicas durante a fase reprodutiva.

Para o GMR 6.9-7.3, as sementeiras do mês de novembro foram as que apresentaram maior excesso hídrico para o subperíodo R7-R8 (Figura 5), enquanto que nos subperíodos V2-R1, R1-R5 e R5-R7 não houve diferença significativa das médias entre as 11 datas de sementeira. Entretanto, é possível observar uma tendência de que sementeiras compreendidas entre 21/out e 21/nov apresentam menor frequência de excesso hídrico para esses subperíodos. Para o GMR 7.4-8.0 tem-se resposta similar ao GMR 6.9-7.3, mas a janela de sementeira com excesso hídrico mais acentuado é maior (21/out a 21/dez) durante a maturação (R7-R8), provavelmente porque há maior necessidade de soma térmica nesse subperíodo para as cultivares de maior GMR (Figura 6).

Considerando o subperíodo compreendido entre R1 e R5, nos 57 a 77% dos anos em que ocorreu algum excesso hídrico, o número médio de dias com excesso hídrico para as 11 datas de sementeira dos três GMR variou de quatro a seis, predominando cinco dias (Figuras 4, 5 e 6), que pode ser considerado relativamente tolerável pela soja, principalmente se não forem consecutivos. A redução de produtividade para cada dia de alagamento a que as plantas

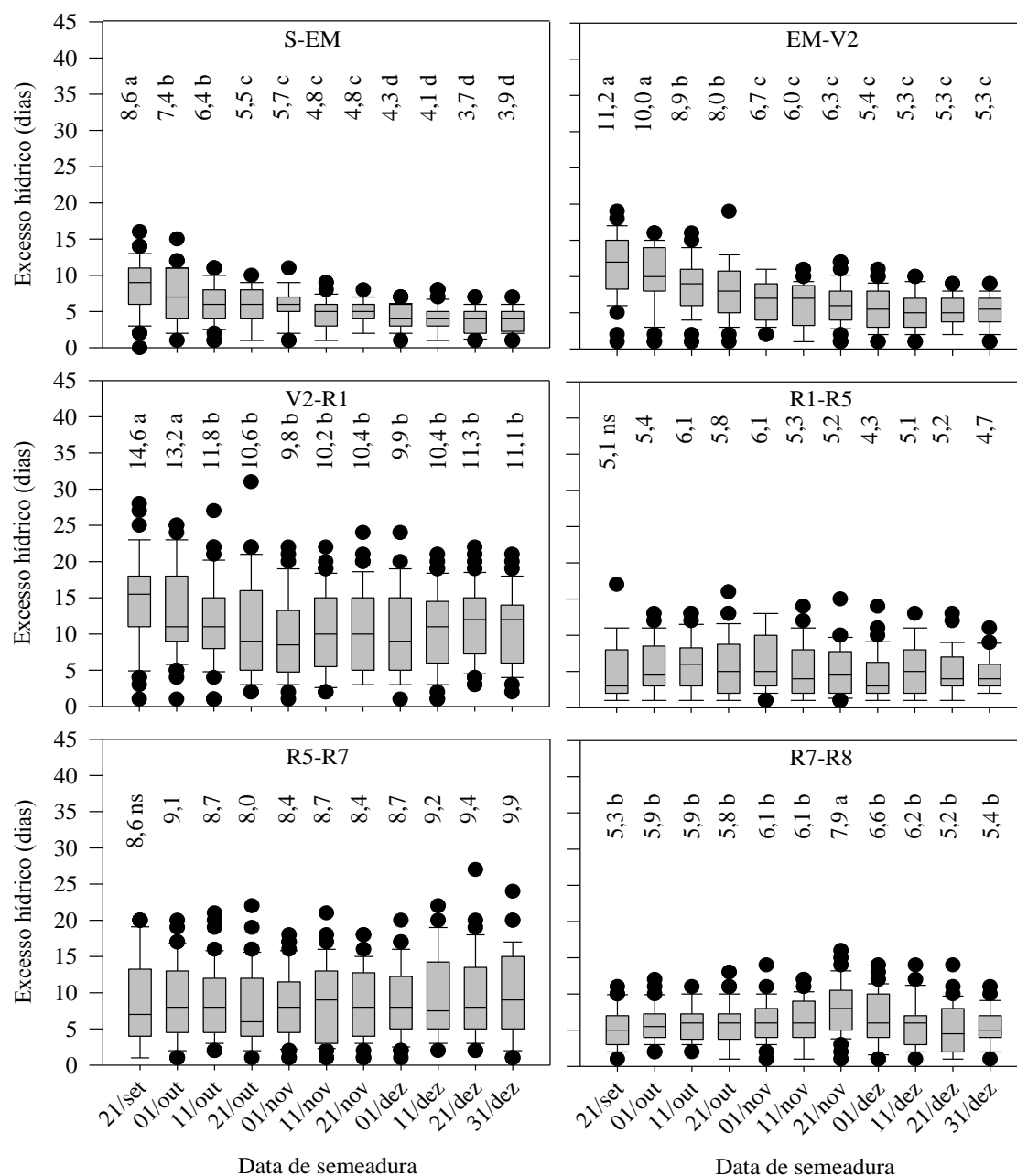
de soja foram submetidas a partir do estágio R2 variou, em função do tipo de solo, entre 101 a 154 Kg.ha⁻¹ no estado de Arkansas, EUA (SCOTT et al., 1989). De qualquer forma, em números absolutos, essa redução seria maior atualmente, tendo em vista o avanço genético e o aumento da produtividade das cultivares modernas de soja.

Figura 4. Número médio e variabilidade interanual de dias com excesso hídrico nos 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), no solo Vacacaí, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.



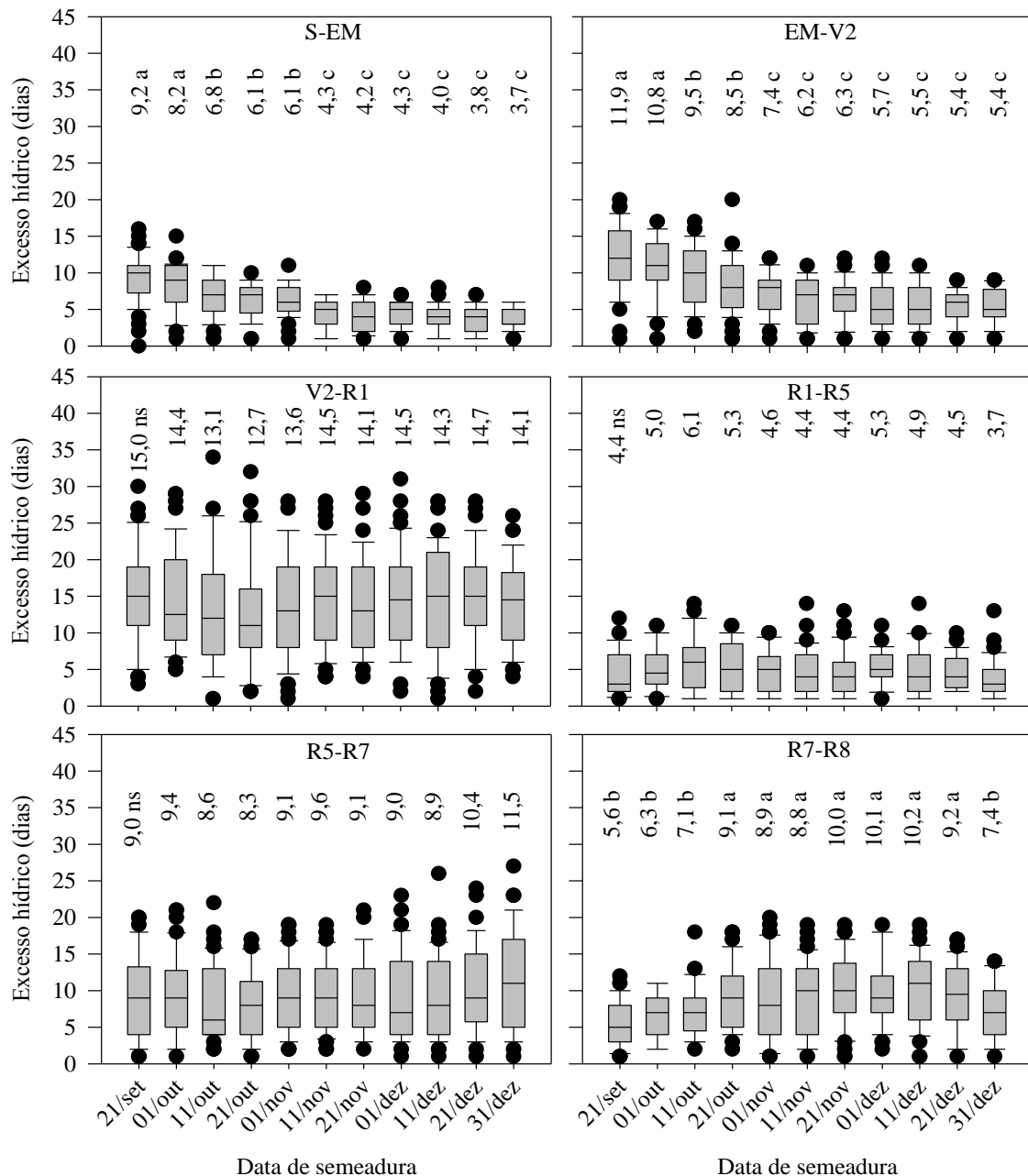
*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 5. Número médio e variabilidade interanual de dias com excesso hídrico nos 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), no solo Vacacaí, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 6. Número médio e variabilidade interanual de dias com excesso hídrico nos 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), no solo Vacacaí, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Os valores extremos máximos no subperíodo R1-R5 para as diferentes datas de semeadura e GMR variaram de 10 a 17 dias. Esse resultado é importante tendo em vista de que se trata de um subperíodo da fase reprodutiva na qual a cultura da soja é extremamente

sensível ao excesso hídrico (SCHÖFFEL et al., 2001; BEUTLER et al., 2014). Assim, pode-se inferir que não são muitos os anos que apresentam mais do que 10 dias nessa condição hídrica altamente prejudicial à soja do estágio R1 ao R5 em Planossolo Háplico em Santa Maria, RS. Além disso, esses valores extremos podem estar associados a fenômenos de macroescala como o El Niño Oscilação Sul (ENOS) e, portanto, podem-se tomar medidas de mitigação específica para esses anos.

Como para Santa Maria não se verificou diferença significativa do número médio de dias com excesso hídrico entre as 11 datas de semeadura para os subperíodos mais críticos (R1-R5 e R5-R7) da fase reprodutiva, a definição das datas de semeadura mais favoráveis deve se fundamentar na redução do potencial produtivo com o retardamento da data de semeadura, no excesso hídrico nos subperíodos S-EM e EM-V2, bem como da análise numérica do risco de ocorrência do excesso e déficit hídrico nos subperíodos mais prejudiciais.

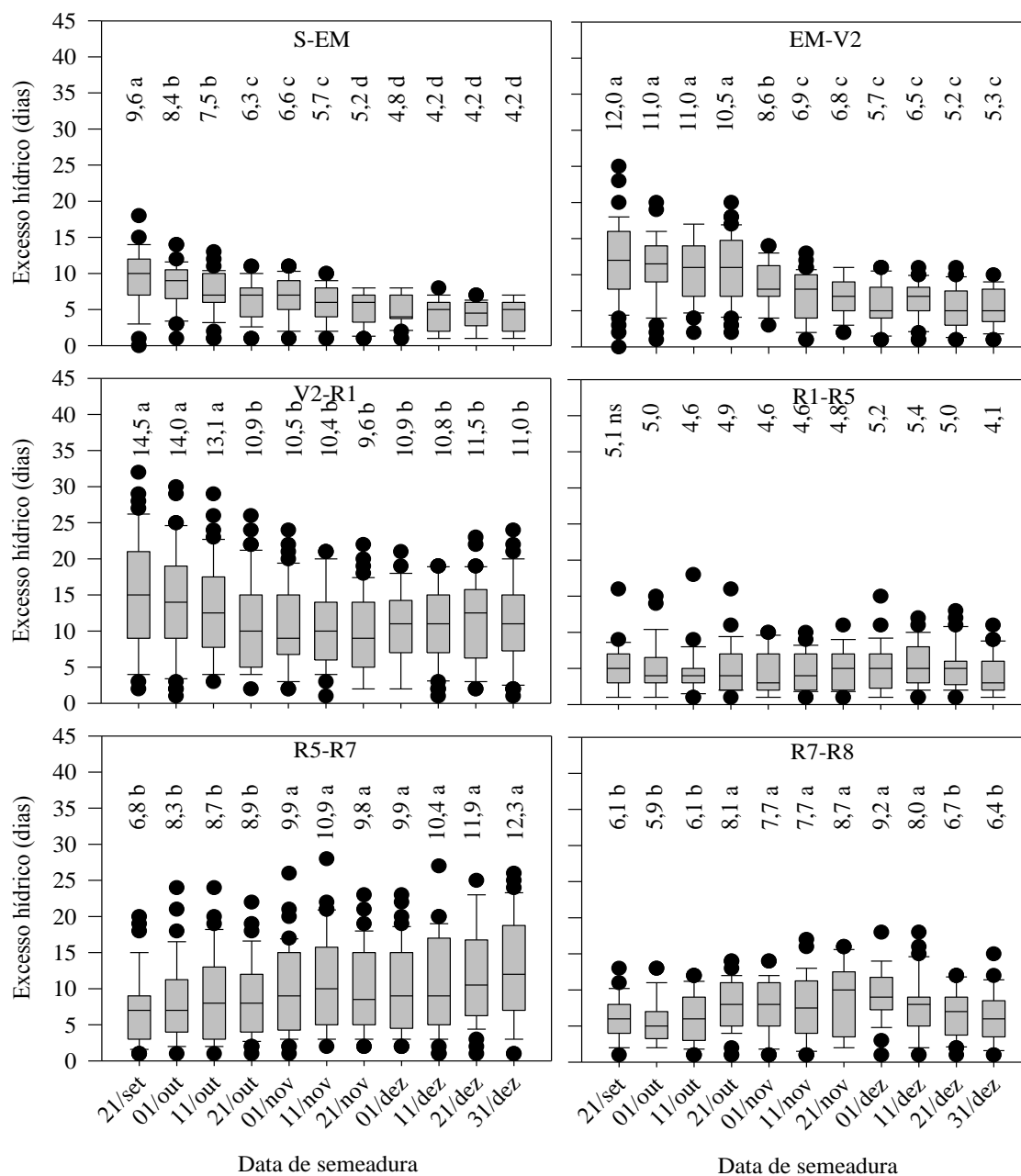
A frequência de anos com ocorrência de excesso hídrico nos subperíodos de desenvolvimento da soja foi menor em Pelotas (Tabela 6), mas apresentou tendência semelhante ao verificado para Santa Maria (Tabela 5). Verifica-se uma tendência de aumento da frequência de anos com excesso hídrico nas semeaduras de dezembro para o subperíodo R1-R5 para os três GMR (Tabela 6). Provavelmente isso ocorre porque esse período do ciclo já coincide com uma época com certa redução na demanda atmosférica, diminuindo a evapotranspiração e, conseqüentemente, favorecendo a ocorrência de excesso hídrico. Além disso, de acordo com a série histórica de dados de precipitação pluviométrica utilizada, o mês de fevereiro é o que apresenta maior média mensal em Pelotas, com um acumulado de aproximadamente 145 mm. Além disso, no outono e final do verão verifica-se alta frequência de chuvas intensas (MOLIN et al., 1996).

Considerando os subperíodos S-EM e EM-V2, críticos para o estabelecimento da cultura, observa-se uma redução da frequência de anos em que houve excesso hídrico a partir da semeadura de 21/nov (Tabela 6). Essa tendência também foi verificada para Santa Maria, porém, antecipadamente, a partir de 11/nov (Tabela 5). Esses dados apontam novamente para um maior risco de perdas no estabelecimento da cultura quando se opta pela realização de semeaduras precoces. Como estratégia para evitar pequena população de plantas, pode-se aumentar a densidade de semeadura e utilizar cultivares mais adaptadas ao ambiente de terras baixas. Conjuntamente a isso, no caso de anos sob influência do fenômeno ENOS e em áreas próximas do leito dos rios sujeitas a alagamentos por longos períodos, deve-se evitar ao máximo a semeadura de soja especialmente nesse período.

Tabela 6. Frequência (%) de anos com registro de ocorrência de excesso hídrico nos 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), no solo Piratini, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR) e as datas de semeadura (DS) simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.

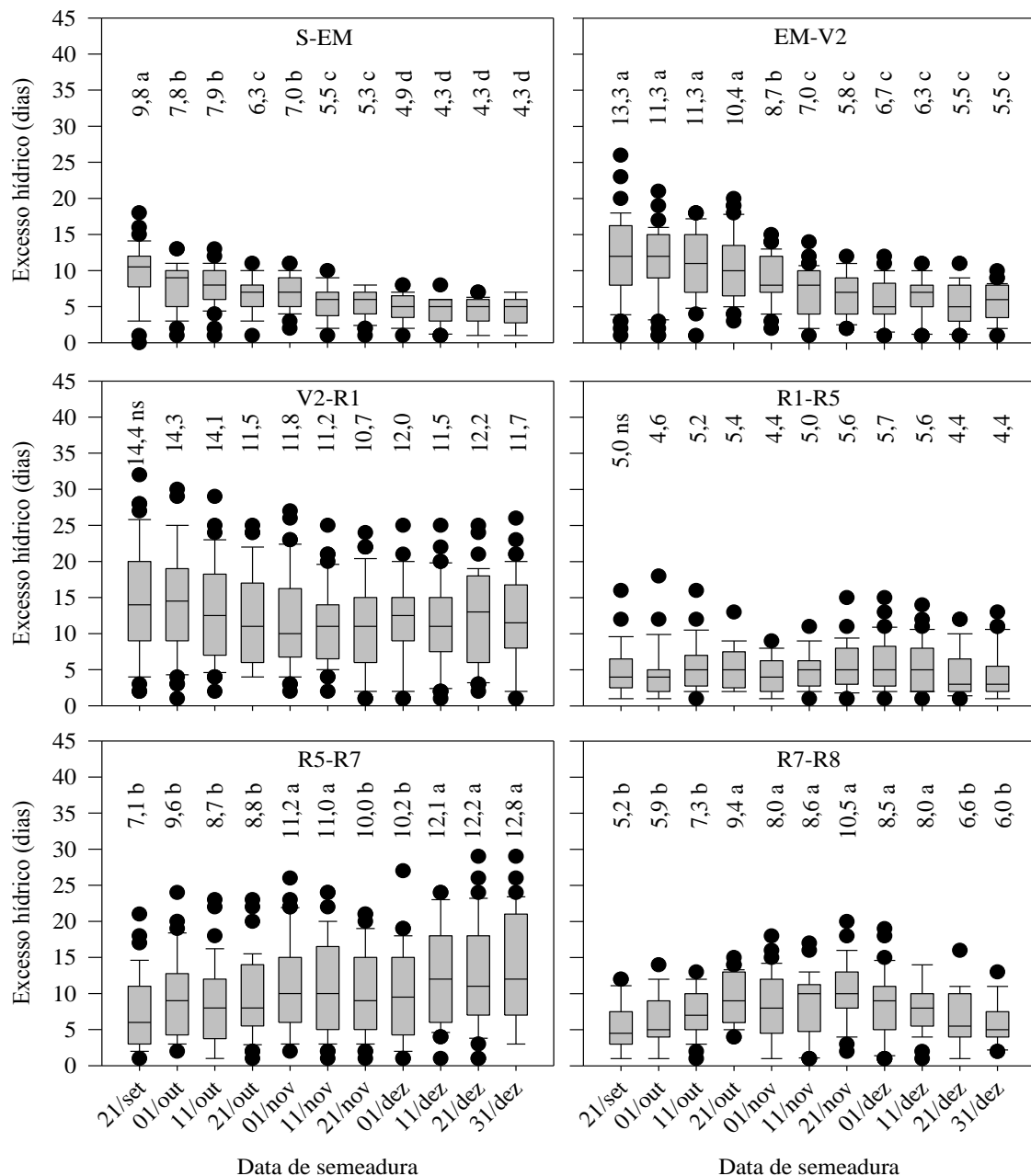
GMR	DS	Subperíodo					
		S-EM	EM-V2	V2-R1	R1-R5	R5-R7	R7-R8
5.9-6.8	21/set	76	84	88	47	71	55
	01/out	67	82	88	51	69	65
	11/out	71	73	86	49	76	76
	21/out	76	82	88	47	73	80
	01/nov	73	78	86	49	82	76
	11/nov	71	86	80	53	82	69
	21/nov	65	67	86	55	82	67
	01/dez	61	69	78	57	84	57
	11/dez	63	61	82	59	80	63
	21/dez	53	65	82	61	73	61
	31/dez	65	76	90	63	73	51
	Média	67,6	74,7	84,5	53,7	76,7	65,5
6.9-7.3	21/set	78	86	88	51	71	57
	01/out	71	84	86	53	65	67
	11/out	67	76	86	45	78	80
	21/out	76	84	88	43	78	73
	01/nov	71	80	86	53	82	76
	11/nov	69	86	84	53	84	61
	21/nov	67	69	88	55	84	59
	01/dez	59	69	82	61	82	67
	11/dez	63	63	84	63	71	59
	21/dez	53	63	84	67	76	53
	31/dez	61	76	90	67	71	43
	Média	66,9	75,7	85,7	55,5	76,3	63,3
7.4-8.0	21/set	82	88	88	49	69	63
	01/out	78	86	86	45	69	78
	11/out	78	78	88	49	73	82
	21/out	69	84	88	45	84	80
	01/nov	76	78	90	55	86	71
	11/nov	80	86	88	55	84	67
	21/nov	63	71	88	57	84	71
	01/dez	67	71	88	59	76	63
	11/dez	65	63	86	63	76	63
	21/dez	65	67	88	63	71	59
	31/dez	55	73	90	61	76	57
	Média	70,6	76,7	87,8	54,7	76,9	68,6

Figura 7. Número médio e variabilidade interanual 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.



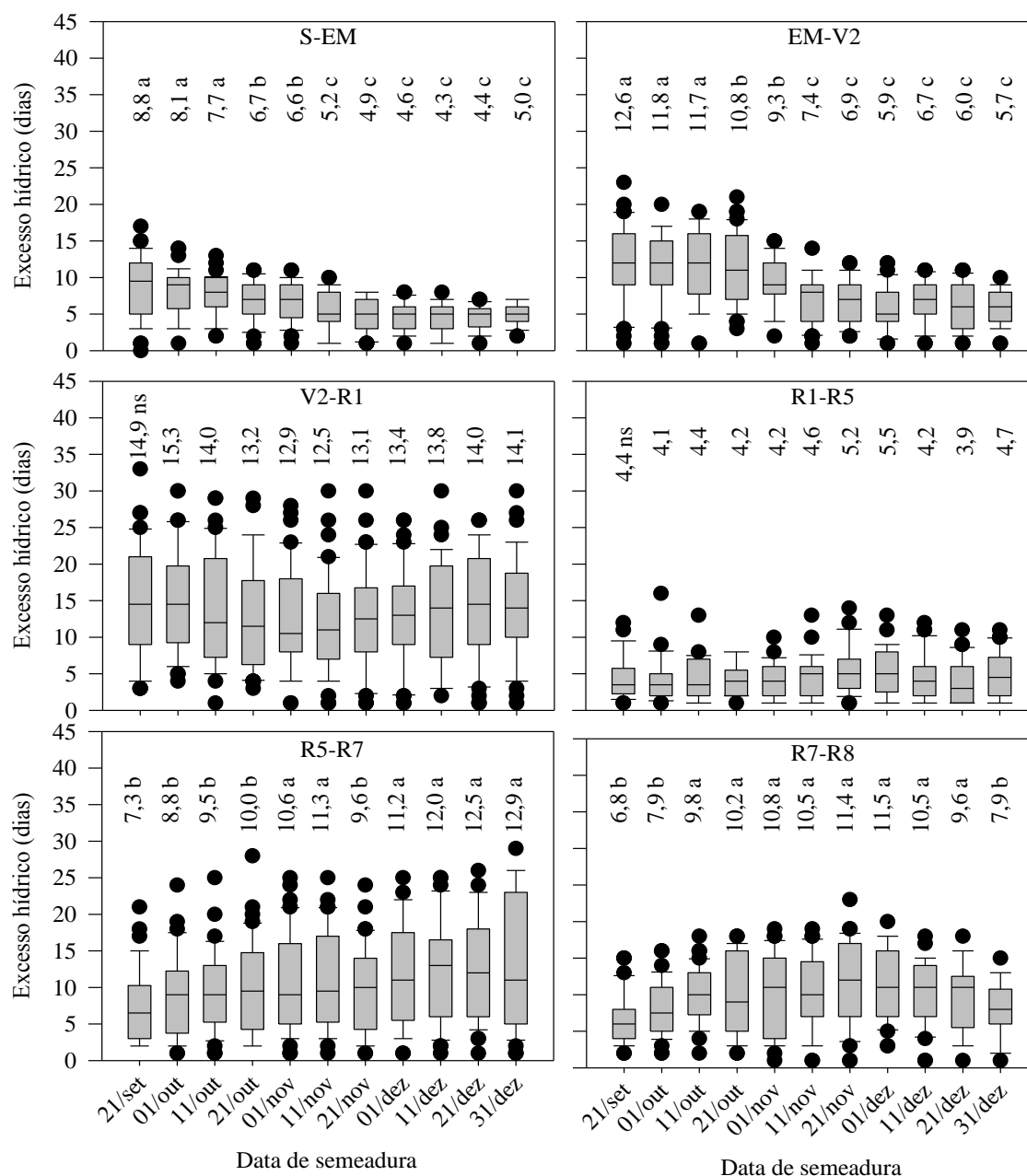
*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 8. Número médio e variabilidade interanual 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 9. Número médio e variabilidade interanual 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Com relação aos valores médios obtidos para os subperíodos em Pelotas, estes foram bastante semelhantes aos de Santa Maria. Considerando os períodos compreendidos entre a semeadura (S) e a emissão da primeira folha trifoliolada (V2), observa-se uma maior

ocorrência de excesso hídrico para o solo Piratini (Pelotas) em relação ao Vacacaí (Santa Maria). Para o GMR 5.9-6.8, por exemplo, na semeadura de 21 de setembro, ocorre em média um dia a mais de excesso hídrico em Pelotas (Figuras 4 e 7). Tendo em vista a pequena diferença entre a CAD dos Planossolos entre os locais e a menor precipitação pluviométrica histórica na região de Pelotas em relação à Santa Maria, esse resultado se deve à maior duração desses subperíodos em zona de maior latitude (Capítulo 1), principalmente pela menor disponibilidade térmica em setembro e outubro.

Assim como observado para Santa Maria, houve diferença entre datas de semeadura no subperíodo V2-R1 apenas para cultivares de GMR 5.9-6.8. Há uma tendência de estabilização da frequência de ocorrência de excesso hídrico a partir de 21/out em Pelotas (Figura 7).

Destaca-se também a diferença entre datas de semeadura para o subperíodo R5-R7, independentemente do GMR (Figuras 7, 8 e 9). De maneira geral, as semeaduras simuladas a partir de 01/nov apresentaram maior frequência média de ocorrência de excesso hídrico. Por se tratar do período de enchimento de grãos a ocorrência de maior magnitude de excesso hídrico está relacionada à diminuição da radiação solar incidente, o que prejudica a acumulação de matéria seca.

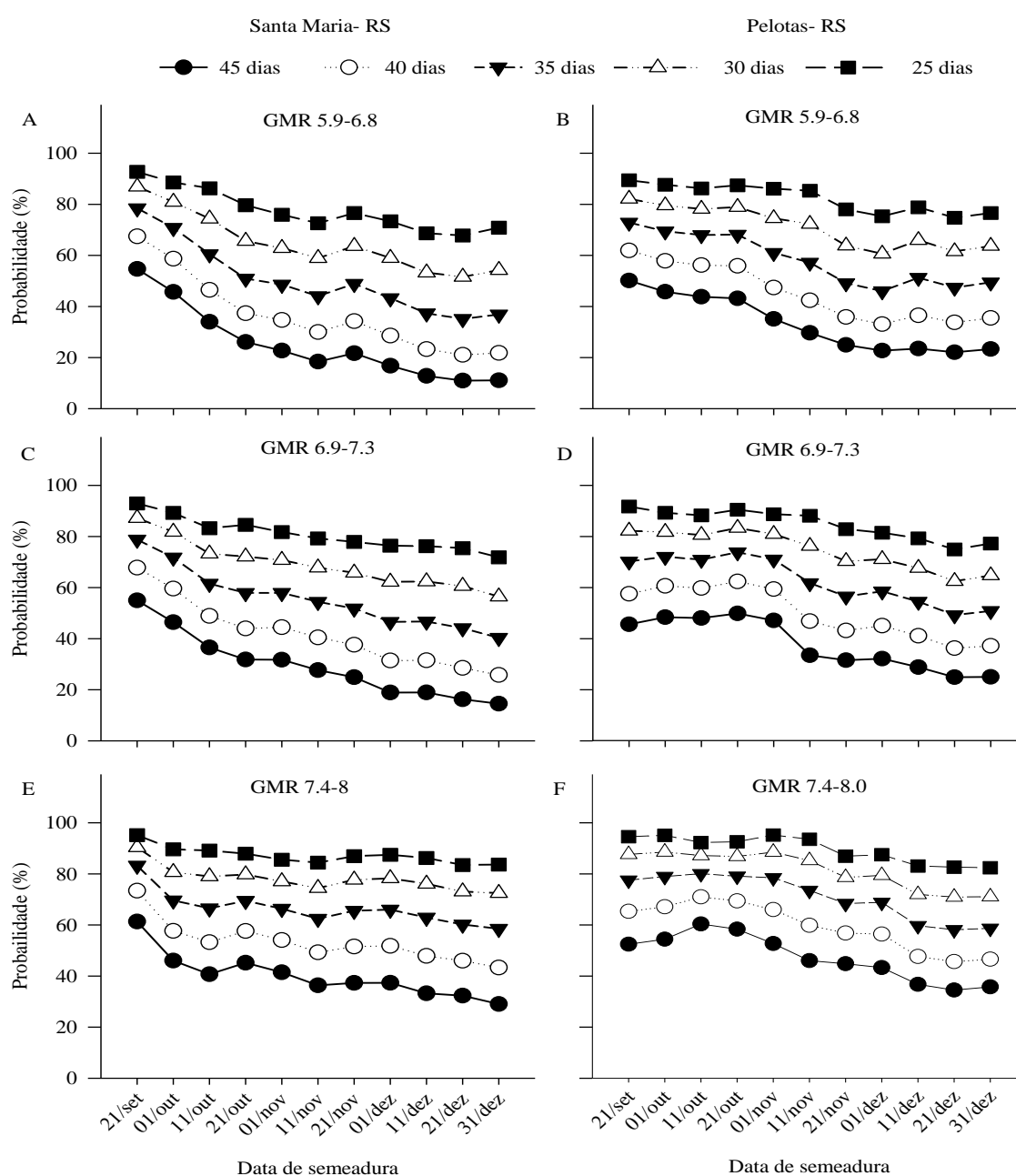
Considerando o ciclo total de desenvolvimento, em que a aderência das fdp exponencial, gama, lognormal, normal e weibull foram testadas para a variável número de dias com excesso hídrico, resultaram 66 cenários, constituídos pelas 11 datas de semeadura, três grupos de maturidade relativa (GMR) e os dois locais estudados (APÊNDICE B). As fdp weibull e gama, para Pelotas, e fdp normal, para Santa Maria, foram as que apresentaram as maiores frequências com o melhor ajuste.

As estimativas dos valores de probabilidade de ocorrência de diferentes níveis de excesso hídrico ao longo do ciclo da cultura da soja para os três GMR (Figura 10) permitem afirmar que o risco de ocorrer excesso hídrico durante o ciclo de desenvolvimento é maior para a soja semeada precocemente. Assim, por exemplo, as cultivares de GMR 5.9-6.8 semeadas em 21/09 em Santa Maria apresentam probabilidade de 78% de que ocorra 35 ou mais dias de excesso hídrico ao longo do ciclo de desenvolvimento, reduzindo esse risco para 35 % na semeadura de 21 de dezembro (Figura 10A). Essa interpretação pode ser utilizada para todas as demais datas de semeadura e GMR.

De maneira geral, verifica-se uma redução do risco de ocorrência de excesso hídrico na medida em que se avança no calendário de semeadura, sendo mais acentuada para o GMR 5.9-6.8 (Figura 10A, 10B). Os valores de probabilidade ou risco foram maiores para o GMR

7.4-8.0 (Figuras 10E, 10F), principalmente por apresentar maior duração total do ciclo (Capítulo I). Além disso, verifica-se que há pouca redução do risco com o avanço no calendário de semeadura para o GMR 7.4-8.0 (Figuras 10E, 10F) e, portanto, a análise de risco deve ser concentrada nos subperíodos mais críticos para a cultura.

Figura 10. Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico igual ou maior que 25, 30, 35, 40 e 45 dias 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 o solo Vacacaí (A, C e E) e Piratini (B, D e F), considerando onze datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017 em Santa Maria e 1971 a 2017 em Pelotas, em Santa Maria, RS.



De qualquer forma, do ponto de vista prático, a dificuldade de identificar uma data de semeadura de menor risco para as cultivares de GMR 7.4-8.0 é menos importante do que para os GMR 5.9-6.8 e 6.9-7.3, os quais são os preferencialmente utilizados para cultivos de soja em Planossolos de terras baixas (ZANON et al., 2015), como o Vacacaí e Piratini, que abrangem grandes áreas no Rio Grande do Sul (STRECK et al., 2008). Sem considerar os riscos específicos por subperíodos, principalmente os de maior sensibilidade da soja ao excesso hídrico, e considerando que o potencial produtivo da soja diminui com o avanço do calendário de semeadura (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016), pode-se inferir que o menor risco no ciclo de cultivares do GMR 5.9-6.8 é previsto para semeaduras realizadas entre em 11/nov e 01/dez para solo Vacacaí, na região de abrangência de Santa Maria e 21/nov e 01/dez para o solo Piratini, na região de abrangência da estação meteorológica de Pelotas.

Nas Figuras 11, 12 e 13 estão apresentados os valores de probabilidade de ocorrência do número de dias de excesso hídrico acumulados durante os subperíodos da soja, obtidos a partir dos parâmetros das fdp ajustadas para o solo Vacacaí na região de abrangência da estação meteorológica de Santa Maria (Apêndice B), para os GMR 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, respectivamente. Salienta-se que apenas os anos que, no respectivo subperíodo, apresentaram pelo menos um dia com excesso hídrico estão representados nesses dados.

Independentemente do GMR, verifica-se que a probabilidade de ocorrência de dois ou mais dias de excesso hídrico no subperíodo S-EM geralmente é superior à 0,8, apresentando uma forte tendência de maior risco nas primeiras datas de semeadura (Figuras 11A, 12A, 13A). Para o nível de risco de ocorrência de pelo menos quatro dias de excesso hídrico, as semeaduras simuladas até 01/nov apresentaram elevada probabilidade, a qual ficou próxima de 0,8. Assim, com exceção dos anos em que não ocorre excesso hídrico (aproximadamente 25% dos anos), em oito a cada dez anos em que for realizada a semeadura da soja nestas datas ocorrerão quatro ou mais dias de excesso hídrico no solo, o que é extremamente prejudicial ao processo germinativo podendo levar à necessidade de ressemeadura. Analisando de outra forma, pode-se considerar a totalidade dos anos da série histórica, concluindo que o risco de ocorrência de quatro ou mais dias é reduzido para seis em cada dez anos.

Cabe ressaltar que a probabilidade de ocorrência de oito ou mais dias de excesso hídrico é alta principalmente para as semeaduras até 01 de outubro ($p \geq 0.4$). Já a probabilidade de ocorrência de pelo menos 12 dias é extremamente baixa, devido principalmente à curta duração deste subperíodo, em média, menor do que dez dias (TRENTIN et al., 2013). O excesso de água no solo provoca a ruptura das membranas das células do embrião da semente

(TIAN; NAKAMURA; KOKUBUN, 2005), o que reduz a germinação e a emergência (WUEBKER; MULLEN; KOEHLER, 2001). Visando reduzir esses efeitos e propiciar uma adequada população e distribuição de plantas, fundamental para lavouras de alto potencial produtivo (ZANON et al., 2018), pode-se optar por realizar a semeadura a partir de 11/nov, em que o risco associado é bastante reduzido. É praticamente nula a probabilidade de ocorrência de oito ou mais dias de excesso hídrico a partir dessa data (Figuras 11A, 12A, 13A).

Para o subperíodo compreendido entre a emergência das plantas até a primeira folha trifoliolada expandida (EM-V2) 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 11B, 12B, 13B). 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. Para 12 dias ou mais de excesso hídrico, o risco fica acima de 40% na semeadura de 21 de setembro, sendo reduzido à zero a partir de 01 de novembro.

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 dos estágios 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).

Considerando o subperíodo V2-R1, para as cultivares de GMR 5.9-6.8, ao observar a probabilidade de ocorrência de oito e doze dias ou mais de excesso hídrico, verifica-se um maior risco para as semeaduras precoces, assim como para 21 e 31/12 (Figura 11C). Não foram observadas diferenças expressivas nas probabilidades entre as datas de semeadura associadas ao GMR 6.9-7.3 e GMR 7.4-8.0 (Figura 12C, 13C). O menor valor de probabilidade foi obtido para a semeadura de 21 de outubro, aumentando o risco de excesso hídrico tanto para as semeaduras mais precoces quanto para as mais tardias. Ressalta-se ainda que para esses GMR a probabilidade de ocorrer 12 ou mais dias neste subperíodo ficou próxima de 50%, o que é um valor expressivo. 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).

Figura 11. Probabilidade de ocorrência de 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), primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.

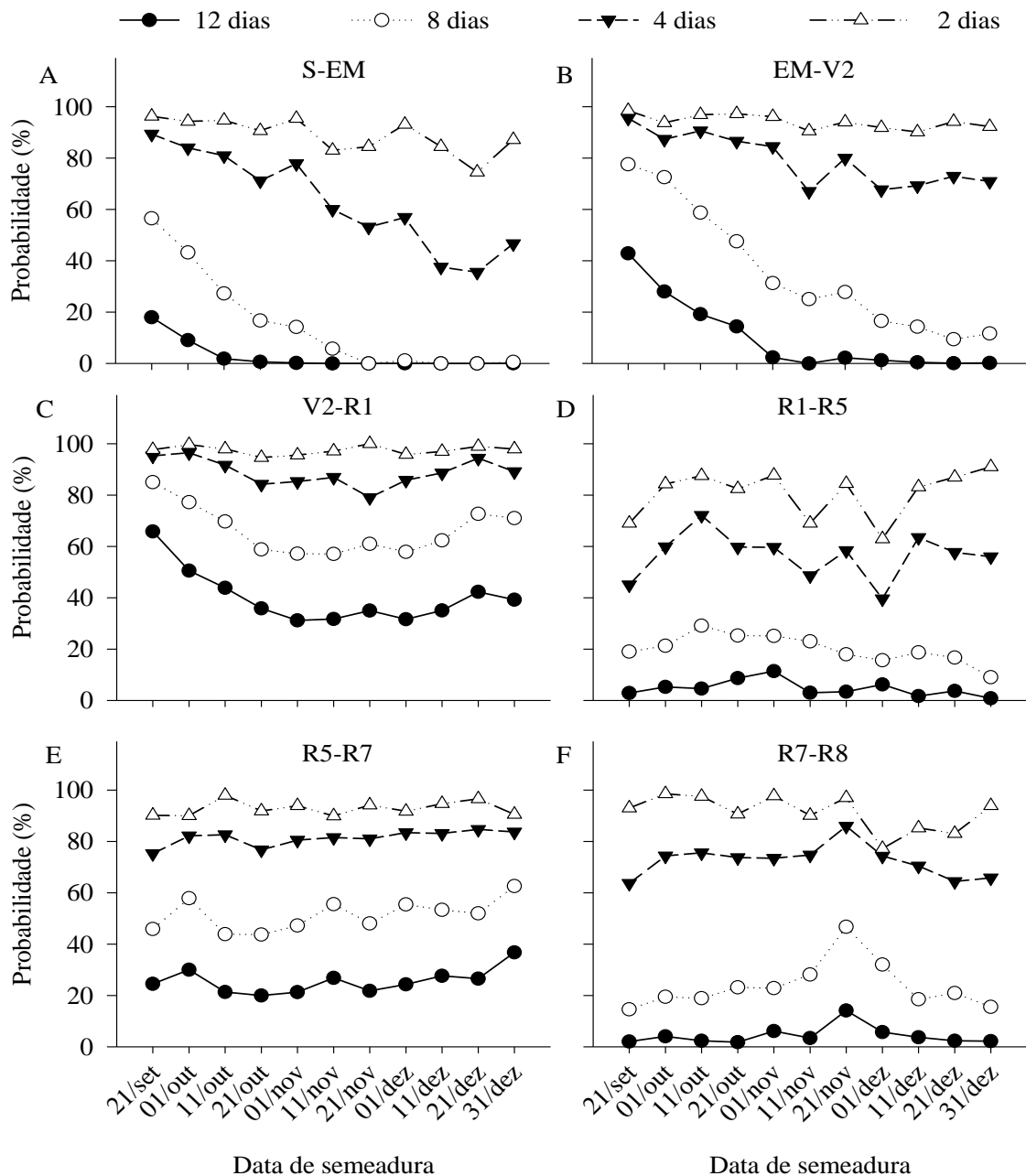


Figura 129. Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1), início 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 o solo Vacacaí em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.

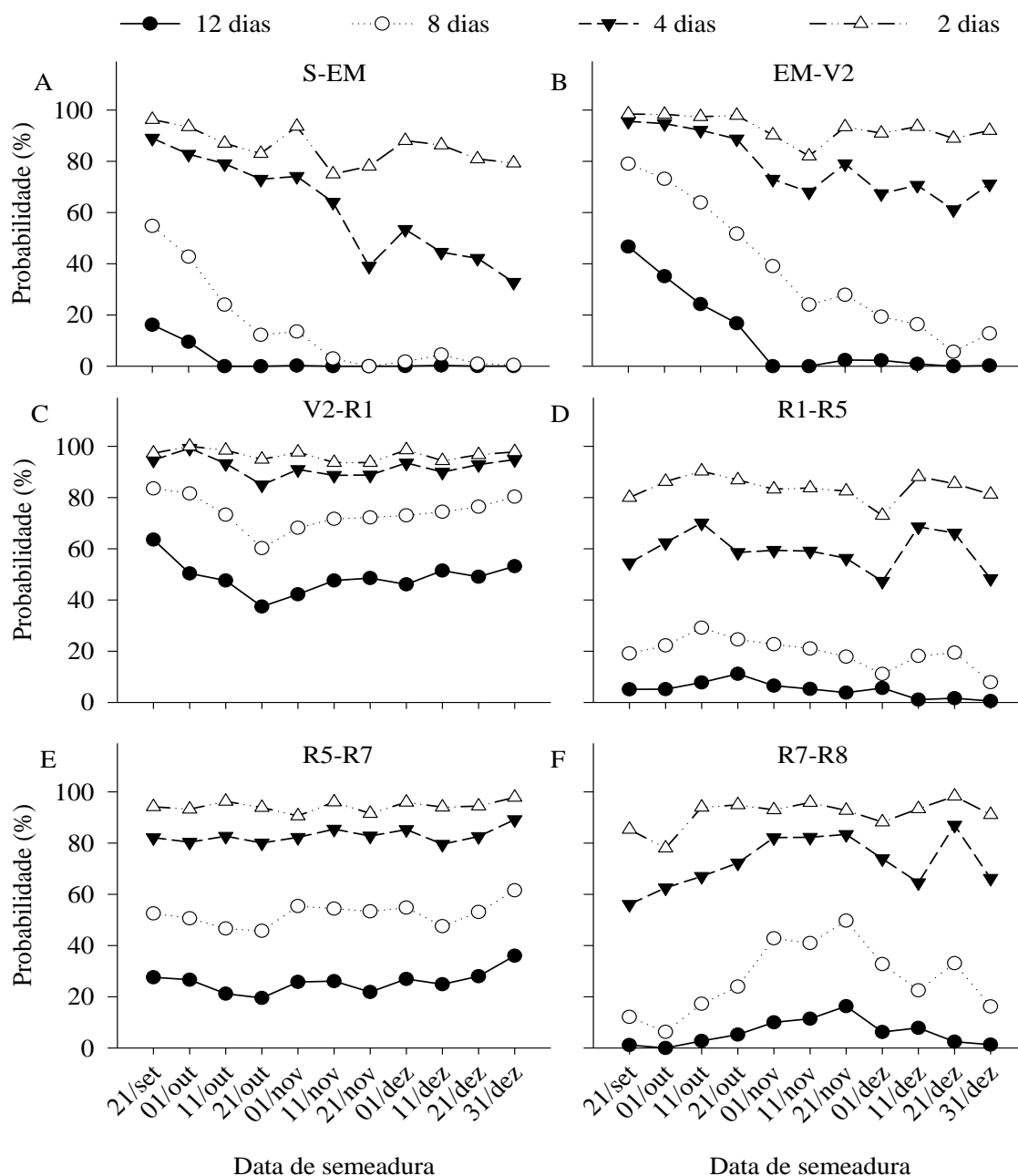
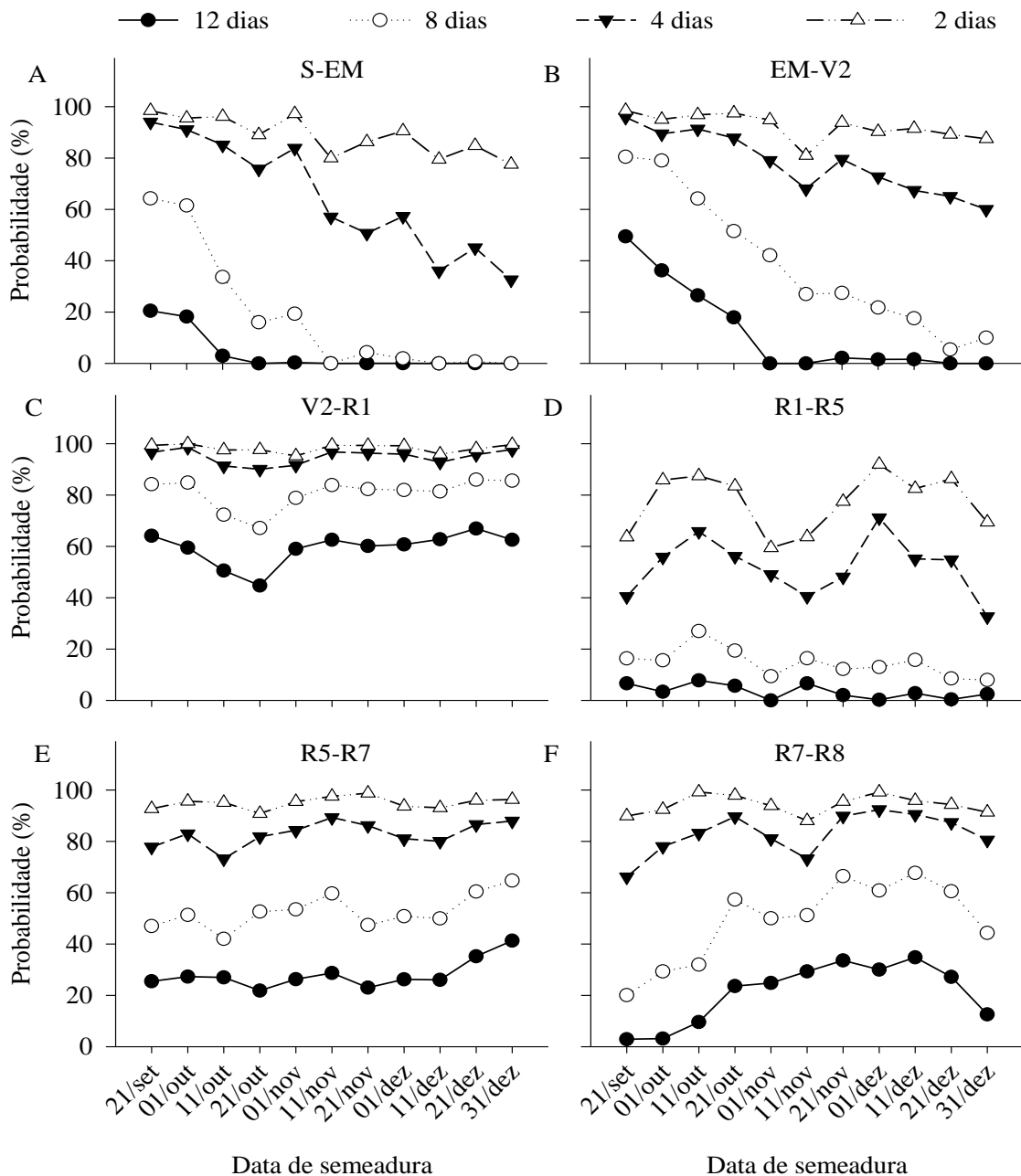


Figura 1310. Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), início 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 o solo Vacacaí em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.



Os danos ocasionados pelo excesso hídrico são mais prejudiciais se ocorrerem durante o subperíodo R1-R5 (SCOTT et al.,1989; SCHÖFFEL et al., 2001). Uma informação importante é que em um a cada três anos não se verifica a ocorrência deste evento para esse subperíodo (Tabela 5). Isto ocorre pelo fato de que nesta fase há a maior demanda hídrica ao

longo de todo o ciclo da cultura, tendo em vista que as plantas atingem o índice de área foliar máximo e consequentemente o maior valor de coeficiente da cultura (K_c), coincidindo, na maioria das vezes, com o período de maior demanda atmosférica.

Corroborando com os dados médios apresentados anteriormente, os valores de probabilidade para o subperíodo R1-R5 mostraram-se bastante variáveis entre as datas de semeadura, não sendo possível identificar períodos de semeadura com maior ou menor risco de ocorrência de excesso hídrico, independentemente do GMR (Figura 11D, 12D, 13D). Essa oscilação, frequentemente observada nos gráficos de probabilidade, também ocorre em parte devido ao ajuste de funções de probabilidade diferentes em cada data de semeadura, ou mesmo não ter ocorrido ajuste de fdp, utilizando-se valores empíricos, o que podem gerar valores de probabilidade bastante distintos. De qualquer forma, o risco de ocorrência de quatro dias ou mais de excesso hídrico é superior a 50% em praticamente todas as datas de semeadura, o que já é suficiente para ocasionar redução na produtividade (GRIFFIN; SAXTON, 1988).

O subperíodo R5-R7 foi o que apresentou as menores diferenças entre as datas de semeadura e entre GMR (Figuras 11E, 12E, 13E). De maneira geral, há uma leve tendência de que as semeaduras realizadas a partir de 21 de dezembro apresentem os maiores valores de probabilidade de ocorrência de excesso hídrico.

Já para o subperíodo R7-R8, os maiores riscos foram verificados para semeaduras entre o final de novembro e início de dezembro, principalmente quando se observa os resultados para os GMR 6.9-7.3 e GMR 7.4-8.0 (Figuras 12F, 13F). Para o GMR 5.9-6.8, a semeadura de 21 de novembro foi a que apresentou o maior risco para esse subperíodo (Figura 11F).

Esses resultados não eram esperados em função de que as cultivares de soja pertencentes ao GMR 5.9-6.8 e semeadas em 21/out, por exemplo, chegarão ao estágio de início da maturação (R7) no final do mês de fevereiro, no qual a chuva média mensal é inferior a de março e principalmente a do mês de abril (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009). Já para as semeaduras realizadas no final do calendário 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. Uma possível explicação é a maior duração desse subperíodo nas semeaduras de novembro e sua redução acentuada nas semeaduras mais tardias (TRENTIN et al., 2013).

Para esses dois últimos subperíodos, os resultados encontrados para Pelotas são muito similares aos de Santa Maria, em que também se verifica uma tendência de maiores valores de probabilidade nas datas de semeadura simuladas em dezembro para o subperíodo R5-R7 (Figuras 14E, 15E, 16E) e principalmente nas semeaduras de 21/nov e 01/dez em R7-R8 (Figuras 14F, 15F, 16F). No caso de Pelotas, esses resultados podem ser explicados principalmente pela coincidência desses subperíodos com o mês de fevereiro, o qual apresenta a maior média de chuva anual nessa região.

Com relação ao subperíodo R1-R5 em Pelotas, além da maior frequência anual de ocorrência de excesso hídrico nas semeaduras de dezembro (Tabela 6), foi possível distinguir datas de semeadura com maiores riscos associados, atreladas ao GMR. Verificaram-se maiores valores de probabilidade, principalmente para os níveis de 2, 4 e 8 dias de excesso hídrico, nas semeaduras próximas de 11/dez para os GMR 5.9-6.8 e 6.9-7.3 e de 01/dez para o GMR 7.4-8.0, reduzindo o risco após essas datas. Dessa forma, com relação ao excesso hídrico, as datas de semeaduras mais indicadas para Pelotas ficam direcionadas ao mês de novembro pois há maior risco em outubro e em dezembro, respectivamente, para os subperíodos S-EM e R1-R5.

As semeaduras simuladas entre 21/set e 11/out foram as que apresentaram maiores probabilidades no subperíodo V2-R1 para os GMR 5.9-6.8 (Figura 14C) e 6.9-7.3 (Figura 15C), principalmente quando se observa os níveis de risco de pelo menos oito e 12 dias de excesso hídrico. Para o GMR 7.4-8.0 as duas primeiras e as duas últimas datas de semeadura do calendário foram as que apresentaram maiores valores de probabilidade para esse subperíodo (Figura 16C).

Embora os resultados sejam bastante semelhantes aos obtidos em Santa Maria, os valores de probabilidade para os subperíodos S-EM e EM-V2 foram, de maneira geral, superiores em Pelotas. Até 01/nov, o risco de ocorrer pelo menos oito dias de excesso hídrico é maior que 25% para o subperíodo S-EM, ou seja, em um a cada quatro anos, independentemente do GMR considerado (Figuras 14A, 15A e 16A). Isso provavelmente ocorreu devido ao menor saldo de radiação disponível nessa época em Pelotas - local de maior latitude - o que reduz o processo evaporativo e de aquecimento do ar e do solo, mantendo o solo com maior teor de umidade.

Figura 1411. Probabilidade de ocorrência de 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), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Piratini em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.

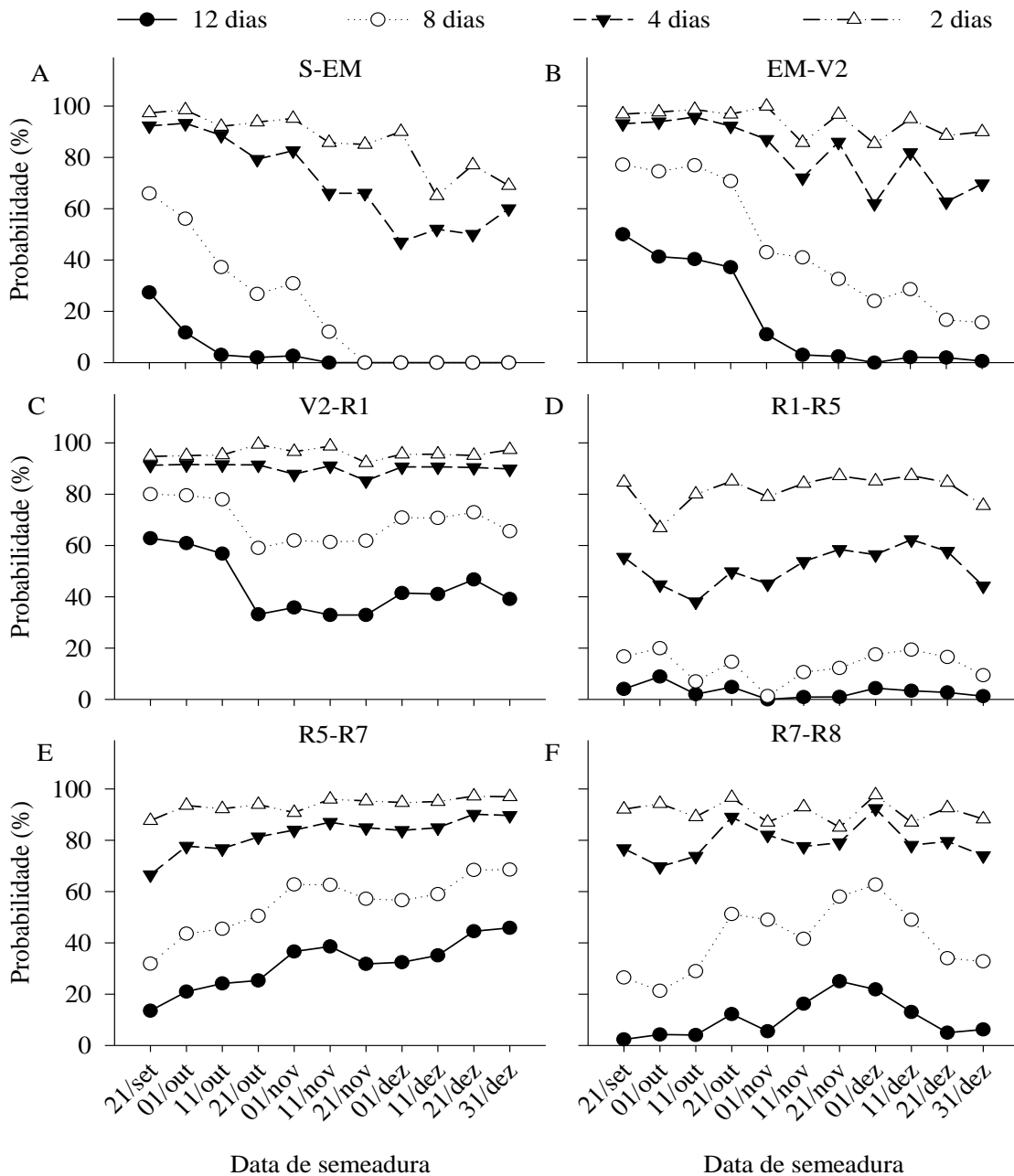


Figura 15. Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1), início 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 o solo Piratini em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.

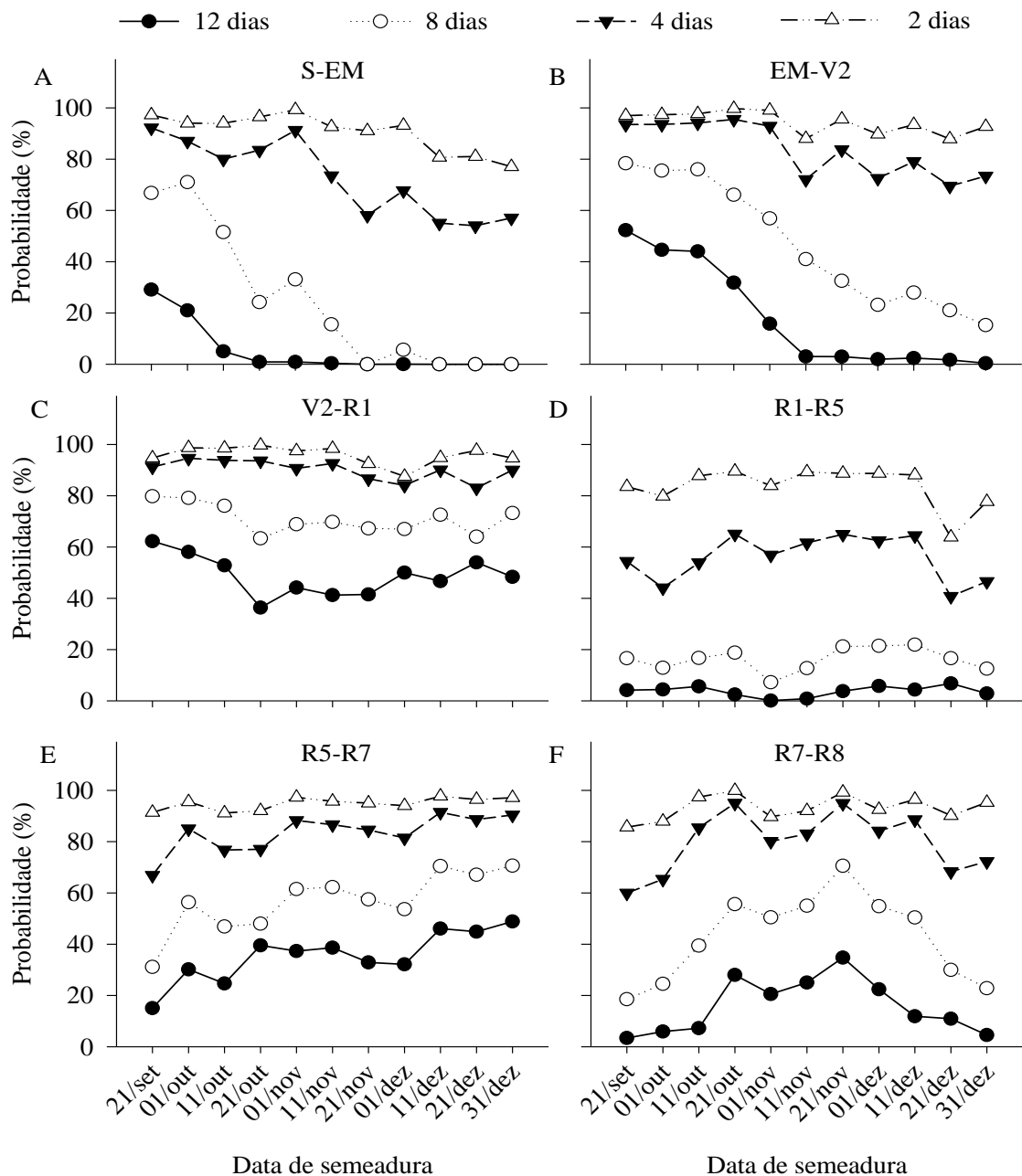
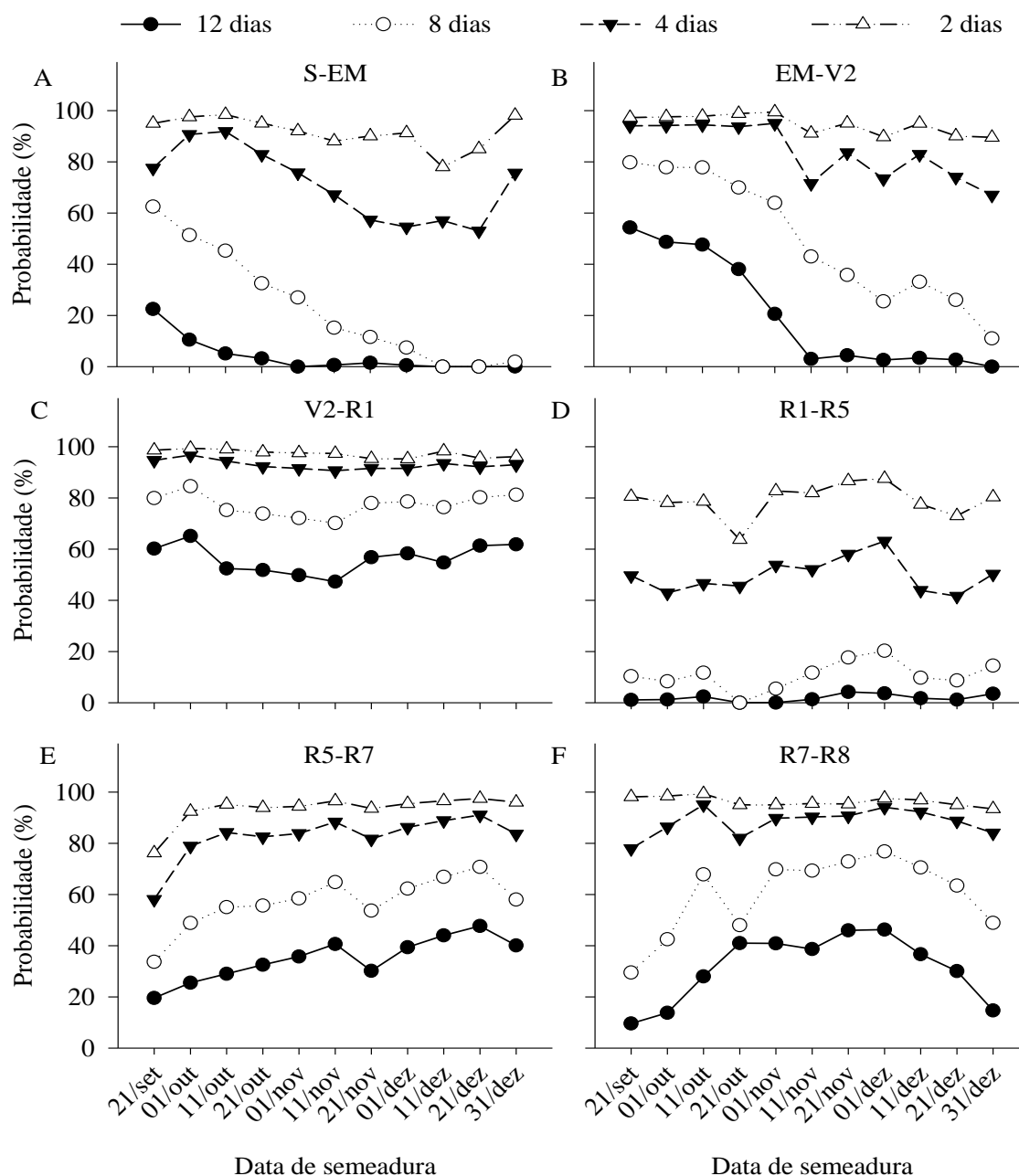


Figura 16. Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico igual ou maior que 2, 4, 8 e 12 dias acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), início 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 o solo Piratini em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.



Considerando o subperíodo EM-V2 de cultivares de GMR 5.9-6.8, o maior risco está atrelado às semeaduras realizadas até 21/out, em que se verificam os maiores valores de probabilidade (Figura 14B). O risco de ocorrência de 12 dias ou mais de excesso hídrico ficou

próximo de 40% para essas datas. Dentro desse subperíodo, as perdas podem ser maiores se o excesso ocorrer próximo ao estágio V2, pois coincide com o início do processo de nodulação realizado pelas bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, responsáveis pela FBN (BOARD, 2008). Observando os níveis de probabilidade de 4, 8 e 12 dias de excesso hídrico, verifica-se um maior risco nas semeaduras realizadas até 01/nov, considerando as cultivares dos GMR 6.9-7.3 e 7.4-8.0 em Pelotas (Figura 15B, 16B).

Para a cultura da soja, de maneira geral, verifica-se que o potencial de rendimento da cultura está atrelado à data de semeadura no Rio Grande do Sul. Em trabalho realizado por Zanon; Streck e Grassini (2016) verifica-se uma redução da produtividade em semeaduras realizadas após o dia 4 de novembro. Por outro lado, levando em consideração os resultados obtidos nesse trabalho quanto à ocorrência de excesso hídrico, as semeaduras realizadas até o início de novembro são as que apresentam maior risco.

Assim, para cultivos em terras baixas devem-se ponderar esses dois fatores, podendo-se optar em reduzir um pouco o potencial de produtividade, mas diminuindo substancialmente o risco de perdas por excesso hídrico. Deve-se considerar também o risco de déficit hídrico para os subperíodos e ciclo de desenvolvimento da soja. Além disso, é importante ponderar o nível de produtividade desejado, o qual está estritamente relacionado ao perfil do produtor, ou seja, se está iniciando na atividade ou está consolidado. No primeiro caso, semeaduras realizadas em dezembro seriam viáveis tendo em vista que o potencial de produtividade ainda é de aproximadamente 4 ton/ha (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016).

De maneira geral, tendo em vista que não há uma tendência marcante de aumento da precipitação pluvial no RS, não se espera aumento dos impactos negativos ocasionados pelo excesso hídrico para a cultura da soja em terras baixas. Rao et al. (2016) realizaram uma análise de tendência de chuva para o Brasil utilizando dados do Climate Research Center (CPC) e também do INMET compreendidos entre 1979 e 2011, em que verificaram uma tendência de aumento da chuva anual na ordem de 10 mm para as regiões central e fronteira oeste e de 20 mm para a região sul do RS. Porém, esses resultados são contrastantes aos encontrados por Silva et al. (2010), em que verificaram uma pequena tendência de redução da chuva na região da fronteira oeste do RS. Para Santa Maria, em uma análise da série histórica de 1912 até 2004, Buriol et al. (2006), realizaram uma análise de tendência secular pelo método dos quadrados mínimos e não verificaram tendência linear ($p=0,25$) nem tendência parabólica ($p=0,15$), concluindo que a série é estacionária para os totais anuais de chuvas.

Com relação ao déficit hídrico durante o ciclo total de desenvolvimento da soja, verifica-se uma tendência de redução das primeiras para as últimas datas de semeadura em

Santa Maria (Figura 17A, 17C, 17E) e em Pelotas (Figura 17B, 17D, 17F). Semeaduras realizadas até 01/11 foram as que apresentaram maior número de valores extremos. Os maiores valores de déficit hídrico foram verificados nos anos agrícolas de 1985/86 e 2011/12 em que, por exemplo, para a semeadura realizada em 11/out os valores acumulados foram de 418 e 316 mm, respectivamente. Além disso, diferiram significativamente das demais, apresentando um déficit hídrico acumulado acima de 159 mm, independentemente do GMR considerado para Santa Maria.

Isso ocorre principalmente pela maior duração do ciclo e pela coincidência do período de maior demanda atmosférica com a maior demanda hídrica pelas plantas de soja nas semeaduras precoces. Trentin (2013) obteve resultados semelhantes em que a lâmina de irrigação média e o número de irrigações foram maiores nas primeiras datas de semeadura.

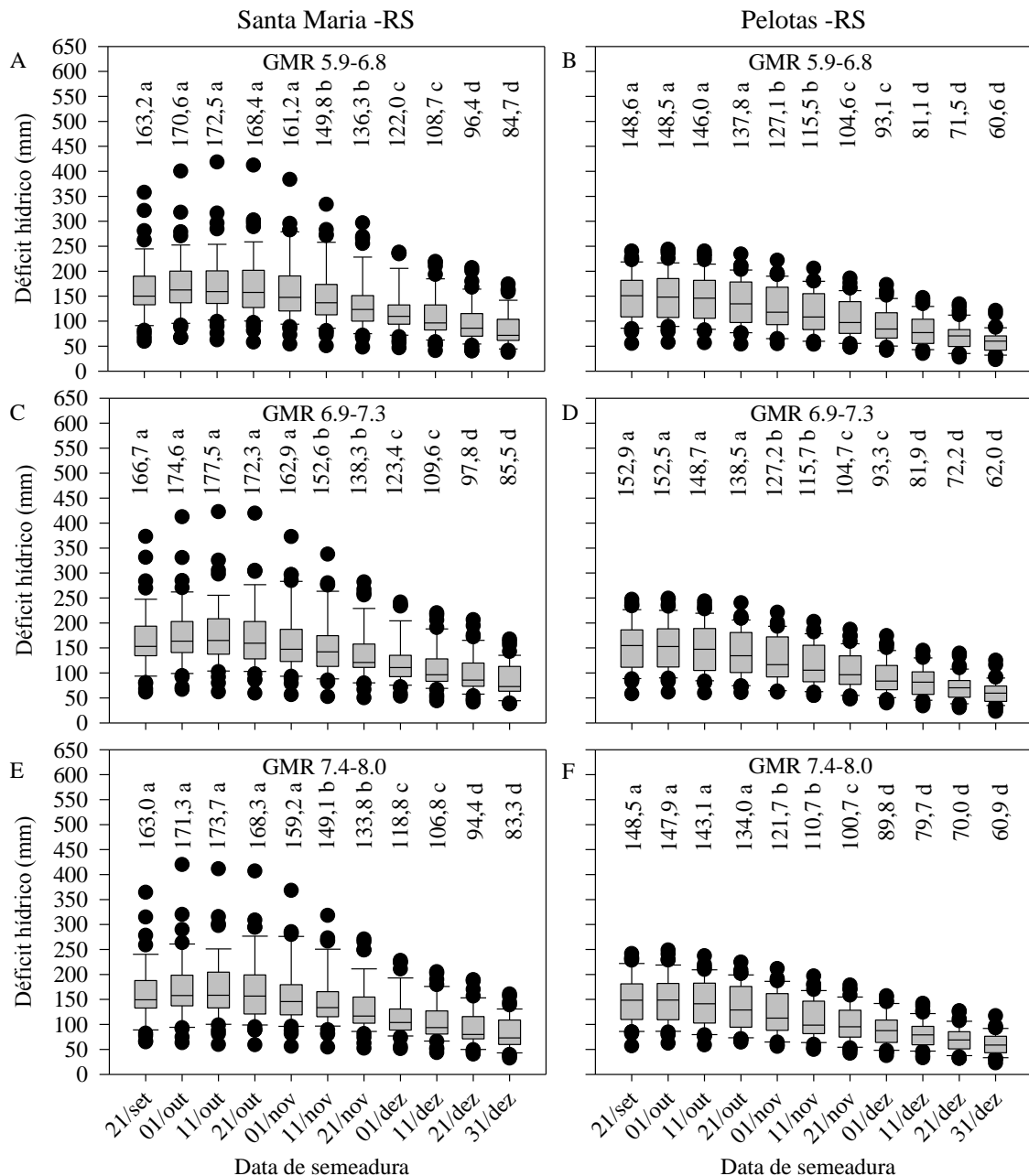
Assim, espera-se que a soja tenha um suprimento hídrico mais adequado, em Planossolo na região de abrangência de Santa Maria em semeaduras realizadas a partir de 11/11. Esses resultados vão ao encontro dos demonstrados por Battisti et al. (2013) em que há um ganho de produtividade com o atraso da semeadura de 01/10 para 21/12, em função da maior eficiência climática, ou seja, menor índice de redução de produtividade em função do déficit hídrico.

Apesar de não apresentar a maior duração total do ciclo de desenvolvimento, a magnitude do déficit hídrico foi um pouco superior para o GMR 6.9-7.3 em relação aos demais GMR (Figura 17). Isso ocorreu devido à duração do subperíodo de maior demanda atmosférica (R1-R5) ser menor para as cultivares de GMR 7.4-8.0 (Capítulo 1) e também foi verificado por Trentin (2013) em que houve maior necessidade de irrigação para o GMR 6.9-7.3.

De maneira geral, a magnitude da deficiência hídrica obtida para Pelotas foi menor do que em Santa Maria, assim como houve menores valores extremos. Os maiores valores de déficit hídrico acumulado no ciclo da soja ficaram próximos de 250 mm em Pelotas (Figura 17B, 17D, 17F).

Semeaduras realizadas a partir de 01/11 apresentaram menor déficit hídrico em relação às semeaduras mais precoces em Pelotas (Figura 17). Por outro lado, Zanon; Streck e Grassini (2016) relatam que os dois principais fatores que governam a produtividade da soja são o suprimento de água e o coeficiente fototérmico (Q), principalmente entre os estágios R3 e R7 da soja (Q_{R3-R7}). Porém, o Q_{R3-R7} reduz à medida que se avança no calendário de semeadura, o que diminui o potencial de rendimento da soja (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016).

Figura 1712. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) ao longo do ciclo da cultura da soja considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as diferentes datas de semeadura simuladas para o solo Vacacaí, em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS (A, C e E) e para o solo Piratini de 1971 a 2017, em Pelotas, RS (B, D e F).



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

A resposta ao Q_{R3-R7} é mais pronunciada em condição irrigada do que não irrigada, o que demonstra a influência da disponibilidade hídrica na produtividade da cultura (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016). Assim, deve-se buscar um equilíbrio entre a adequada

disponibilidade hídrica e do coeficiente fototérmico, de forma que se obtenham as maiores produtividades associadas aos menores riscos de perdas de produtividade, tanto em função da ocorrência de excesso hídrico, já comentado anteriormente, quanto de déficit hídrico no ciclo e nos subperíodos, o que será discutido na sequência.

Cabe ressaltar que os efeitos nas plantas devido à ocorrência de déficit hídrico em terras baixas são semelhantes ou maiores do que em terras altas, tendo em vista o menor aprofundamento das raízes. Além disso, o ciclo da cultura em terras altas e em terras baixas é semelhante (ZANON et al., 2015b). O uso do sistema plantio direto e manutenção da palhada sobre a superfície do solo podem atuar na redução desses efeitos (RIBEIRO et al., 2016), porém, utilizadas de forma conjunta com técnicas de drenagem visando reduzir o excesso hídrico.

Com relação ao estabelecimento da cultura da soja, verificou-se maior déficit hídrico histórico para os subperíodos S-EM e EM-V2 em sementeiras realizadas a partir do início de novembro independentemente do GMR (Figura 18, 19 e 20). Tendência similar foi obtida para a cultura do girassol em Santa Maria, em que o maior nível de deficiência hídrica ocorreu entre 16 de novembro e 01 de janeiro (MALDANER, 2012). A exceção foi verificada para o subperíodo S-EM para o GMR 7.4-8.0 (Figura 20A), em que os maiores valores foram obtidos para 11 e 21 de novembro.

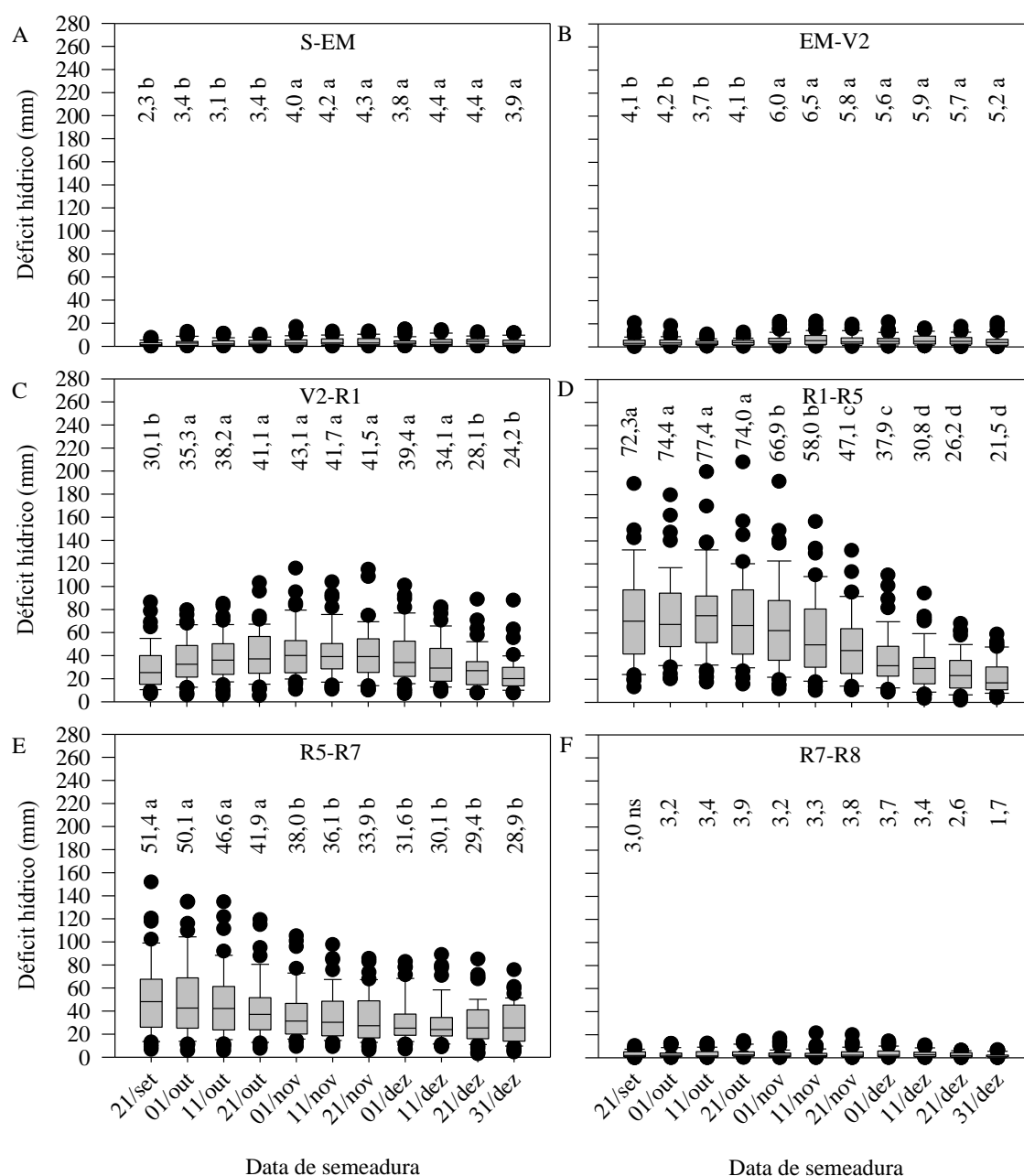
Na realidade, não se verifica diferença de duração do subperíodo S-EM em função do GMR, o que resultaria em valores idênticos considerando a mesma data de sementeira. A diferença obtida ocorre por se tratar de um balanço hídrico sequencial, em que a umidade inicial do solo no momento da simulação da sementeira é diferente para cada data e para cada GMR em cada ano da série histórica. Esse efeito tende a ser minimizado para os subperíodos posteriores, não influenciando nos demais resultados.

Deve-se considerar também, que os efeitos adversos do excesso hídrico são mais difíceis de serem gerenciados por tomada de decisão no momento de sementeira. Em contrapartida, ocorrendo déficit hídrico, pode-se aguardar o umedecimento do solo pela chuva para então realizar a sementeira, considerando também a previsão para os próximos 10 dias, disponibilizado pelo serviço meteorológico.

Considerando um ano agrícola específico, o momento da sementeira é definido mais em função da disponibilidade de umidade real no solo do que em valores médios obtidos a partir de uma série histórica. De qualquer forma, sementeiras realizadas mais próximas do solstício de verão tendem a apresentar maior risco de déficit hídrico em função da maior

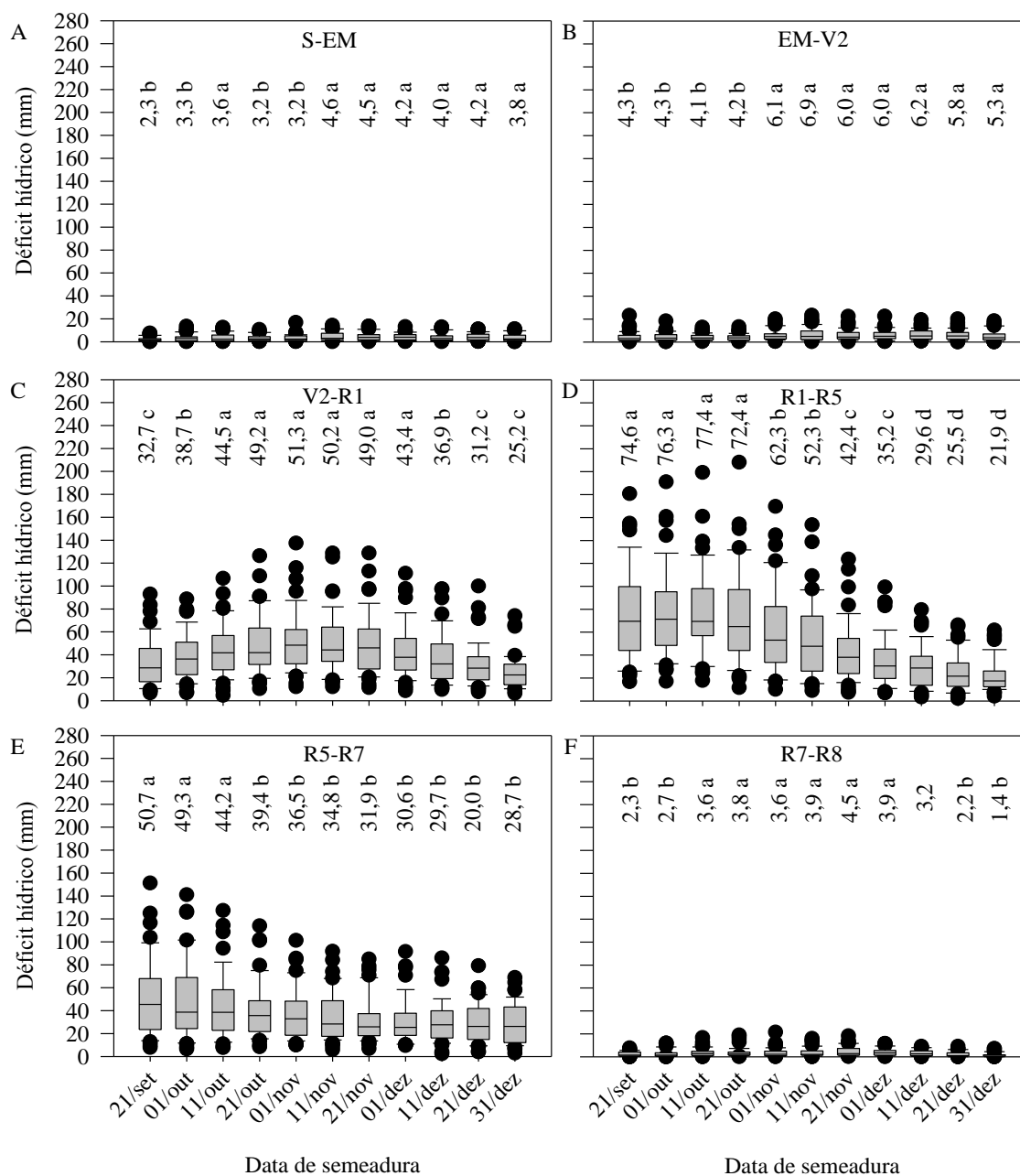
disponibilidade de energia (saldo de radiação), utilizada para, dentre outros processos, o aquecimento do solo e a evaporação da água do solo.

Figura 18. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) 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 o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.



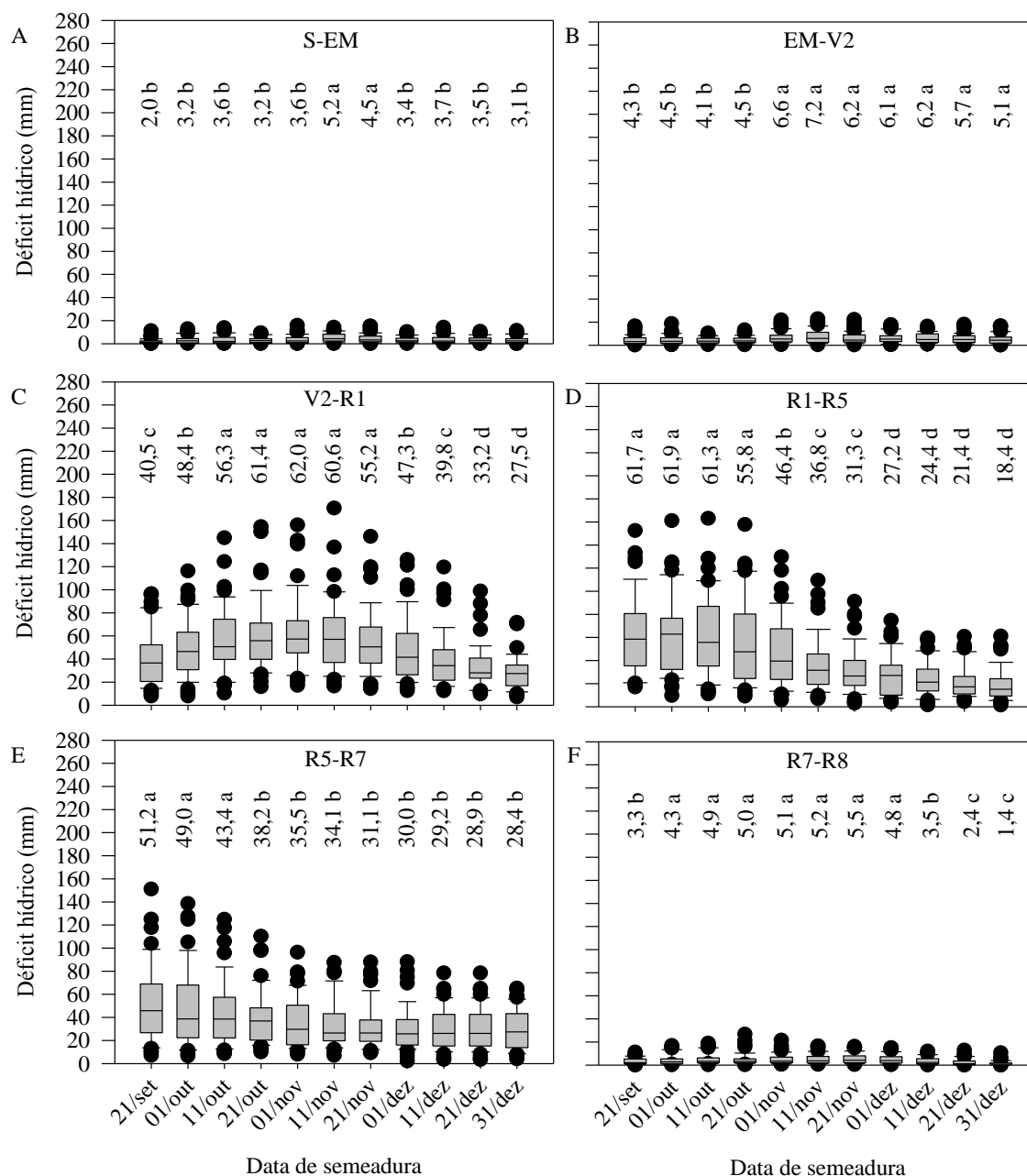
*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 1913. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) 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 o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 20. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) 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 o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

A semeadura simulada de 01/11 foi a que apresentou maior déficit hídrico para o subperíodo V2-R1 em Santa Maria, em que o acumulado médio foi de aproximadamente 43, 51 e 62 mm, para os GMR 5.9-6.8 (Figura 18), 6.9-7.3 (Figura 19) e 7.4-8.0 (Figura 20),

respectivamente. Houve redução nos valores de déficit hídrico, tanto em sementes simuladas antes, quanto depois dessa data de semeadura, independentemente do GMR. No entanto, esse subperíodo é menos crítico com relação ao déficit hídrico, tendo em vista que a maior fração da água consumida durante o ciclo da soja ocorre entre os estágios R3-R5 (KARAM et al., 2005). Portanto, o mesmo deve ser considerado com menor peso na definição das datas de semeadura que resultem em menor risco climático para essa cultura em Planossolo Háplico.

A maior magnitude do déficit hídrico nas sementes precoces pode ser explicada pela coincidência do período de maior exigência de água pela planta com o final de novembro e os meses de dezembro e janeiro, em que a demanda da atmosfera por vapor de água é mais elevada em Santa Maria (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009) e o déficit hídrico climático é maior (CARDOSO, 2005), decorrente também da diminuição da precipitação pluviométrica, principalmente em novembro e dezembro, devido ao fenômeno La Niña (BERLATO; FONTANA, 2003). Os menores valores obtidos para o GMR 7.4-8.0 são função da menor duração do subperíodo R1-R5 em relação aos demais GMR (TRENTIN et al., 2013).

Quanto ao período de enchimento de grãos, compreendido entre os estágios R5 e R7, verifica-se uma tendência de redução nos valores de déficit hídrico da primeira para a última data de semeadura, independentemente do GMR (Figuras 18, 19 e 20). Nesse subperíodo é fundamental que o déficit hídrico seja o menor possível para que não ocorra redução no peso médio de grãos, que é um influente componente de produtividade (ANDRIANI et al., 1991). A partir de início de novembro os valores extremos de déficit hídrico nesse subperíodo são menores que 100 mm e os valores médios são significativamente menores do que para a soja semeada em datas anteriores (Figuras 18, 19 e 20).

Considerando os dois subperíodos mais críticos na fase reprodutiva da soja (R1- R5; R5-R7), pode-se inferir que a semeadura deve ser realizada de 01/nov a 01/dez, sendo as datas de 11/nov e 21/nov as preferenciais. Para esse período de semeadura de 01/nov a 01/dez se verifica que o subperíodo de maturação (R7-R8) ocorre no período de maiores valores médios de déficit hídrico, o que favorece a maturação e a colheita. Nas três datas de semeadura mais tardias há uma tendência de ocorrer déficit hídrico significativamente menor (Figuras 18, 19 e 20) e excesso hídrico maior, inferindo-se mais anos com colheita dificultada.

Os resultados relativos a déficit hídrico nos diferentes subperíodos de desenvolvimento da soja em Pelotas (Figuras 21, 22 e 23) seguem a tendência dos resultados obtidos para Santa Maria (Figuras 18, 19 e 20), embora com menor intensidade e com

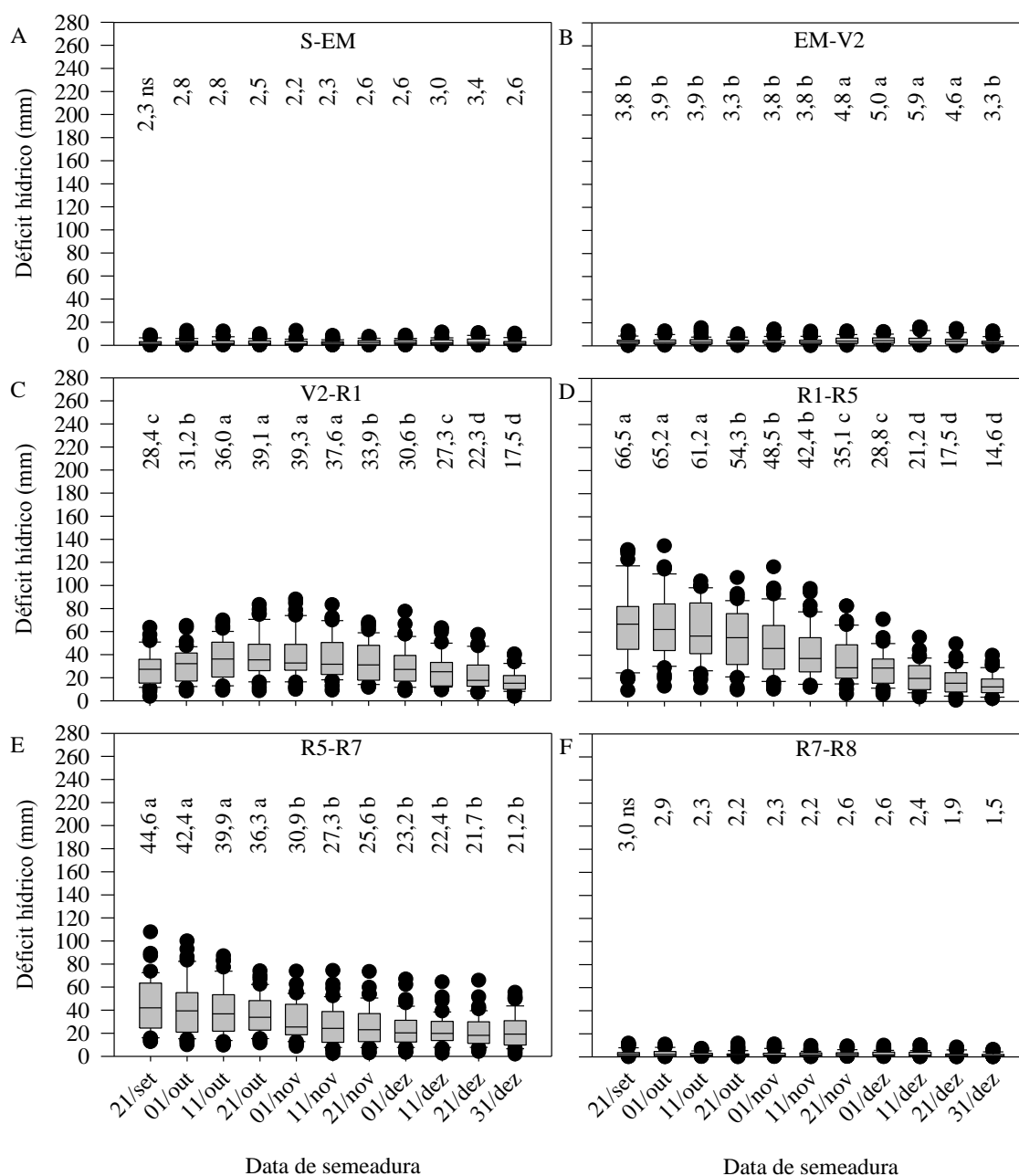
algumas particularidades a serem consideradas. Para qualquer dos três GMR não se verificam diferenças de déficit hídrico no subperíodo S-EM entre as 11 datas de semeadura, porém para o subperíodo EM-V2 o déficit foi significativamente maior, mesmo que em apenas 1 mm, para semeaduras a partir de 21/nov até 21/dez.

Em Pelotas, em todos os anos existe o risco extremo de ocorrer no mínimo 10 a 20 mm de déficit hídrico no subperíodo vegetativo V2-R1 para os três GMR de cultivares de soja (Figuras 21, 22 e 23). Além disso, os valores médios e extremos máximos nesse subperíodo são maiores para semeaduras de 11/out a 11/nov. No entanto, para cultivares de GMR 5.9-6.8 e 6.9-7.3, os valores médios não ultrapassam 40 mm e 46 mm, respectivamente, e os máximos absolutos são menores que 100 mm, o que permite inferir que podem ser tolerados pelas plantas de soja nesse subperíodo menos crítico (NUNES et al., 2016), pelo menos na maioria dos anos. Assim, para esses dois GMR, pode-se dar menos importância ao déficit hídrico nesse subperíodo, dando maior peso aos resultados obtidos para os subperíodos mais críticos.

Considerando que para o subperíodo vegetativo V2-R1 das cultivares de GMR 7.4-8.0 os valores médios e os máximos absolutos são maiores, mas apresentam decréscimo significativo de 21/out a 21/nov e considerando que até 11/nov o déficit hídrico ainda é um dos menores no subperíodo EM-V2, infere-se que a programação para o início da semeadura poderia ser datada em 11/nov, possibilitando esperar as melhores condições de umidade no solo em uma previsão de tempo mais favorável pelos 10 dias seguintes, e ainda assim, estaria realizando a semeadura em uma das datas de menor risco e mais promissoras de condições favoráveis para a obtenção de alta produtividade.

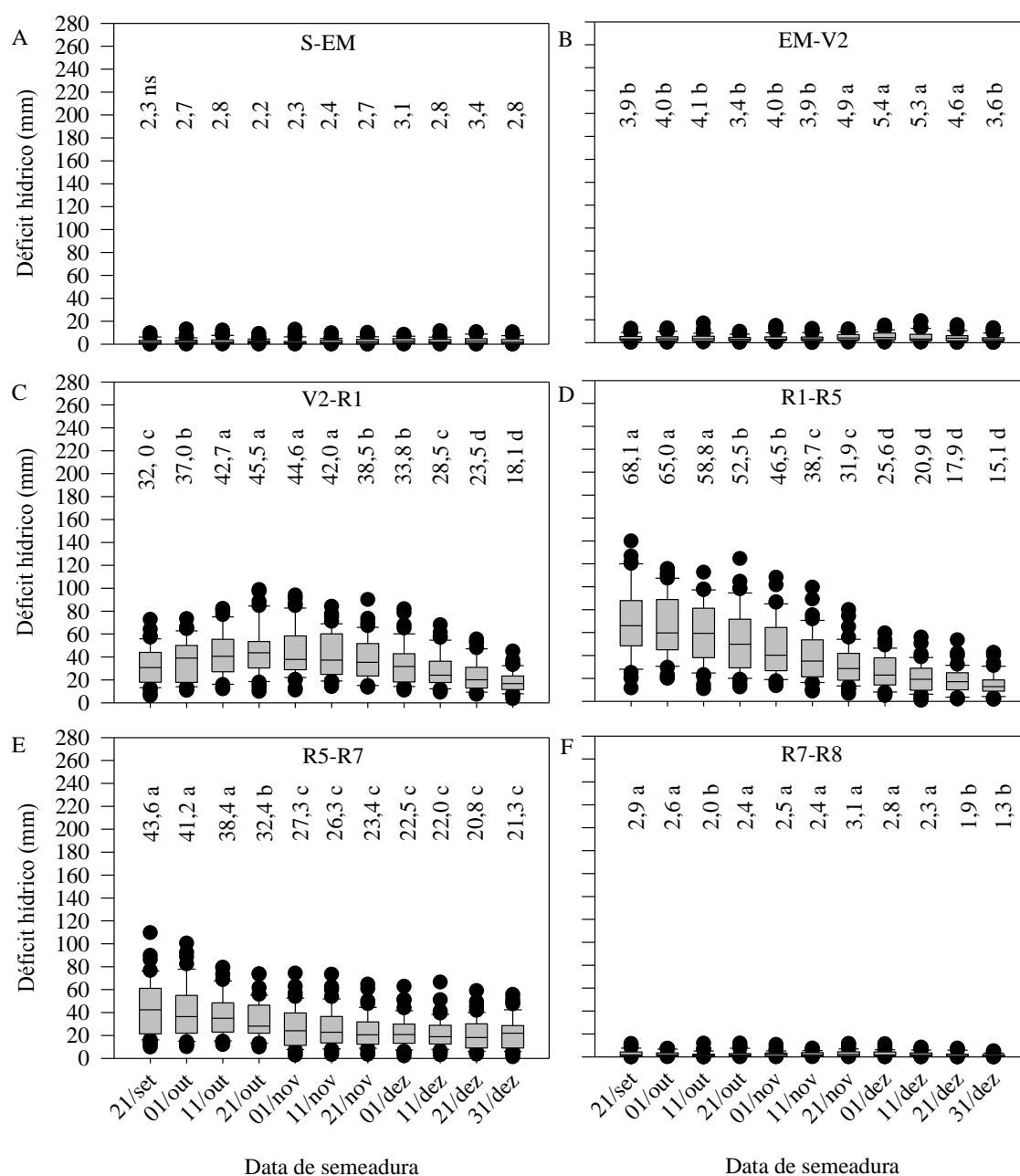
Os resultados de déficit hídrico obtidos para os dois subperíodos reprodutivos mais críticos (R1- R5 e R5-R7) também permitem inferir que as datas de semeadura de 11/nov e 21/nov são as mais favoráveis para Pelotas, por apresentarem os menores déficits hídricos dentro de uma janela de alto potencial de rendimento. Os valores médios não alcançam 40 mm em nenhum dos dois subperíodos para os três GMR para essas duas datas de semeadura, com exceção da semeadura de 11/nov para o GMR 5.9-6.8 (Figura 21D). Vale lembrar que para Pelotas, nessas duas datas, o excesso hídrico no subperíodo de maturação (R7-R8) é menor do que para semeaduras mais tardias, o que diminui o risco de perdas na colheita.

Figura 21. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 5.9-6.8, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.



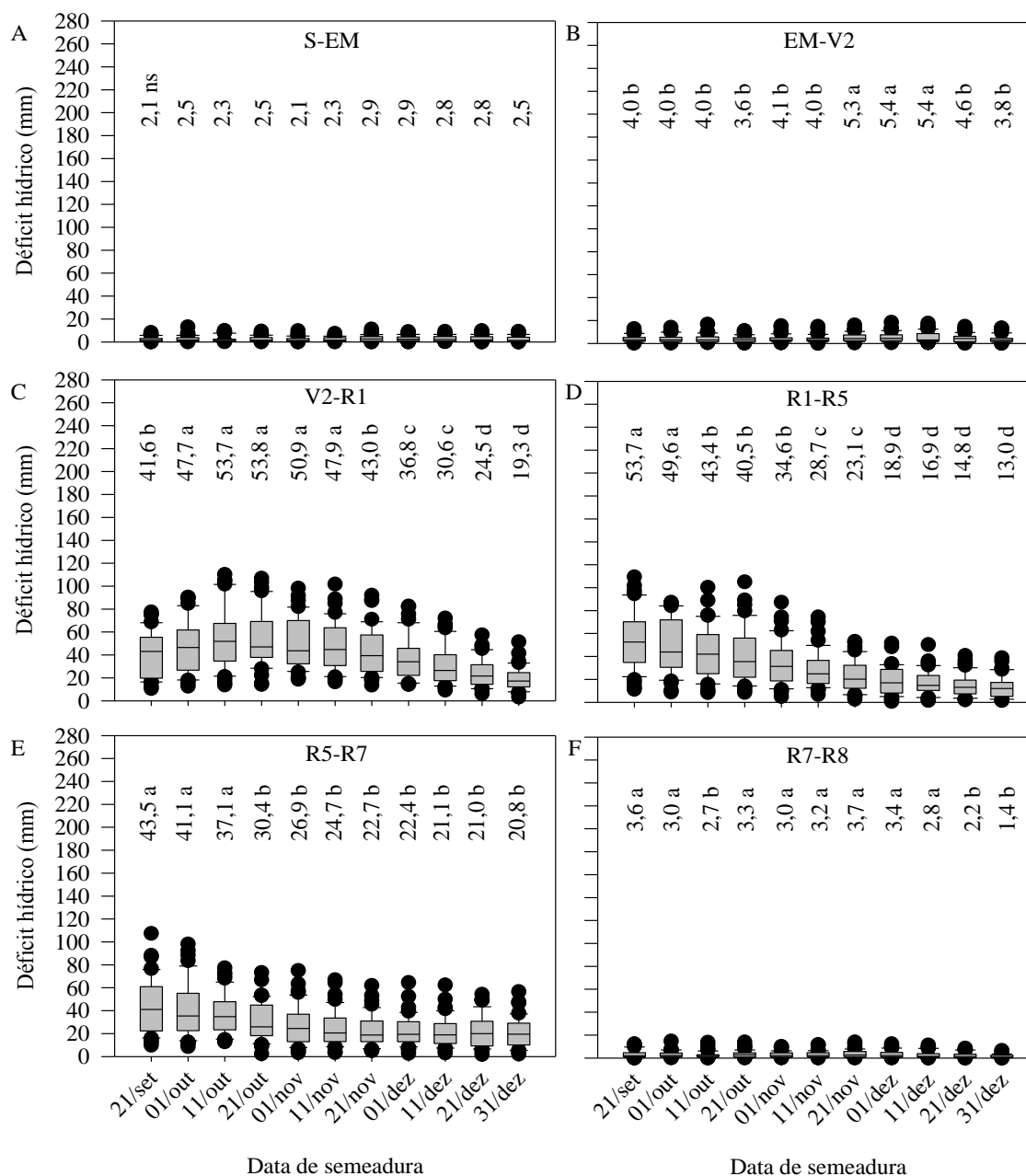
*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 22. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 6.9-7.3, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Figura 23. Variabilidade interanual e déficit hídrico médio (mm) 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 Piratini, considerando o grupo de maturidade relativa (GMR) 7.4-8.0, para as diferentes datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.



*Médias seguidas de letras iguais, dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

Verificam-se maiores valores de déficit hídrico no subperíodo R1-R5 para as cultivares de GMR 5.9-6.8 (Figura 21D) e 6.9-7.3 (Figura 22D) em relação as cultivares de GMR 7.4-8.0 (Figura 23D). Por outro lado, para o período vegetativo (V2-R1) ocorre o

inverso, em que foram obtidos valores médios acima de 50 mm para semeaduras entre 11/10 e 01/11 para o GMR 7.4-8.0 (Figura 23C). Analisando os resultados isoladamente para o período reprodutivo, a recomendação mais plausível seria para o uso de cultivares mais tardias em terras baixas, porém as mesmas tem baixa frequência de utilização nesse ambiente (ZANON et al., 2015b), tendo em vista a maior duração do ciclo, em que as plantas de soja ficam mais propensas a outros estresses, tais como excesso hídrico e ocorrência de pragas e doenças. Além disso, as plantas das cultivares de soja do GMR acima de 7.4 alcançarão a maturação fisiológica em períodos do ano com maior risco de excesso hídrico e de enchente no caso de áreas próximas de rios, principalmente se semeadas a partir do início de dezembro, dificultando assim a colheita da soja.

Com relação ao subperíodo R5-R7, não se verificam grandes diferenças na magnitude do déficit hídrico entre os três GMR para Pelotas e, assim como para Santa Maria, os valores de déficit hídrico são maiores para as primeiras datas de semeadura, diminuindo para as semeaduras realizadas em dezembro. De maneira geral, observam-se menores valores médios e absolutos de déficit hídrico em Pelotas do que em Santa Maria.

De maneira geral, o risco de ocorrência de déficit hídrico ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja é maior para Santa Maria em relação à Pelotas (Figura 24). Pode-se afirmar que, independentemente do GMR, no mínimo 50 mm de déficit hídrico são passíveis de ocorrer em praticamente todos os anos no ciclo da soja, com exceção das semeaduras de 21/dez e 31/dez em Santa Maria (Figura 24A, 24C, 24E) e a partir de 01/dez em Pelotas (Figura 24B, 24D, 24F), em que há redução dos valores de probabilidade.

Considerando o nível de risco de 75 mm, verifica-se uma redução da probabilidade de ocorrência de déficit hídrico no ciclo da soja a partir de 21/nov e 01/nov para Santa Maria e Pelotas, respectivamente (Figura 24). Resultados semelhantes foram obtidos por Nied et al. (2005) para a cultura do milho em que houve maior deficiência hídrica durante o ciclo de desenvolvimento para semeaduras realizadas entre 01 de outubro e 15 de novembro em Santa Maria. Silva et al. (2011) verificaram que a maior necessidade de irrigação para o feijoeiro ocorre em semeaduras realizadas na primeira quinzena de novembro, no período de safra.

A semeadura simulada em 11/out foi a que apresentou o maior risco de ocorrência de pelo menos 100 e 150 mm para todos os GMR para o solo Vacacaí, na região de abrangência de Santa Maria (Figura 24A, 24C, 24E). Há uma redução do risco nas semeaduras mais precoces e nas semeaduras posteriores a 11/out, com acentuada diminuição dos valores de probabilidade a partir de 01/dez, principalmente quando se observa a ocorrência de 100 mm ou mais de déficit hídrico no ciclo.

Figura 24. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 50, 75, 100 e 150 mm 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 o solo Vacacaí (A, C e E) e Piratini (B, D e F), considerando onze datas de semeadura simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017 em Santa Maria e 1971 a 2017 em Pelotas, respectivamente.

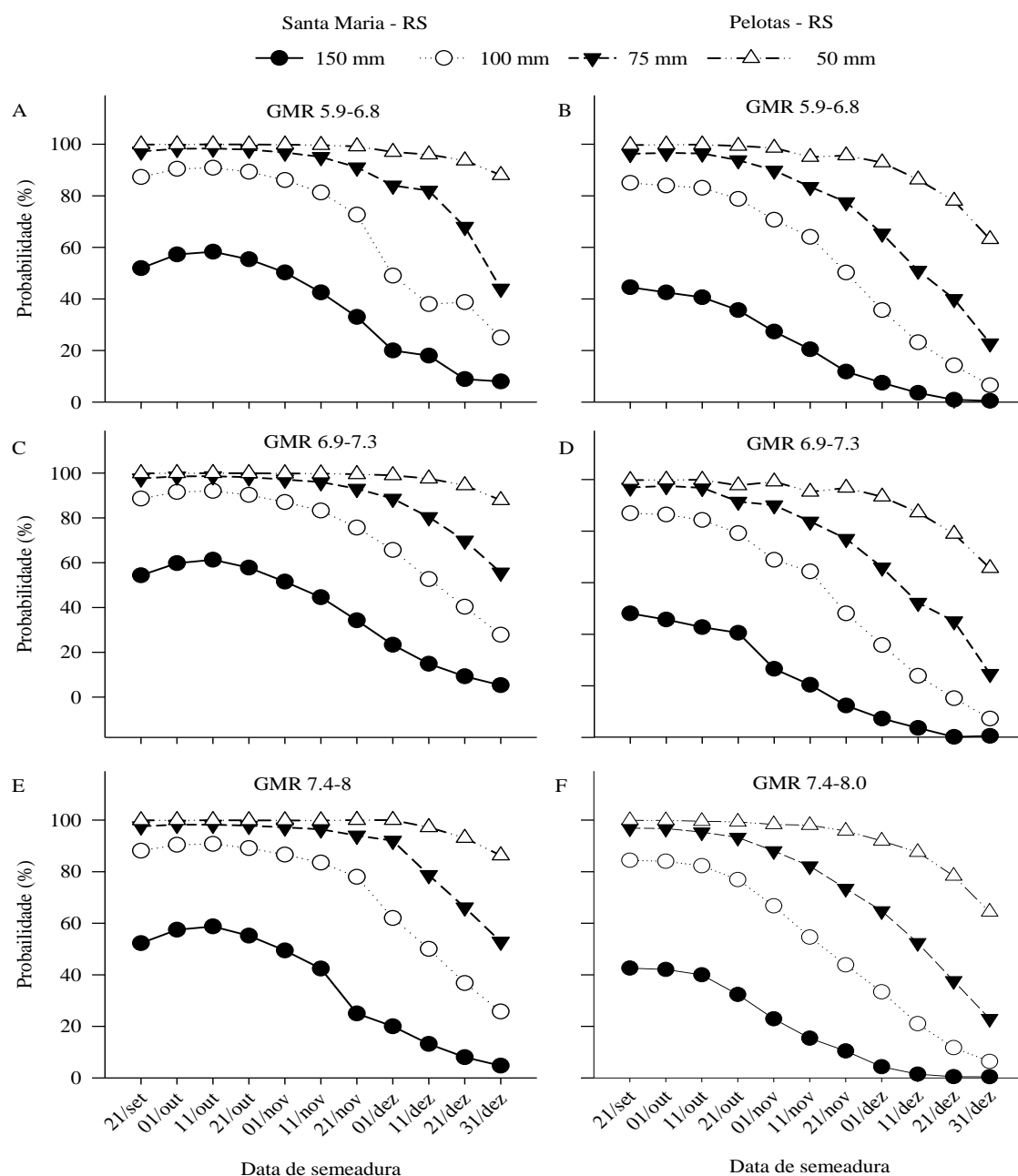


Figura 2514. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí, em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.

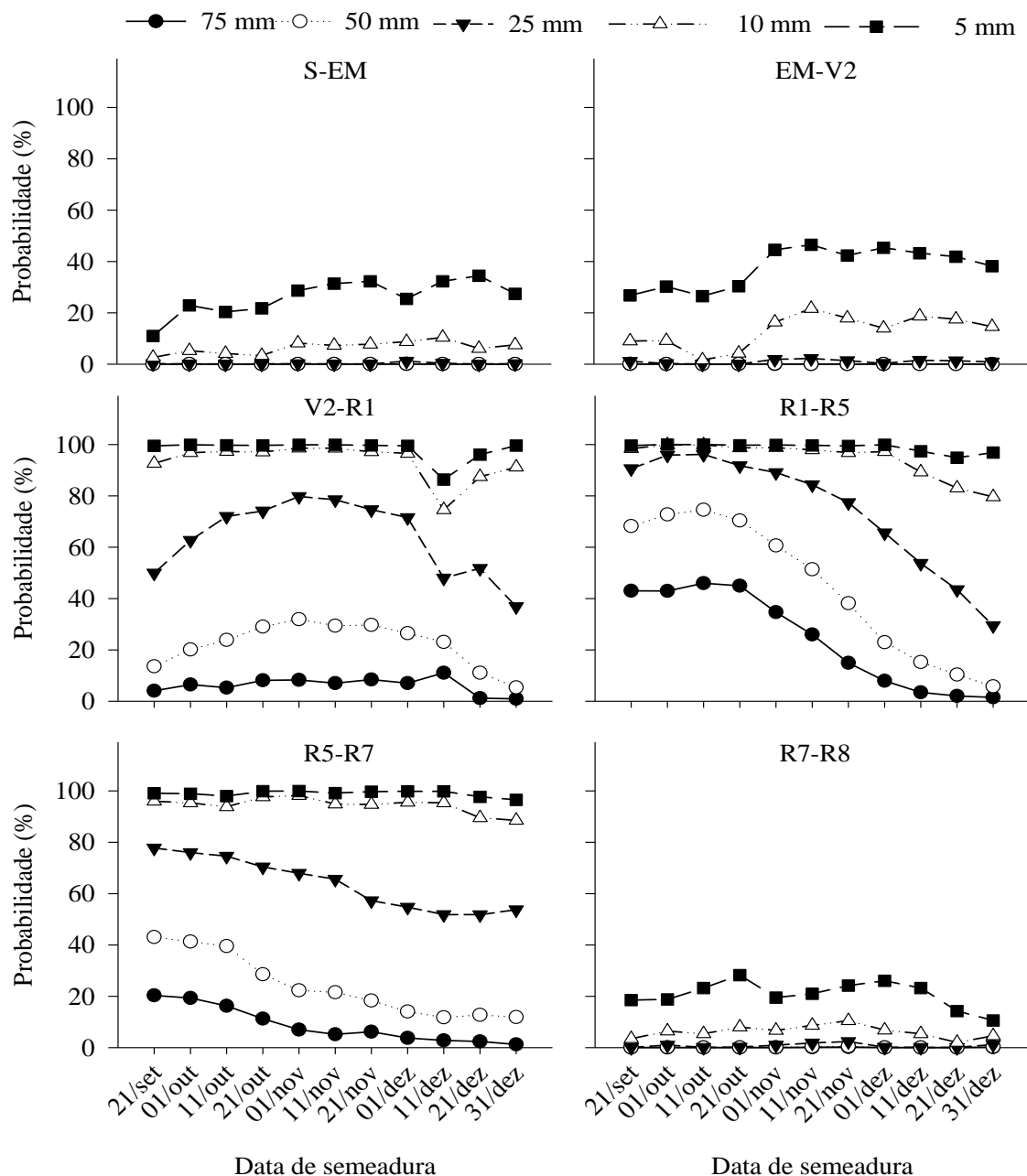
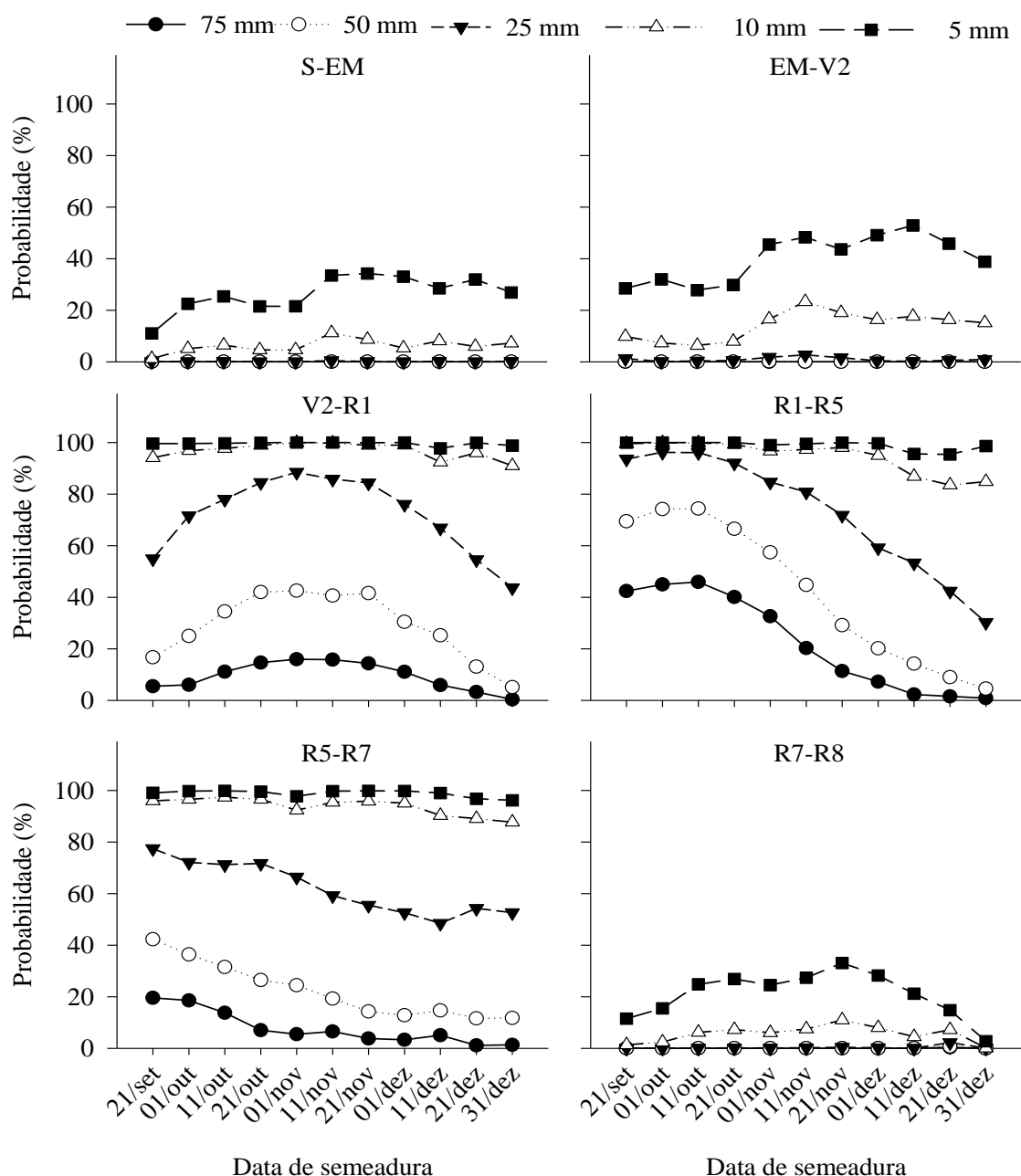


Figura 2615. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí, em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.



Considerando os resultados obtidos para Pelotas, verifica-se uma redução gradativa do risco de ocorrência de 100 e 150 mm da primeira (21/set) para a última (31/12) data de semeadura, sendo que os maiores valores de probabilidade foram obtidos para as semeaduras entre 21/set e 21/out. A partir de 11/dez, o risco de ocorrência de 150 mm ou mais de déficit

hídrico é praticamente nulo para todos os GMR (Figura 24B, 24D, 24F), o que não havia sido verificado para Santa Maria. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Cunha et al. (2001), principalmente para a Metade Sul do RS, em que sementeiras realizadas até 15 de novembro são as que apresentam maior probabilidade de perda de potencial de produtividade.

Assim como para os resultados obtidos para os valores médios de déficit hídrico no subperíodo S-EM, o risco de ocorrência é maior para as sementeiras realizadas próximas do solstício de verão. A probabilidade de ocorrência de 5 mm ou mais de déficit hídrico nas diferentes datas de sementeira não é maior que 50% para Santa Maria (Figuras 25, 26 e 27) e 30% em Pelotas (Figuras 28, 29 e 30).

Com relação ao subperíodo EM-V2, a tendência também é semelhante, em que as sementeiras realizadas a partir de 01/nov apresentam maior risco, destacadamente para os níveis de risco de 5 e 10 mm, independentemente do GMR para Santa Maria. Já para Pelotas esses aumentos dos valores de probabilidade ocorrem a partir de 21/nov e, de maneira geral, apresentam menores valores absolutos.

Para Santa Maria, os valores de probabilidade de ocorrência de pelo menos 5 e 10 mm no subperíodo V2-R1 se aproximam de 100% em todas as datas de sementeira de todos os GMR, com exceção da sementeira simulada de 11/dez para o GMR 5.9-6.8 (Figura 26). Nesse caso específico, a fdp ajustada foi a exponencial ao contrário das sementeiras anteriores em que a fdp gama foi a que melhor obteve melhor ajuste, o que gerou essa variação abrupta nos valores de probabilidade estimados. O mesmo ocorreu para a sementeira de 21/dez simulada em Pelotas para o GMR 6.9-7.3 (Figura 29). Além disso, nesse local, nas sementeiras de 21/dez e 31/12 há uma leve redução da probabilidade de ocorrência de 10 mm ou mais de déficit hídrico tanto para o GMR 5.9-6.8 (Figura 28) quanto GMR 7.4-8.0 (Figura 30).

A diferenciação das datas de sementeira e GMR com menor risco associado pode ser realizada avaliando os níveis de risco de déficit hídrico acima de 25, 50 e 75 mm, em que a sementeira de 01/nov e o GMR 7.4-8.0 (Figura 27) foram os que apresentaram a maior probabilidade de déficit hídrico para o subperíodo V2-R1, em Santa Maria. Porém, pode-se delimitar uma janela de sementeira com alto risco associado, compreendida entre 11/out e 01/dez para o GMR 5.9-6.8 (Figura 25) e 11/out e 21/nov para os GMR 6.9-7.3 (Figura 26) e 7.4-8.0 (Figura 27).

Resultados semelhantes para V2-R1 foram obtidos para Pelotas, porém com menor magnitude dos valores de probabilidade, o que evidencia a menor ocorrência de déficit hídrico em comparação com Santa Maria. Há uma redução acentuada do risco de ocorrência de déficit hídrico a partir de 21/nov para todos os GMR (Figura 28, 29 e 30).

Figura 167. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1), 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 o solo Vacacaí, em onze datas de semeadura simuladas de 1968 a 2017, em Santa Maria, RS.

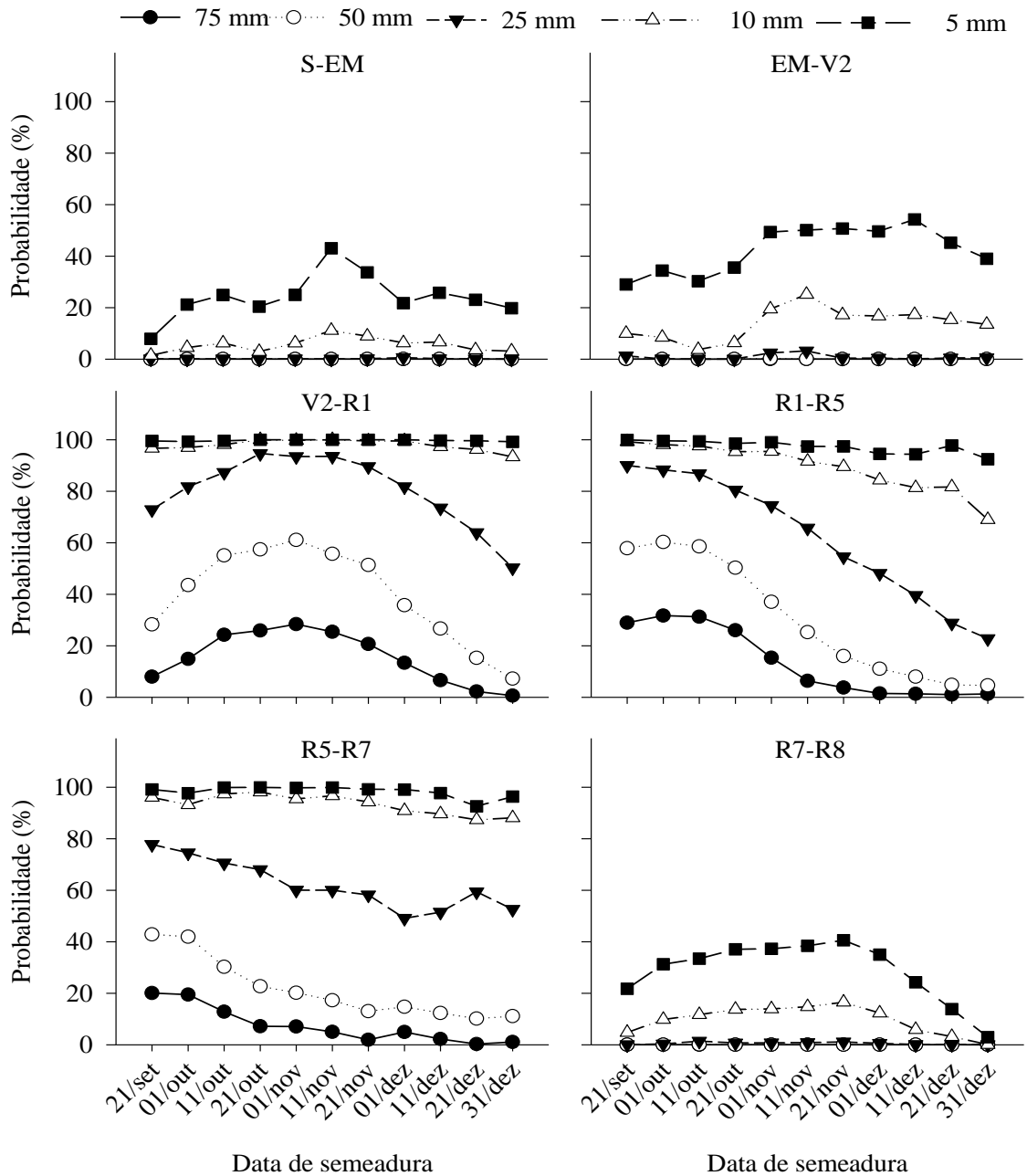


Figura 178. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja: sementeira - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), 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 o solo Piratini, em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.

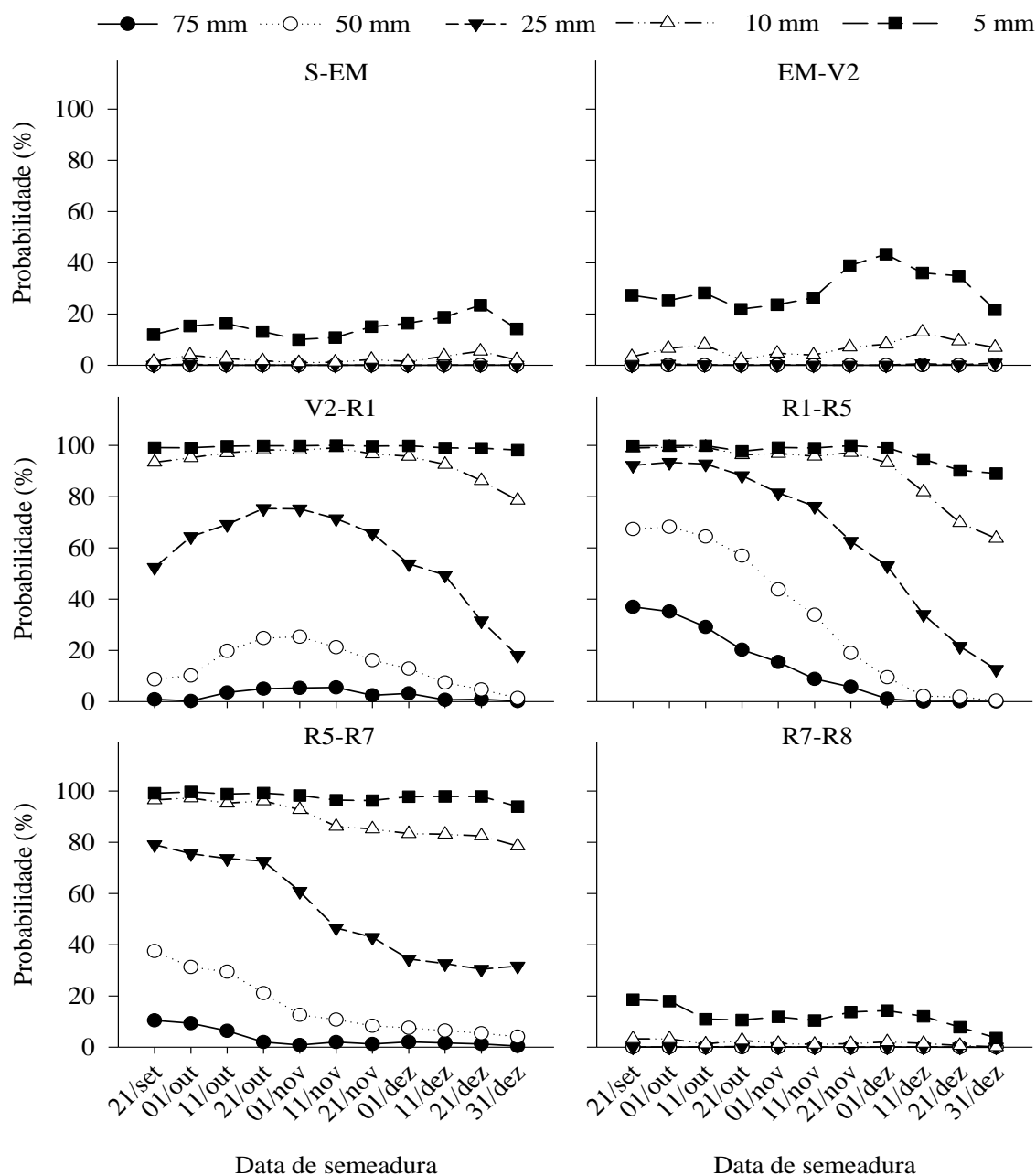


Figura 29. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada – início da floração (V2-R1), início 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 o solo Piratini, em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.

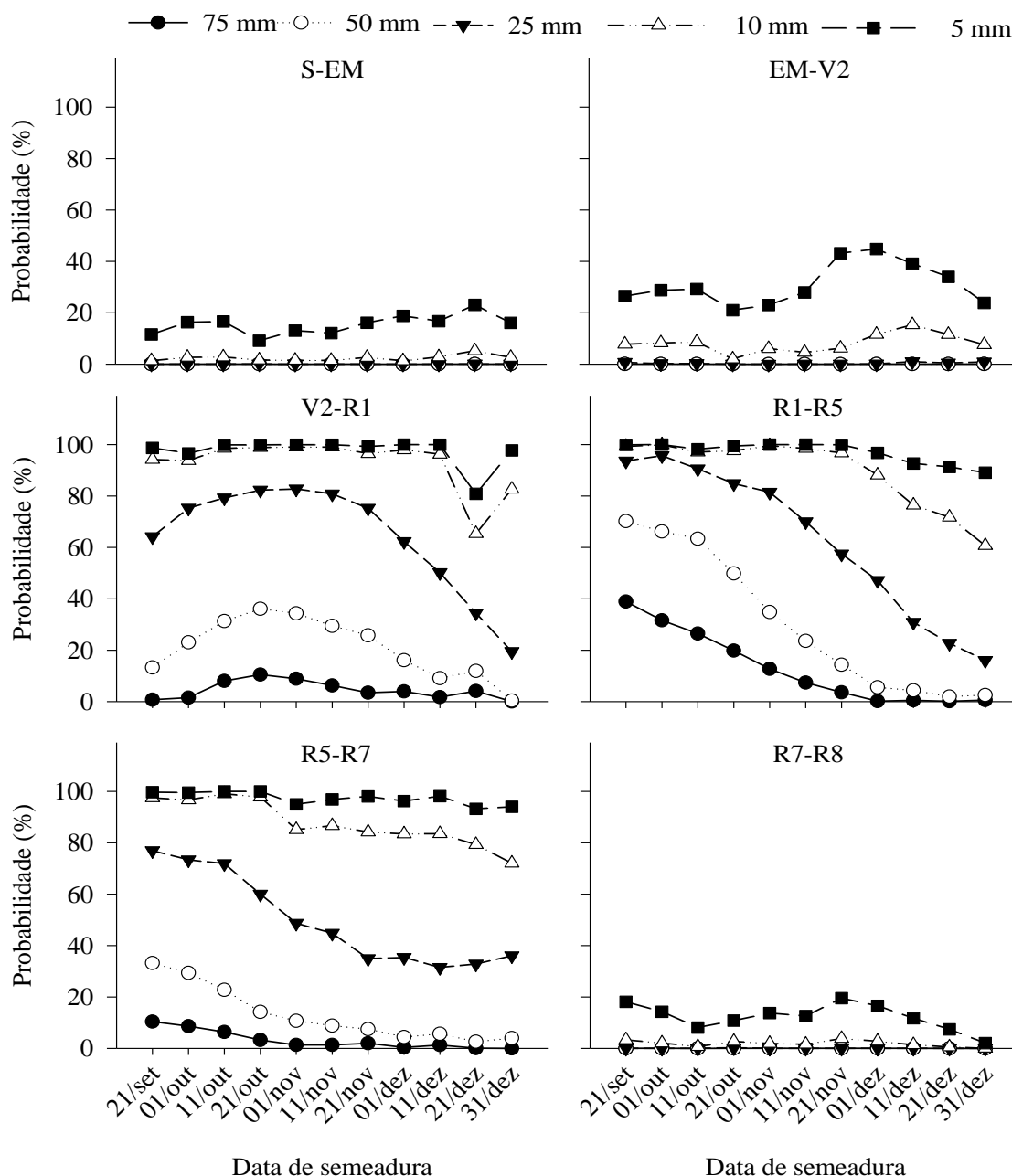
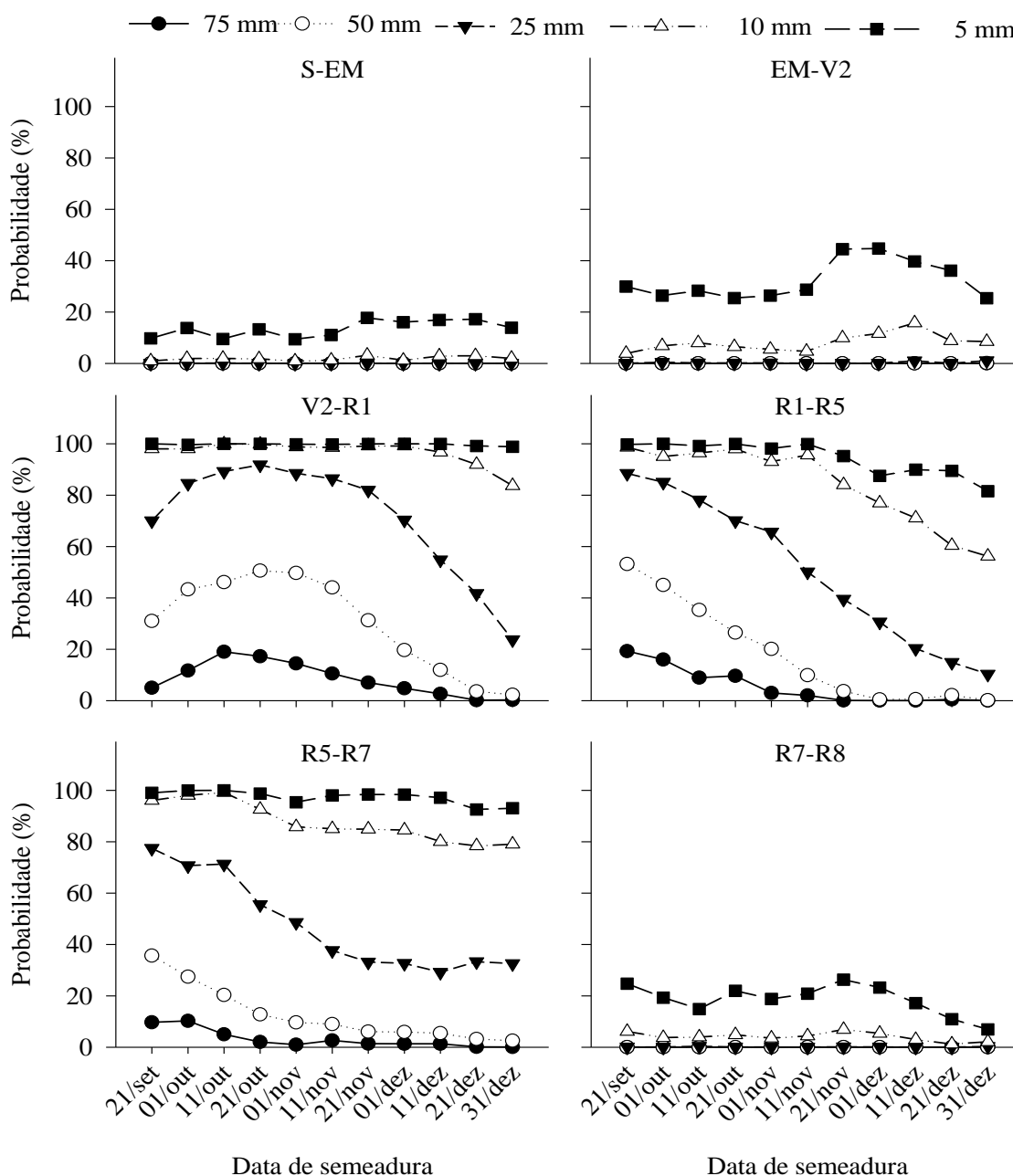


Figura 30. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico igual ou maior que 5, 10, 25, 50 e 75 mm acumulados durante os subperíodos de desenvolvimento da soja semeadura - emergência (S-EM), emergência - primeira folha trifoliolada (EM-V2), primeira folha trifoliolada - início da floração (V2-R1), início 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 o solo Piratini, em onze datas de semeadura simuladas de 1971 a 2017, em Pelotas, RS.



Considerando o subperíodo R1-R5 em Santa Maria, o maior risco de ocorrência de déficit hídrico coincide com as semeaduras realizadas no mês de outubro, principalmente para os níveis de 25, 50 e 75 mm de déficit hídrico para todos os GMR (Figuras 25, 26 e 27). A

partir de 01/nov há um decréscimo linear dos valores de probabilidade. Resultados semelhantes foram obtidos para o subperíodo compreendido entre a antese e a maturação leitosa do milho, em que as semeaduras simuladas até o início de novembro apresentaram a maior deficiência hídrica (fração deficitária) (NIED et al., 2005).

Para Pelotas, as probabilidades de ocorrer 5 e 10 mm de déficit hídrico no subperíodo R1-R5 ficaram próximas de 100% até a semeadura de 21/nov, com posterior redução, independentemente do GMR (Figuras 28, 29 e 30). Com relação às probabilidades de ocorrência de 50 e 75 mm, há uma redução da primeira (21/set) até a semeadura de 01/dez, quando se tornam inexpressivas para todos os GMR.

De maneira geral o risco de ocorrência de déficit hídrico no subperíodo R1-R5 é menor para as cultivares de GMR 7.4-8.0, tanto para Santa Maria quanto para Pelotas. Num primeiro momento, pode-se considerar isso como uma vantagem, tendo em vista a importância da ocorrência de deficiência hídrica no período reprodutivo. Entretanto, esses menores valores de probabilidade estão associados à menor duração desse subperíodo (TRENTIN et al., 2013), o que também é um fator de risco, tendo em vista o menor tempo de recuperação das plantas em caso de ocorrência de estresse.

Considerando a ocorrência de pelo menos 5 e 10 mm de déficit hídrico no subperíodo R5-R7 em Santa Maria, não se verificam diferenças entre datas de semeadura e GMR, em que os valores de probabilidade ficaram próximos de 100% (Figuras 25, 26 e 27). Para os demais níveis de risco de déficit hídrico (25, 50 e 75 mm), verifica-se uma tendência linear decrescente da primeira (21/set) para a última data de semeadura (31/dez). Cabe ressaltar que a partir de 01/nov o risco de ocorrer 75 mm de déficit hídrico nesse subperíodo é extremamente baixo.

Para o subperíodo R5-R7 os efeitos do déficit hídrico ocorrem tanto quando as plantas são submetidas a estresse contínuo (de SOUZA; EGLI; BRUENING, 1997) quanto em curtos períodos (BREVEDAN; EGLI, 2003). De maneira geral há indução da senescência de folhas e a maturação fisiológica é antecipada. Brevedan e Egli (2003) submetendo as plantas ao déficit hídrico no estágio R6 verificaram redução na taxa de troca de carbono, teor de nitrogênio e da clorofila nas folhas, em que mesmo após a retirada do stress, o processo de aceleração da senescência não foi interrompido, resultando por fim na redução do tamanho das sementes e da produtividade.

Observando os dados obtidos para Pelotas, foi possível inferir que há um menor risco de ocorrer déficit hídrico no subperíodo R5-R7 em relação à Santa Maria. Assim como verificado para o subperíodo R1-R5, de maneira geral, as semeaduras realizadas em outubro

são as que apresentam maior risco de ocorrência de déficit hídrico (Figuras 28, 29 e 30). O risco de ocorrência de 10 mm de déficit hídrico reduz a partir de 01/nov até 31/dez, em que a probabilidade ficou próxima de 80%. No outro extremo, a probabilidade de ocorrer 75 mm ou mais de déficit hídrico é praticamente nula a partir de outubro e é menor do que 20% considerando o risco de ocorrer 50 mm.

A ocorrência de déficit hídrico entre o final do enchimento de grãos (R7) e a maturação fisiológica (R8) não é tão importante para a definição do momento da semeadura, tendo em vista a pequena influência na produtividade final, podendo ocorrer uma pequena redução no peso de grãos (KARAM et al., 2005). De qualquer forma, as semeaduras realizadas a partir da segunda quinzena de dezembro apresentam os menores valores de probabilidade de ocorrência de déficit hídrico, devido à coincidência com um período de reduzida demanda atmosférica. Assim, nessas datas de semeadura, problemas relacionados à inadequada condição de umidade do solo para a trafegabilidade de máquinas e umidade dos grãos para a colheita mecanizada podem ser mais frequentes.

CONCLUSÕES

Há redução dos valores médios e do risco de ocorrência de excesso hídrico no ciclo da soja a partir de 21 de setembro até 31 de dezembro em ambos os locais, para todos as cultivares de GMR entre 5.9 e 8.0. Considerando a obtenção de elevado potencial produtivo associado à redução do risco climático por excesso hídrico, semeaduras a partir de 11 de novembro e 21 de novembro deveriam ser preferenciais em Santa Maria e Pelotas, respectivamente.

De maneira geral, a frequência de anos em que ocorre excesso hídrico nos subperíodos S-EM e EM-V2 tende a reduzir a partir de 11 e 21 de novembro, em Santa Maria e Pelotas, respectivamente. Em Santa Maria e Pelotas, ocorre excesso hídrico em média de 75 e 68% dos anos no subperíodo S-EM e 83 e 75% dos anos no subperíodo EM-V2, respectivamente.

Semeaduras realizadas a partir de 11 de novembro apresentam menor risco de ocorrência de excesso hídrico para o estabelecimento da cultura (S-V2) em ambas as regiões, embora Pelotas apresente maior magnitude de excesso hídrico nessa fase.

Para o subperíodo R1-R5, verifica-se a presença de excesso hídrico em dois a cada três anos em Santa Maria, com pouca diferença entre as datas de semeadura e GMR. Frequência próxima a 50% é observada em Pelotas, porém com maior ocorrência de excesso hídrico nas semeaduras realizadas em dezembro.

Não houve diferença expressiva entre os valores médios e de probabilidade de excesso hídrico para os subperíodos R1-R5 e R5-R7 nas diferentes datas de semeadura e GMR. Considerando o subperíodo V2-R1, verificou-se diferença apenas para o GMR 5.9-6.8, em que semeaduras realizadas até 01 e 11 de outubro apresentaram maior excesso hídrico em Santa Maria e Pelotas, respectivamente.

O déficit hídrico é menor na região de Pelotas do que em Santa Maria. Semeaduras realizadas a partir de 11 de novembro e 01 de novembro apresentam os menores valores médios e de probabilidade de ocorrência de déficit hídrico ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja em Santa Maria e Pelotas, respectivamente.

Semeaduras realizadas próximas ao solstício de verão apresentam maior risco de ter suprimento de água inadequado para o estabelecimento da cultura. Considerando os subperíodos reprodutivos R1-R5 e R5-R7, observa-se uma redução do déficit hídrico médio a partir de 01 de novembro, sendo que as semeaduras entre 11 de novembro e 21 de novembro são as que apresentam menor risco.

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.

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

ANDRIANI, J. M. et al. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. **Agronomie**, v. 11, n. 9, p. 737-746, 1991.

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**, v. 96, n. 1, p. 98–105, 2006.

BACANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources, and hypoxia. **Journal of Experimental Botany**, 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**, v. 39, n. 1, p. 143-149, 1999b.

BATTISTI, R. et al. Climatic efficiency for soybean and wheat crops in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, in different sowing date. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p. 390–396, 2013.

BATTISTI, R. et al. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, n. 3, p. 159-168, 2018.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Drought tolerance of Brazilian soybean cultivars simulated by a simple agrometeorological yield model. **Experimental Agriculture**, v. 51, n. 2, p. 285–298, 2015.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 4, p. 1612–1622. 2017.

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

BEUTLER, A. N., et al. Soil hydric excess and soybean yield and development in Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, n. 10, p. 1461-1466, 2014.

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

BORU, G. et al. Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration. **Annals of Botany**, v. 91, n. 4, p. 447–453. 2003.

BOYER, C. N. et al. Profitability and risk analysis of soybean planting date by maturity group. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2253-2262, 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. Portaria nº 154, de 25 de julho de 2018. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2018/2019**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2018.

BREVEDAN, R. E.; EGLI, D. B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. **Crop Science**. v. 43, n. 6, p. 2083–2088. 2003.

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**, 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**, v. 42, n. 9, p. 1563-1567, 2012.

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**, v. 10, n. 1, p. 153-162, 2002.

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

DE SOUZA, P. I.; EGLI, D. B.; BRUENING, W. P. Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. **Agronomy Journal**, v. 89, n. 5, p. 807-812. 1997.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. M. **Yield response to water**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 33. 1979.

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

ECK, H. V.; MATHERS, A. C.; MUSICK, J. T. Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans. **Field Crops Research**, v. 17, n. 1, p. 1-16. 1987.

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.

GARG, N.; MANCHANDA, G. ROS generation in plants: Boon or bane? **Plant Biosystems**, v. 143, n. 1, p. 1-96, 2009.

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

GUBIANI, P. I. et al. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1-14, 2018.

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

HIRASAWA, T., et al. Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under drought conditions during grain filling. **Japanese Journal of Crop Science**. v. 63, n. 4, p. 721-730, 1994.

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

KARAM, F. et al. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, v. 75, n. 3, p. 226-244, 2005.

KIESLING, T. C. Calculation of the length of the day. **Agronomy Journal**, 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**, v. 90, n. 5, p. 592–596, 2006.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

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

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.

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**, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

MOLIN, L. et al. Distribuição temporal de chuvas intensas em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 2, p. 43-51, 1996.

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

MUNAR, A. M.; COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica na Bacia do rio Piratini, Rio Grande do Sul, a partir de dados de chuva observada e dados de chuva derivados do produto MERGE. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324216200_Simulacao_Hidrologica_na_Bacia_do_rio_Piratini_Rio_Grande_do_Sul_a_partir_de_dados_de_chuva_observada_e_dados_de_chuva_derivados_do_produto_MERGE>. Acesso em: 13 de março de 2019.

MUNDSTOCK, C. M. et al. **Soja 6.000 Manejo para alta produtividade em terras baixas**. 1 ed. Porto Alegre: IRGA, 2017. 68p.

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

NEYSHABOURI, M. R.; HATFIELD, J. L. Soil water deficit effects on semi-determinate and indeterminate soybean growth and yield. **Field Crops Research**, v. 15, n. 1, p. 73-84, 1986.

NIED, A. H. **Balanço hídrico diário do solo simulado para diferentes datas de semeadura do milho em Santa Maria, RS.** 2003. 91f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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**, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2005.

NUNES, A. C. et al., Agronomic aspects of soybean plants subjected to deficit irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 7, p. 654-659, 2016.

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.

OYA, T. et al. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Production Science**, v. 7, n. 2, p. 129–137, 2004.

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

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

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

RAO, V. B. et al. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979–2011. **International Journal Of Climatology**. v.36, n. 1, p.291–302, 2016.

RHINE, M.D. et al. Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. **Irrigation Science**, v.28, n. 2, p.135-142, 2010.

RIBEIRO, P. L. et al. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1484-1491, 2016.

ROCHA, T. S. M. et al. Performance of soybean in hydromorphic and nonhydromorphic soil under irrigated or rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 5, p. 293-302, 2017.

ROTUNDO, J. L.; WESTGATE, M. E. Rate and duration of seed component accumulation in water-stressed soybean. **Crop science**, v. 50, n. 2, p. 676-684, 2010.

SADRAS, V. O.; CALVIÑO, P. A. Quantification of grains yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 3, p. 577–583, 2001.

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

SARTORI, G. M. S. et al. Sistemas de preparo do solo e de semeadura no rendimento de grãos de soja em área de várzea. **Ciência Rural**, v.46, n. 9, p.492-498, 2016.

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**, v. 31, n. 1, p. 7-12, 2001.

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

SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil-magnitude, causes and possible solutions for a sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.

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**, v. 100, p. 257-271, 2007.

SILVA, C. M. et al. Sowing seasons × maturity groups on quantitative traits in soybean. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 1, p. 7-13, 2018.

SILVA, F. D. S. et al. Tendência de alterações climáticas da precipitação observadas no Brasil de 1961 a 2008 utilizando dados gradeados. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais...** Belém, 2010.

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

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. C. et al. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1030–1036, 2011.

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

SIONIT, N., KRAMER, P. J. Effects of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, v. 69, n. 2, p. 274-278, 1977.

STATON, M. Assessing water damage to emerged soybeans: Information to help soybean producers assess yield losses associated with ponded or waterlogged fields. **Michigan State University Extension**. 23 jun. 2017. Disponível em:

<https://www.canr.msu.edu/news/assessing_water_damage_to_emerged_soybeans>. Acesso em: 21 jan. 2019.

STEINMETZ, S.; ASSIS, F. N. Estimativa da radiação solar global a partir da insolação na região de Pelotas, Rio Grande do Sul. **Revista Agropecuária de Clima Temperado**, v. 2, n. 1, 1999.

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

SULLIVAN, M. et al. Evaluating on-farm flooding impacts on soybean. **Crop Science**, 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**, v. 96, p. 1191–1198, 2005.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology, 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**, 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**, v. 48, n. 7, p. 703-713, 2013.

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

VILLALOBOS-RODRIQUEZ, E.; SHIBLES, R. Response of determinate and indeterminate tropical soybean cultivars to water stress. **Field Crops Research**, v. 10, p. 269-281, 1985.

WIJEWARDANA, C. et al. Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns. **Irrigation Science**, v. 36, n. 4-5, p. 241-255, 2018.

WU, C.J. et al. Effect of Flood Stress on Soybean Seed Germination in the Field. **American Journal of Plant Sciences**, v. 8, n. 1, p. 53-68. 2017.

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

ZANON, A. J. et al. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, v.74, n.3, p.279-290, 2015a.

ZANON, A. J. et al. Development of soybean cultivars as a function of maturation group and growth type in high lands and in lowlands. **Bragantia**. v.74, p.400–411. 2015b.

ZANON, A. J. et al. Growth habit effect on development of modern soybean cultivars after beginning of bloom in Rio Grande do Sul. **Bragantia**, v. 75, n. 4, p.445-458, 2016.

ZANON A. J. et al. **Ecofisiologia da soja**: visando altas produtividades. Santa Maria, RS. Palloti, 2018. 136 p.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 108, p. 1447-1454, 2016.

5. DISCUSSÃO

No Capítulo I, foram geradas informações acerca da duração do ciclo e subperíodos de desenvolvimento da soja para as regiões de Santa Maria e Pelotas. Esses dois locais representam duas das condições ambientais mais contrastantes da Metade Sul do Rio Grande do Sul, principalmente com relação ao fotoperíodo, mas também de temperatura do ar, com uma diferença anual média de 1,2 °C. Assim, pode-se inferir que a duração do ciclo de desenvolvimento para praticamente a totalidade da área cultivada com soja em terras baixas está compreendida entre os valores de duração obtidos para Santa Maria e Pelotas, considerando uma mesma data de semeadura e GMR.

Como era esperado, independentemente do local de cultivo, quanto maior o GMR das cultivares maior a duração do ciclo de desenvolvimento. Na Metade Sul, pode-se esperar respostas um pouco diferentes para a região da fronteira oeste, tendo em vista a maior continentalidade e incidência de radiação solar (CARGNELUTTI FILHO; MATZENAUER; TRINDADE, 2004) e conseqüentemente maior disponibilidade térmica, o que poderia ocasionar uma redução do ciclo de desenvolvimento. Todavia, em se tratando do cálculo do balanço hídrico sequencial (BHS) a variabilidade dos resultados de déficit e excesso hídrico tende a ser mais significativa entre as diferentes regiões, pois se esperam maiores diferenças entre valores de evapotranspiração da cultura, mas principalmente entre valores de chuva, a qual possui alta variabilidade espacial e temporal.

Visando obter resultados de excesso hídrico condizentes aos que ocorrem em condição de campo, no Capítulo II foi realizada a avaliação da metodologia utilizada por Bortoluzzi (2015) em que era considerado o tempo de drenagem de dois dias consecutivos, necessário para o solo atingir a capacidade de campo conjuntamente ao cálculo da precipitação efetiva, comparando com os dados observados a campo (GUBIANI et al. 2018). Tendo em vista que os resultados obtidos por BHS foram bastante diferentes dos obtidos a campo, buscou-se elaborar e testar uma nova metodologia, a qual considera o tempo de drenagem dos macroporos. Essa nova metodologia apresentou melhor acurácia e foi então utilizada no cálculo do BHS para a obtenção do excesso hídrico no presente trabalho.

Cabe ressaltar que apesar de ter apresentado pior desempenho, os resultados obtidos por Bortoluzzi (2015) não podem ser considerados errôneos. Na verdade, as diferenças estão mais relacionadas à magnitude do excesso hídrico, porém tratam-se de erros sistemáticos com menor influência na diferenciação do risco climático entre as datas de semeadura. Ficou

evidente que a maior parte das diferenças obtidas foram provenientes do uso da precipitação efetiva, a qual não é apropriada para utilização em terras baixas.

Apesar do processo de validação não ter sido realizado para o Planossolo Háptico de Pelotas, assumiu-se que a tendência é semelhante pelas características intrínsecas dos solos amostrados e dos solos de terras baixas em geral (PEDROTTI et al., 2001; BAMBERG et al., 2009; RIBEIRO et al., 2016), os quais possuem grandes limitações de drenagem superficial e subsuperficial. Além disso, as demais características físicas são bastante semelhantes, como a presença de uma camada compactada a partir de 10 cm e valores baixos de macroporosidade, a qual foi de $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para ambos os solos.

Considerando a menor precipitação pluviométrica acumulada e a maior duração do ciclo em Pelotas do que em Santa Maria (Capítulo I) e que a capacidade de armazenamento de água (CAD) dos dois Planossolos é semelhante, esperava-se que o déficit hídrico fosse maior na Região de Pelotas. Entretanto, os resultados do Capítulo III apresentaram tendência inversa, o que provavelmente ocorreu pela menor demanda atmosférica. No mês de janeiro, por exemplo, as médias da evapotranspiração máxima da cultura diária em Pelotas e Santa Maria foram de 4 e 5 mm, respectivamente, com diferença média de 20%, o que gera um acumulado de 31 mm, por exemplo, apenas no mês de janeiro.

Isso também ajuda a explicar a maior ocorrência de excesso hídrico na região de Pelotas, apesar de que a frequência de anos com excesso hídrico foi um pouco menor para esse local. Dessa forma, apesar da menor precipitação pluviométrica histórica, a menor demanda atmosférica e a maior duração do ciclo - devido ao fotoperíodo mais longo próximo ao solstício de verão e à menor temperatura média do ar (aproximadamente $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$) - favorecem a ocorrência do excesso de água, o que foi confirmado ao realizar o balanço hídrico sequencial (BHS).

Em Santa Vitória do Palmar, os maiores valores de produtividade de soja em solos arroseiros obtidos por Mundstock et al. (2017) ocorreram em semeaduras realizadas de 01 a 15 de novembro. Rocha et al. (2018) apontam o período compreendido entre 15 de outubro e 15 de novembro como o preferencial para a semeadura de soja em terras baixas, tendo em vista que as maiores produtividades são obtidas nesse intervalo, tanto em nível potencial e experimental quanto em nível de lavouras comerciais. Há redução da produtividade da ordem de até $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ para semeaduras após 15 de novembro, aumentando a lacuna de produtividade entre a produtividade potencial e a obtida em lavouras.

A menor produtividade verificada em semeaduras realizadas antes de 15 de outubro nas lavouras e nos experimentos (ROCHA et al., 2018) pode estar relacionada à ocorrência de

excesso e déficit hídrico, os quais são mais pronunciados para semeaduras nesse período, conforme os resultados apresentados nesse trabalho. Além disso, semeaduras realizadas no final de setembro são submetidas a condições de temperatura do solo baixas, o que prejudica a formação de uma população de plantas uniforme e adequada. Da mesma forma, deve-se tomar cuidado com a utilização de cultivares de GMR abaixo de 5.9, as quais podem ser induzidas a florescer precocemente devido ao fotoperíodo curto, limitando o crescimento das plantas.

Essa janela de semeadura preferencial (15/10 a 15/11) corrobora com as informações históricas climáticas geradas acerca da ocorrência de excesso e déficit hídrico, os quais estão entre os principais fatores relacionados à redução da produtividade em terras baixas. Assim, semeaduras realizadas antes de 15 de outubro, apesar de apresentarem alto potencial de produtividade (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016), devem ser evitadas caso seja optado pela redução do risco de perdas tanto por déficit quanto por excesso hídrico conforme resultados apresentados no Capítulo IV desta tese.

Além disso, semeaduras realizadas na segunda quinzena de outubro são recomendadas apenas em lavouras com práticas de manejo já consolidadas, enquanto a primeira quinzena de novembro deve ser priorizada pelos produtores que estão iniciando suas atividades em terras baixas, tendo em vista que semeaduras realizadas a partir de 11 de novembro na região de Santa Maria e 01 de novembro na região de Pelotas são as que apresentam menor risco de ocorrência de déficit hídrico e que o menor risco de ocorrência de excesso hídrico no ciclo e no estabelecimento inicial da soja se dá a partir de 11 e 21 de novembro em Santa Maria e Pelotas, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAMBERG, A. L. et al. Densidade de um planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1079-1086, 2009.

BORTOLUZZI, M. P. **Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico para a cultura da soja em planossolos da região central do Rio Grande do Sul**. 2015. 87f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

BOYER, C. N. et al. Profitability and risk analysis of soybean planting date by maturity group. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2253-2262, 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. Portaria nº 154, de 25 de julho de 2018. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2018/2019**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2018.

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.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; TRINDADE, J. K. da. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 39, n. 12, p. 1157-1166, 2004.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Soja - Brasil: Série histórica de área plantada e de produtividade / Companhia Nacional de Abastecimento**. – Brasília: Conab, 2019. Online. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras> Acessado em: 08 de janeiro de 2019.

GUBIANI, P. I. et al. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1-14, 2018.

INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ. **Safras: Soja em rotação com arroz**. 2019. Disponível em: < <https://irga.rs.gov.br/safras-2>>. Acessado em: 06 jan. 2019.

MUNDSTOCK, C. M. et al. **Soja 6.000 Manejo para alta produtividade em terras baixas**. 1 ed. Porto Alegre: IRGA, 2017. 68p.

OYA, T. et al. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Production Science**, v. 7, n. 2, p. 129–137, 2004.

PEDROTTI, A. et al. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 709-715, 2001.

RIBEIRO, P. L. et al. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1484-1491, 2016.

ROCHA, T. S. M. et al. Performance of soybean in hydromorphic and nonhydromorphic soil under irrigated or rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 5, p. 293-302, 2017.

ROCHA, T. S. M. da et al. Época de semeadura para reduzir a lacuna de produtividade de soja em terras baixas no Rio Grande do Sul. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 2018, Goiânia/GO **Anais...** Brasília/DF: EMBRAPA, 2018. p. 353-355.

SARTORI, G. M. S. et al. Soil tillage systems and seeding on grain yield of soybean in lowland area. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 492-498, 2016.

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

APÊNDICES

APÊNDICE A. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE SOLOS DE TERRAS BAIXAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRATINI

INTRODUÇÃO

Os Planossolos estão presentes em terras baixas próximas de rios e lagoas. Na planície costeira interna e externa ocorrem os Planossolos Háplicos Eutróficos solódicos, pertencentes à Unidade de Mapeamento Pelotas (STRECK et al., 2008). De maneira geral, as propriedades físicas desses solos estão bem caracterizadas. Algumas características do perfil modal da UM Pelotas estão apresentadas na Tabela 1 (PEDROTTI et al., 2001).

Tabela 1. Composição granulométrica e densidade do solo (Ds) em diferentes profundidades de um Planossolo pertencente à Unidade de Mapeamento Pelotas.

Camada (cm)	Areia (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	Ds (g cm ⁻³)
0-20	423	478	98	1,45
20-29	513	367	120	1,65
29-65	391	293	316	1,66

Adaptado de Pedrotti et al. (2001)

Cunha e Costa (2013) obtiveram a granulometria de um Planossolo Háplico Eutrófico típico localizado na Estação Experimental Terras Baixas, da Embrapa Clima Temperado, no Município de Capão do Leão, RS, o qual apresentou textura franco-arenosa (131 g kg⁻¹ de argila, 314 g kg⁻¹ de silte e 554 g kg⁻¹ de areia), na camada 0–40 cm. Nesse mesmo local, sob condição de sistema de plantio direto, Ribeiro et al. (2016) determinaram alguns atributos físicos do solo (Tabela 2). Na tabela 3 estão os resultados de características físicas do solo avaliado por Bamberg et al. (2009).

Tabela 2. Porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds) e conteúdo volumétrico de água no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e na capacidade campo (θ_{cc}), em um Planossolo cultivado com soja, sob plantio direto, em diferentes profundidades no solo.

Camada (cm)	Pt (cm ³ cm ⁻³)	Ma (cm ³ cm ⁻³)	Mi (cm ³ cm ⁻³)	Ds (g cm ⁻³)	θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{pmp} (cm ³ cm ⁻³)
0-10	0,36	0,06	0,30	1,53	0,32	0,07
10-20	0,32	0,04	0,28	1,58	0,30	0,08
20-40	0,30	0,05	0,25	1,60	0,25	0,05

Adaptado de Ribeiro et al. (2016)

Tabela 3. Composição granulométrica, porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e densidade do solo (Ds) nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de um Planossolo pertencente à Unidade de Mapeamento Pelotas.

Camada (cm)	Areia (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	Pt (cm ³ cm ⁻³)	Ma (cm ³ cm ⁻³)	Mi (cm ³ cm ⁻³)	Ds (g cm ⁻³)
0-10	456	398	146	0,46	0,10	0,36	1,48
10-20	469	379	152	0,37	0,07	0,30	1,71

Adaptado de Bamberg et al. (2009)

Entretanto, não foram encontrados resultados para as áreas próximas ao Rio Piratini, as quais representam uma importante zona de produção de soja em terras baixas no Sul do Rio Grande do Sul. Assim, o objetivo desse trabalho foi realizar a determinação da granulometria, densidade do solo e taxa de infiltração de água no solo em diferentes locais da Bacia Hidrográfica do Rio Piratini.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em três locais situados nas áreas de terras baixas do Rio Piratini (Figura 1), o qual possui 133 km de comprimento, com a foz no canal São Gonçalo. A bacia hidrográfica do Rio Piratini possui uma área de 5807 km² e abrange total ou parcialmente os municípios de Arroio Grande, Canguçu, Capão do Leão, Cerrito, Herval, Morro Redondo, Pedras Altas, Pedro Osório, Pinheiro Machado e Piratini.

Foram retiradas amostras de solo nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm, com uso de um anel volumétrico de 50 mm de diâmetro. As amostras foram secas em estufa a 105°C, sendo determinada a densidade do solo (Ds) através da relação entre a massa seca de sólidos secos pelo volume total do anel coletor (KLEIN, 2014). Também foi determinada a granulometria do solo através do método da pipeta. As análises foram realizadas no laboratório de física do solo do Instituto Federal Farroupilha, Campus de São Vicente do Sul.

Figura 1. Localização dos pontos de coleta de solo para caracterização física na bacia hidrográfica do rio Piratini. Pelotas, 2017.



Foram realizadas avaliações da capacidade de infiltração de água no solo nos locais das três coletas (Figura 1), através do método do infiltrômetro de anel, utilizando-se dois anéis metálicos de 30 e 60 cm diâmetro. Os dados obtidos foram ajustados ao modelo empírico de Kostiakov (BRANDÃO et al., 2006), conforme a equação 1.

$$I = a.t^n \quad (1)$$

em que,

I - infiltração acumulada (mm),

t - tempo acumulado (min)

a e n - constantes empíricas do modelo, dependentes do solo.

Derivando-se a equação de Kostiakov em função do tempo, encontra-se a velocidade de infiltração (VI) de água no solo para um determinado tempo (equação 2).

$$VI = a.n.t^{n-1} \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os três locais avaliados verificou-se que o silte foi o que apresentou a maior fração constituinte do solo, independentemente da camada de solo considerada (Tabela 4). Observa-se também que, exceto para o local de coleta 2 (Figura 1), a fração de areia diminuiu com o aumento da profundidade.

Tabela 4. Composição granulométrica e densidade do solo (Ds) determinados em três locais na bacia hidrográfica do rio Piratini para diferentes profundidades do solo. Pelotas, 2017.

Camada (cm)	Areia (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	Ds (g cm ⁻³)
LOCAL 1 - HADLER				
0-10	399	476	125	1,40
10-20	404	470	126	1,80
20-30	356	524	120	1,80
LOCAL 2 – LUIZ CARLOS				
0-10	409	449	142	1,41
10-20	370	445	185	1,77
20-30	439	414	147	1,74
LOCAL 3 – SÃO GONÇALO				
0-10	327	537	136	1,44
10-20	300	532	168	1,64
20-30	163	578	259	1,59

Os menores valores de densidade do solo (Ds) foram obtidos para a camada superficial do solo (Tabela 4). A partir de 10 cm observa-se um adensamento do solo, provavelmente devido às operações mecanizadas realizadas na cultura do arroz irrigado, o que também foi observado por Pedrotti et al. (2011), Bamberg et al. (2009) e em menor magnitude por Ribeiro et al. (2016).

A maior e a menor fração de silte e areia, respectivamente, foram obtidas para o local 3 (Figura 1), o qual está localizado em um ponto mais baixo do relevo, próximo ao nível do rio e do canal São Gonçalo (fz). Cunha e Costa (2013) obtiveram, na camada 0-40cm, um teor de areia (554 g kg⁻¹) superior ao encontrado nesse trabalho, provavelmente por estar localizado em um ponto de maior altitude. Valores intermediários foram encontrados por Bamberg et al. (2009) também na área da Embrapa Clima Temperado (Tabela 3) para uma profundidade de até 20 cm.

De qualquer forma, nota-se que a composição granulométrica não apresenta grandes diferenças entre os valores obtidos em terras baixas do rio Piratini e em locais um pouco mais

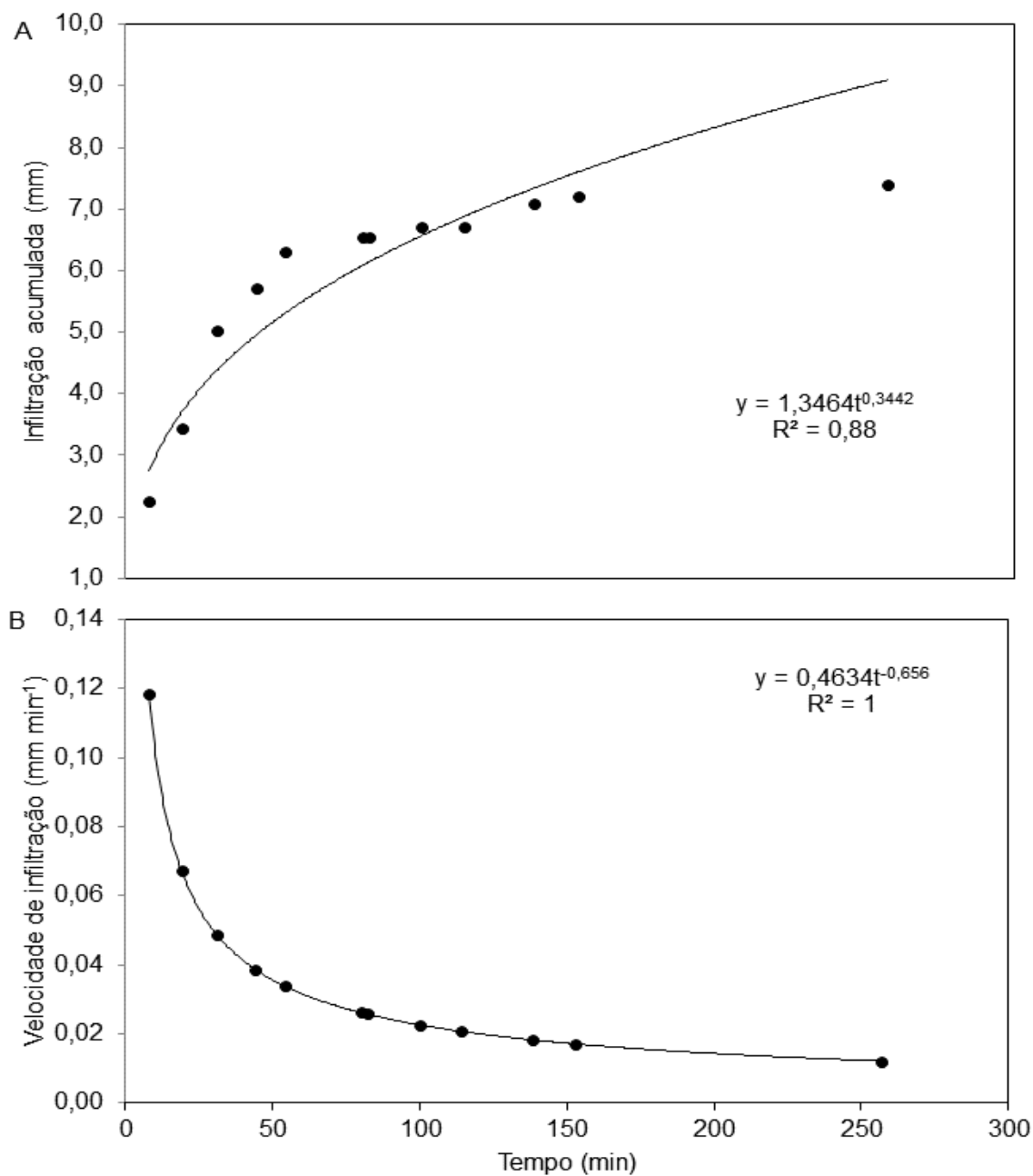
afastados do curso do rio. Assim, não se esperam grandes diferenças também em outras características físicas dos solos, tais como a porosidade total, a macro e a microporosidade. Dessa forma, infere-se que é possível utilizar os dados (Tabela 2) obtidos por Ribeiro et al. (2016) por serem representativos da região de estudo e são suficientes para o cálculo do balanço hídrico sequencial (BHS) diário, conforme metodologia descrita no Capítulo II.

Ao longo dos 257 minutos de medição no local 1 (Figura 1), a infiltração acumulada foi de apenas 7,38 mm (Figura 2A). Verifica-se claramente que a infiltração é maior durante os primeiros 60 minutos e após há uma estabilização, o que ocorre em função da redução da velocidade de infiltração de água no solo (Figura 2A).

A infiltração inicial de água no solo está associada ao conteúdo de água do solo e/ou ao espaço ocupado por ar antes das medições. Dessa forma a alta velocidade de infiltração deve estar associada ao preenchimento do restante da porosidade do solo não ocupada com água nessa camada superficial. Quando a frente de umedecimento chega a uma profundidade de aproximadamente 10 cm encontra uma camada compactada de maior densidade do solo (Tabela 4) a qual impõe maior resistência ao movimento da água e contribui para a redução da velocidade de infiltração, tornando-a bastante lenta. Além disso, o horizonte B praticamente impermeável, característico dos Planossolos, também contribui para a baixa velocidade de infiltração.

A capacidade de infiltração ou a velocidade de infiltração básica (VIB) obtida foi de apenas $0,014 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Esse resultado é semelhante ao obtido por Bamberg et al. (2012), o qual obteve valores de VIB de 0,01 e $0,03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, em Planossolo Háplico sob sistema plantio direto e convencional, respectivamente.

Figura 2. Infiltração acumulada (A) e Velocidade de Infiltração (B) de água em Planossolo Háplico cultivado com soja. Pelotas, 2017.



CONCLUSÕES

Há pouca diferença de textura e densidade do solo determinadas em terras baixas do Rio Piratini e as reportadas na literatura para Planossolos em áreas próximas.

A velocidade e a capacidade de infiltração foram extremamente baixas, o que não contribui para o armazenamento de água no solo e também para a drenagem do excesso de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAMBERG, A. L. et al. Densidade de um planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1079-1086, 2009.

BAMBERG, A. L. et al. Infiltração de água em Planossolo Háplico cultivado com soja (*glicine max. L.*) em sistema de preparo convencional e plantio direto. In: XIX REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, Lages, **Anais...** Lages: SBCS, 2012.

BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração de água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 120p.

CUNHA, N. G. da; COSTA, F. A. da. **Solos da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. 6p. (Embrapa Clima Temperado. Circular técnica, 152).

KLEIN, V.A. **Física do solo**. 3. ed. Passo Fundo: Editora UPF. 2014. 263 p.

PEDROTTI, A. et al. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 709-715, 2001.

RIBEIRO, P. L. et al. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1484-1491, 2016.

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

APÊNDICE B. AJUSTE DE FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA RESULTADOS DE ANÁLISE NUMÉRICA DE EXCESSO E DÉFICIT HÍDRICO NO CICLO E SUBPERÍODOS DE DESENVOLVIMENTO DA SOJA.

RESUMO

O excesso e o déficit hídrico são fatores limitantes ao cultivo da soja, principalmente em Planossolos e terras baixas. Assim, a análise de risco de ocorrência desses fenômenos é fundamental para reduzir as perdas de produtividade de grãos. O objetivo deste trabalho foi verificar o ajuste das funções densidade de probabilidade exponencial, gama, lognormal, normal e weibull aos dados de déficit e excesso hídrico, acumulados durante subperíodos e no ciclo de desenvolvimento da soja em Planossolos. Foram utilizadas séries históricas de dados meteorológicos obtidos da estação agroclimatológica de Pelotas e da estação climatológica principal de Santa Maria. Foi realizada a simulação do desenvolvimento da soja, para cultivares de grupo de maturidade relativa (GMR) entre 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 em onze datas de semeadura compreendidas entre 21 de setembro e 31 de dezembro. Calculou-se o balanço hídrico sequencial diário, em que foram obtidos os dados de excesso hídrico (dias) e déficit hídrico (mm) acumulados ao longo de seis subperíodos de desenvolvimento e do ciclo da soja. Após foram testados os ajustes das fdps exponencial, gama, lognormal, normal e weibull aos dados. A maior frequência de ajuste para os dados de excesso hídrico no ciclo da soja foi obtida para a fdp normal, em Santa Maria e fdp weibull e gama em Pelotas. A fdp lognormal foi a que melhor se ajustou aos dados de déficit hídrico ao longo do ciclo da soja, independentemente do local. Em ambos os locais, as fdp normal e weibull foram as que apresentaram o melhor desempenho para o excesso hídrico nos subperíodos. Para o déficit hídrico, o melhor ajuste foi verificado para as fdp gama, lognormal e exponencial.

PALAVRAS-CHAVE: *Glycine max*. Planossolo. Análise de risco. Data de semeadura. Série histórica.

ABSTRACT

Water excess and deficit are limiting factors for soybean crop, especially in planosols and lowlands. Thus, the occurrence risk analysis of these phenomena is fundamental to reduce grain yield losses. The aim of this study was to verify the exponential, gamma, lognormal, normal and weibull probability density functions adjustment to the water excess and deficit data accumulated during subperiods and soybean development cycle in planosols. Historical series of meteorological data were obtained from the Pelotas agroclimatological station and main climatological station of Santa Maria. The soybean development simulation was performed for cultivars of relative maturity groups (RMG) between 5.9-6.8, 6.9-7.3 and 7.4-8.0 on eleven sowing dates comprising September, 21 to December, 31. The daily sequential water balance was calculated, in which were obtained water excess (days) and deficit (mm) data accumulated over six development subperiods and soybean cycle. After, the exponential, gamma, lognormal, normal and weibull fdps were adjusted to the data. The highest adjustment frequency for the water excess data in the soybean cycle was obtained for fdp normal in Santa Maria and fdp weibull and gama in Pelotas. The fdp lognormal showed the best fit for water deficit data throughout the soybean cycle, regardless of the location. In both locations, the normal and weibull fdp were the ones that presented the best performance for the water excess in the subperiods. For the water deficit, the best fit was verified for the fdp gamma, lognormal and exponential.

KEY WORDS: *Glycine max*. Planossol. Risk analysis. Sowing date. Historical serie.

INTRODUÇÃO

O estudo de probabilidade de ocorrência de fenômenos adversos é fundamental para reduzir os riscos de perdas de produtividade nos cultivos agrícolas. Instituições oficiais de crédito e seguradoras condicionam o financiamento ou o seguro da atividade agrícola somente se for quantificado o risco da atividade. A mensuração do risco é mais precisa a partir da utilização de determinada função densidade de probabilidade (fdp), as quais estão diretamente ligadas com a natureza dos dados a que se relaciona. Existem funções que se ajustam a dados discretos, tais como, binomial, hipergeométrica e poisson e outras voltadas 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 com cobertura gramada ou de referência (CARDOSO, 2005; SILVA et al., 2008), na cultura do milho (NIED et al., 2005; TRENTIN, 2009), do feijão (SILVA, 2008), do girassol (MALDANER, 2012), dentre outros. Esses estudos permitem melhorar o planejamento das atividades agrícolas, tendo em vista que geram informações sobre o risco de ocorrência de determinados valores de variáveis adversas para o período estudado, de forma a tomar decisões preventivas para amenizar a redução do rendimento das culturas em função desses 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 com 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 no caso do atual estudo condiz com o número de anos estudados (ASSIS; ARRUDA; PEREIRA, 1996).

Assim, tendo em vista a importância e os efeitos nocivos do excesso hídrico (SCHÖFFEL et al., 2001; BEUTLER et al., 2014) e do déficit hídrico (ECK; MATHERS; MUSICK, 1987) para a cultura da soja, os quais são intensificados em Planossolos, a identificação das fdp que melhor se ajustam a essas variáveis é importante, principalmente no sentido de gerar informações para uma futura inclusão da análise de probabilidade no Zoneamento Agrícola de Risco Climático. Além disso, o conhecimento do risco associado à época de semeadura da soja pode contribuir na área da seguridade agrícola, a qual possui grande potencial de crescimento.

O objetivo deste trabalho foi verificar o ajuste das funções densidade de probabilidade exponencial, gama, lognormal, normal e weibull aos dados de déficit e excesso hídrico, acumulados durante subperíodos e no ciclo de desenvolvimento da soja, considerando-se três conjuntos de grupos de maturidade relativa de cultivares de soja em Planossolos da região de abrangência de Santa Maria e de Pelotas, RS.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados meteorológicos diários de temperatura média, máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), insolação (h), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (Km.dia^{-1}) e chuva (mm) foram obtidos da estação agroclimatológica de Pelotas localizada no município de Capão do Leão, RS, Brasil ($31^{\circ}52'S$, $52^{\circ} 21'W$ à altitude de 13,2 m), de setembro de 1971 a junho de 2017 e na estação climatológica principal de Santa Maria, RS, Brasil ($29^{\circ}43'23''S$, $53^{\circ}43'15''W$, à altitude de 95 m), de setembro de 1968 a junho de 2017, o que totalizou 46 e 49 anos de observações, respectivamente. O fotoperíodo diário para Pelotas e Santa Maria foi calculado conforme Kiesling (1982), considerando a duração do crepúsculo civil de 6° abaixo do plano do horizonte. O clima das duas regiões de abrangência, segundo a classificação de

Köppen, é do tipo subtropical úmido sem estação seca definida (Cfa) (KUINCHTNER; BURIOL, 2001).

A simulação do desenvolvimento da soja foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Trentin et al. (2013), em que foram considerados três conjuntos compostos por cultivares de grupo de maturidade relativa (GMR) entre 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0. As onze datas de semeadura foram simuladas em intervalos de 10 ou 11 dias dentro do período de semeadura compreendido entre 21 de setembro e 31 de dezembro.

O cálculo do balanço hídrico sequencial diário (BHS) foi realizado conforme metodologia descrita por Pereira; Villa Nova e Sedyama (1997). A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), necessária para o BHS, foi estimada com uso do método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c) foram utilizados valores de coeficiente de cultura (K_c) recomendados pela FAO para a cultura da soja (ALLEN et al., 1998).

Para cada data de semeadura de cada ano da série histórica, resultaram do BHS os dados de excesso hídrico (dias) e déficit hídrico (mm) ao longo do ciclo da soja e para os subperíodos de desenvolvimento compreendidos entre a semeadura (S), emergência (EM), primeira folha trifoliolada (V2), início da floração (R1), início do enchimento de grãos (R5), maturação fisiológica (R7) e maturação de colheita (R8). Esses dados foram submetidos à análise de distribuição de probabilidades e teste de aderência para verificar a fdp que melhor representa a distribuição dos dados. Utilizaram-se funções densidade de probabilidade (fdp) para variáveis contínuas, pois as variáveis excesso hídrico (dias) e déficit hídrico (mm) foram contabilizadas em totais por subperíodos e no ciclo total de desenvolvimento, semelhante ao 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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando o ciclo total de desenvolvimento, com 132 cenários, as fdp normal, weibull e gama foram as que apresentaram maior frequência de aderência para a variável

número de dias com excesso hídrico para a região de abrangência das estações meteorológicas de Santa Maria (solo Vacacaí) e Pelotas (solo Piratini), respectivamente (Tabela 1). Em Pelotas, a fdp weibull apresentou melhor aderência aos dados de excesso hídrico (dias) em 15 de um total de 33 datas de semeadura e foi a que apresentou maior frequência de ajuste (45,5%), seguida pela fdp gama, ajustada em 39,4% das datas de semeadura (Tabela 1).

Tabela 1. Frequência (%) de casos em que as funções densidade de probabilidade (fdp) exponencial, gama, lognormal, normal e weibull apresentaram melhor ajuste estatisticamente significativo para as variáveis, número de dias com excesso hídrico (dias) e déficit hídrico (mm), no ciclo de desenvolvimento dos grupos de maturidade relativa da cultura da soja considerados, para Planossolos em Santa Maria e Pelotas, RS.

fdp	Excesso hídrico (dias)		Déficit hídrico (mm)	
	Solo Vacacaí Santa Maria (%)	Solo Piratini Pelotas (%)	Solo Vacacaí Santa Maria (%)	Solo Piratini Pelotas (%)
Exponencial	0	0	0	0
Gama	15,2	39,4	0	36,4
Lognormal	0	3,0	84,8	51,5
Normal	60,6	12,1	0	0
Weibull	24,2	45,5	0	12,1
Sem ajuste	0	0	15,2	0
Total*	n=33	n=33	n=33	n=33
n=132	n=66		n=66	

*Total de número de testes de aderência das fdp (n).

A fdp normal, por sua vez, apresentou melhor aderência aos resultados de excesso hídrico para as condições de Santa Maria, em que se obteve melhor ajuste aos dados em 20 datas de semeadura, seguida da fdp weibull, em oito datas de semeadura (Tabela 1). Porém, cabe destacar que a fdp normal apresentou ajuste significativo para todas as datas de semeadura nesse local, sendo preterida no momento da escolha em função de apresentar menor significância nos testes de aderência.

Para os dados de déficit hídrico (mm) acumulados no ciclo de desenvolvimento da soja em Santa Maria, a fdp lognormal apresentou melhor ajuste na maioria das semeaduras, exceto em cinco datas em que não se obteve ajuste de nenhuma fdp (Tabela 1). A falta de ajuste nestas cinco datas, semeaduras entre 21 de novembro em 31 de dezembro, decorre, provavelmente da condição hídrica mais favorável à soja tal como o verificado para a cultura do milho (NIED et al., 2005). A fdp lognormal também foi a que apresentou maior frequência de ajuste para dados de déficit hídrico no solo em escala decendial e mensal na região de Santa Maria (SILVA et al., 2008).

Para Pelotas, verificou-se ajuste de pelo menos uma fdp em todas as 33 datas de semeadura simuladas para os três GMR de soja. Obteve-se também com a fdp lognormal a maior frequência de ajuste, sendo a selecionada por apresentar melhor ajuste que as demais em mais da metade dos casos, seguida da fdp gama (36,4%) e weibull (12,1%). Porém, assim como a fdp normal para os dados de excesso hídrico em Santa Maria, a fdp lognormal também apresentou ajuste aos dados de déficit hídrico em todas as datas de semeadura. Portanto, é possível inferir que a fdp lognormal é a que mais representa a distribuição de dados de déficit hídrico, independentemente do local considerado.

A fdp exponencial não se ajustou aos dados para nenhuma data de semeadura ou variável considerada. Para os dados de excesso hídrico (dias) ao longo do ciclo, a fdp lognormal apresentou melhor ajuste apenas para a semeadura de 21 de setembro para o GMR 6.9-7.3 em Pelotas. A fdp normal, por sua vez, não apresentou melhor ajuste aos dados de déficit hídrico em nenhuma data de semeadura para ambos os locais (Tabela 2). Portanto, fica claramente demonstrado que a fdp normal não serve para descrever os riscos de déficit hídrico e a fdp lognormal não tem ajuste satisfatório para avaliar o risco de ocorrência de um determinado número de dias com excesso hídrico para a soja nos dois Planossolos estudados em função da distribuição assimétrica dos dados. Isso evidencia que, mesmo com o efeito tampão exercido pelo solo em função da sua capacidade de armazenamento de água, as características de distribuição da precipitação pluviométrica (SILVA et al., 2007) se transferem, mas de forma atenuada, para os dados resultantes do BHS diário, como excesso hídrico (dias) e déficit hídrico (mm) acumulados no ciclo.

Tabela 2. Funções densidade de probabilidade (fdp) e coeficientes ajustados para o déficit hídrico (mm) e excesso hídrico (dias) no ciclo da cultura da soja nos solos Vacacaí e Piratini nas diferentes datas de semeadura (DS) simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017 (Santa Maria) e 1971 a 2017 (Pelotas), considerando três grupos de maturidade relativa (GMR).

	Região (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*
Excesso hídrico (dias)	Santa Maria (Vacacaí)	21/set	N	46,755	14,933	N	46,857	14,839	W	54,061	3,899
		01/out	N	43,346	15,250	N	43,653	15,032	G	6,945	6,558
		11/out	G	5,446	7,437	W	44,892	2,898	G	5,849	7,382
		21/out	G	5,537	6,707	G	5,501	7,200	W	48,486	3,096
		01/nov	W	39,217	2,862	W	42,953	2,958	N	41,612	15,670
		11/nov	N	33,000	13,333	N	36,571	14,214	W	44,826	3,040
		21/nov	N	34,625	13,257	N	35,632	13,842	N	40,530	13,817
		01/dez	N	32,857	12,614	W	38,167	3,100	N	40,612	13,590
		11/dez	N	31,000	12,337	N	33,959	12,556	N	39,306	13,118
		21/dez	N	30,469	11,841	N	33,224	11,962	N	38,591	13,970
	31/dez	N	31,204	11,293	W	36,145	3,000	N	37,795	13,049	
	Pelotas (Piratini)	21/set	W	50,719	3,098	LN	3,763	0,391	G	5,506	8,680
		01/out	W	48,819	3,029	W	49,817	3,159	G	5,545	8,762
		11/out	N	42,500	16,057	W	49,911	3,009	N	49,545	17,232
		21/out	W	47,592	3,118	W	50,227	3,301	W	54,243	3,308
		01/nov	G	5,745	7,120	W	49,272	3,131	G	5,121	9,319
		11/nov	G	4,849	8,037	G	4,777	8,477	G	4,909	9,197
		21/nov	G	5,665	6,454	G	5,975	6,587	W	48,467	2,971
		01/dez	G	5,736	6,184	N	38,181	14,730	N	42,454	15,163
11/dez		W	39,902	3,071	W	41,693	2,853	G	7,380	5,614	
21/dez		W	38,843	2,798	W	39,796	2,674	G	6,866	5,894	
31/dez	W	39,510	2,888	W	40,149	2,855	G	7,350	5,574		
Déficit hídrico (mm)	Santa Maria (Vacacaí)	21/set	LN	5,028	0,371	LN	5,050	0,369	LN	5,031	0,360
		01/out	LN	5,076	0,360	LN	5,099	0,359	LN	5,078	0,362
		11/out	LN	5,086	0,361	LN	5,114	0,361	LN	5,091	0,367
		21/out	LN	5,060	0,365	LN	5,082	0,367	LN	5,058	0,367
		01/nov	LN	5,013	0,375	LN	5,024	0,371	LN	5,005	0,360
		11/nov	LN	4,939	0,376	LN	4,960	0,368	LN	4,944	0,347
		21/nov	LN	4,839	0,389	LN	4,861	0,368	SA	---	---
		01/dez	SA	---	---	LN	4,749	0,358	SA	---	---
		11/dez	SA	---	---	LN	4,629	0,365	LN	4,605	0,361
		21/dez	LN	4,496	0,381	LN	4,512	0,375	LN	4,476	0,380
	31/dez	SA	---	---	LN	4,373	0,394	LN	4,346	0,397	
	Pelotas (Piratini)	21/set	G	15,532	9,565	G	15,794	9,681	LN	4,947	0,338
		01/out	LN	4,945	0,343	LN	4,974	0,336	LN	4,942	0,339
		11/out	LN	4,930	0,339	LN	4,948	0,340	G	15,180	9,428
		21/out	G	15,349	8,979	W	154,679	3,336	G	14,479	9,256
		01/nov	G	15,429	8,240	LN	4,783	0,363	G	14,525	8,376
		11/nov	W	129,441	3,133	W	129,548	3,165	LN	4,646	0,357
		21/nov	G	13,465	7,771	LN	4,587	0,365	LN	4,548	0,368
		01/dez	LN	4,466	0,377	LN	4,469	0,371	G	11,027	8,141
11/dez		LN	4,326	0,379	LN	4,338	0,375	G	9,224	8,635	
21/dez		G	10,017	7,137	W	80,887	2,991	G	8,713	8,035	
31/dez	LN	4,037	0,374	LN	4,061	0,373	LN	4,046	0,365		

*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.

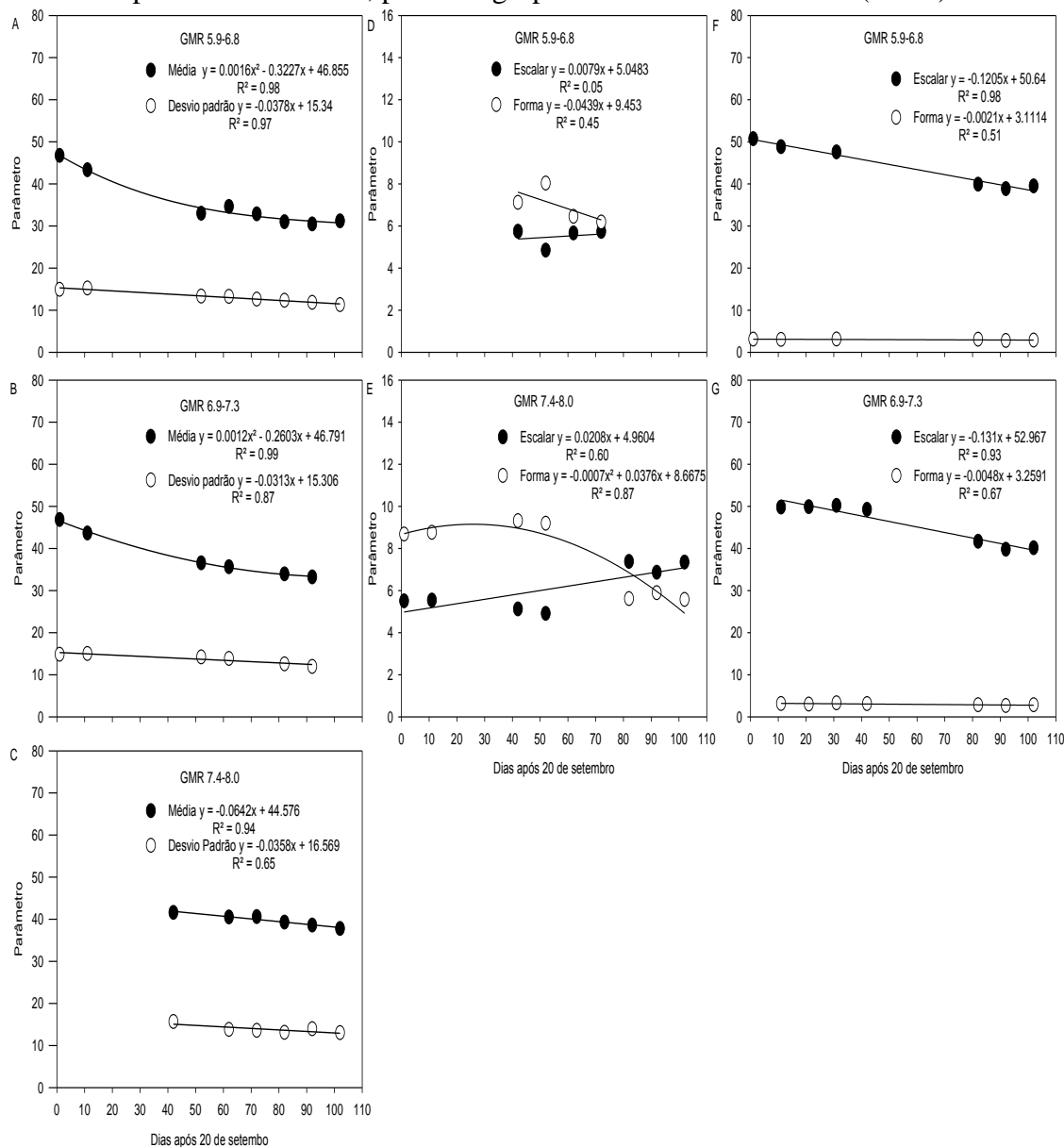
Para os dados de excesso hídrico (dias) em Santa Maria, os parâmetros média (a) e desvio padrão (b) da fdp normal, a qual apresentou a maior frequência de ajuste, apresentaram alta associação com as datas de semeadura, contabilizadas na forma de dias após a data de 20 de setembro, para os três GMR (Figura 1). Cabe destacar que o parâmetro “a” (média) foi mais alterado em função da data de semeadura do que o “b” (desvio padrão). Para o parâmetro “a” da fdp normal, obteve-se ajuste de regressão quadrática com $R^2 > 0,97$ para todos os GMR analisados isoladamente, enquanto que para o parâmetro “b” obteve-se ajuste de regressão linear com R^2 de 0,97, 0,87 e 0,65 referentes aos GMR 5.9-6.8, 6.9-7.3 e 7.4-8.0, respectivamente.

O conjunto de dados de todos os GMR do parâmetro “a” da fdp normal resultou em uma regressão quadrática ($a = 0,001123 x^2 - 0,2348 x + 46,60$), decrescente desde 20 de setembro, com $R^2 = 0,65$, enquanto que para o parâmetro “b” obteve-se função linear negativa ($b = - 0,3072 x + 15,41$) com $R^2 = 0,68$. No entanto, houve pequenas diferenças entre os GMR, principalmente com relação ao coeficiente “a”, que é ligeiramente maior para o GMR 7.4-8.0, com ajuste de função linear com $R^2=0,94$ (Figura 1C). Para os GMR 5.9-6.8 e 6.9-7.3 ajustaram-se funções quadráticas com $R^2 \geq 0,98$ (Figuras 1A, 1B). O parâmetro b não apresentou diferenças entre GMR, mantendo-se a regressão linear negativa para os três GMR (Figuras 1A, 1B, 1C).

Para Pelotas, os parâmetros da fdp gama, ajustada para o número de dias com excesso hídrico no ciclo de desenvolvimento da soja, apresentaram tendência de variação inversa ao longo do calendário de semeadura, considerando o GMR 5.9-6.8 (Figura 1D). Para as cultivares de GMR 7.4-8.0, obteve-se uma relação linear positiva para o parâmetro “a” (escalar), com $R^2 > 0,60$. Já para o parâmetro “b” (forma), houve ajuste de uma equação quadrática inversa a do parâmetro “a”, com $R^2 > 0,87$ (Figura 1E). Quando consideradas as cultivares de GMR 6.9-7.3 houve ajuste da fdp gama para apenas duas datas de semeadura, não sendo realizada análise de regressão para os parâmetros a e b em relação à data de semeadura.

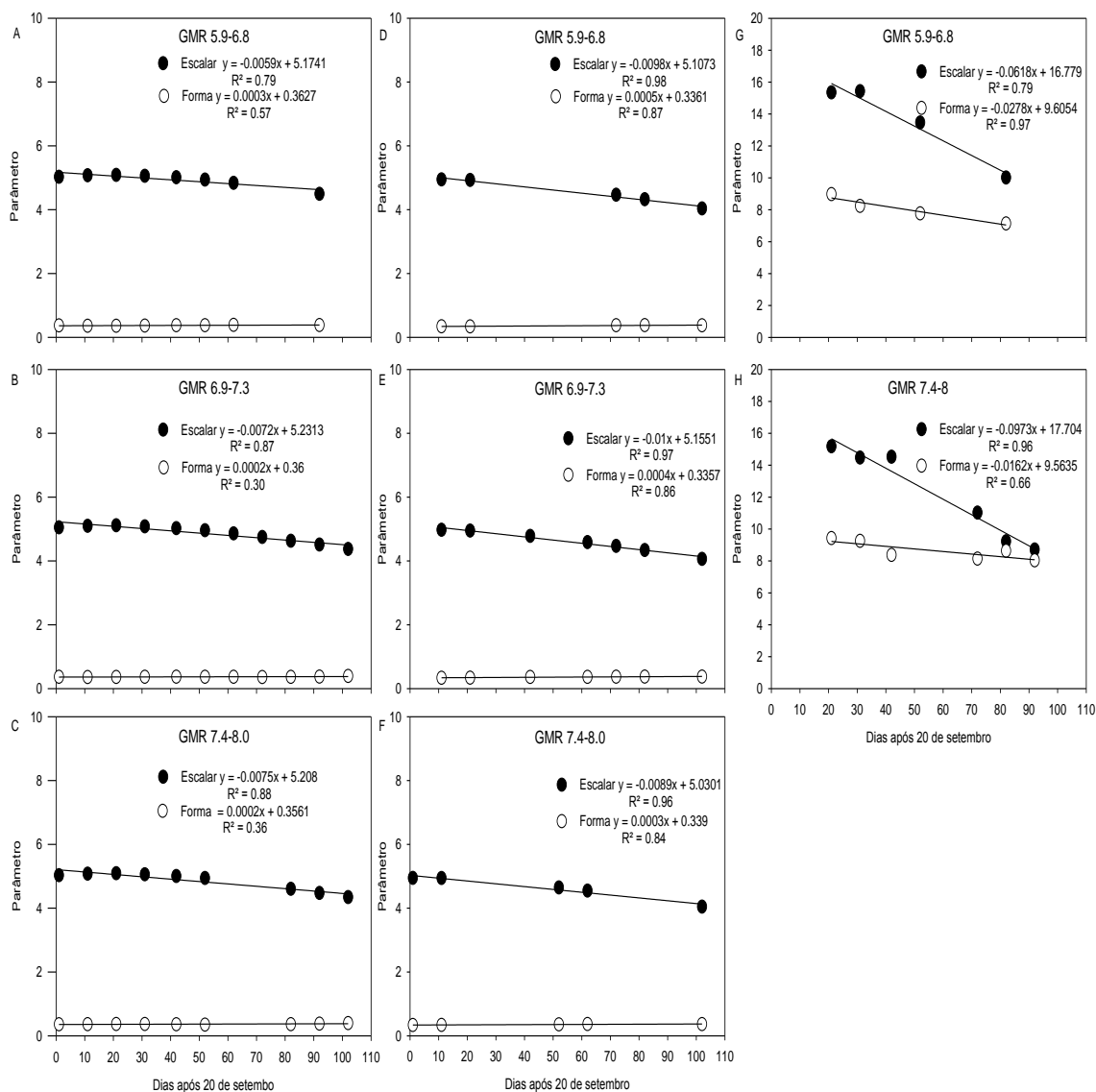
Os parâmetros escalar (a) e forma (b) da fdp weibull para Pelotas foram decrescentes da semeadura de 21 de setembro até 31 de dezembro, apresentando relação linear negativa, obtendo-se para os parâmetros “a” e “b”, valores de $R^2=0,98$ e 0,51 para o GMR 5.9-6.8 (Figura 1F) e $R^2 = 0,93$ e 0,67 para o GMR 6.9-7.3 (Figura 1G), respectivamente. Para o GMR 7.4-8.0 houve ajuste da fdp weibull para apenas duas datas de semeadura, não sendo realizada análise de regressão.

Figura 1. Variação na magnitude dos parâmetros das funções densidade de probabilidade (fdp) normal (A, B e C) ajustada para determinar o número de dias com excesso hídrico no ciclo da cultura da soja no solo Vacacaí de Santa Maria e fdp gama (D e E) e weibull (F e G) no solo Piratini de Pelotas, em função das datas de semeadura consideradas em dias acumulados após 20 de setembro, para três grupos de maturidade relativa (GMR).



O parâmetro “a” (escalar) da fdp lognormal ajustada para déficit hídrico, apresentou relação linear negativa em função das datas de semeadura, tanto para o solo Vacacaí (Santa Maria), em que se obtiveram valores de R^2 entre 0,78 e 0,88, de acordo com o GMR considerado (Figura 2A, 2B, 2C), quanto para o solo Piratini (Pelotas) com $R^2 \geq 0,96$ para todos os GMR (Figura 2D, 2E, 2F). O parâmetro “b” (forma) não apresentou grande variação ao longo do calendário de semeadura, sendo ajustada uma regressão linear positiva para todos os GMR, com R^2 baixo (entre 0,30 e 0,57) para Santa Maria e com $R^2 \geq 0,84$ para Pelotas.

Figura 2. Variação na magnitude dos parâmetros das funções densidade de probabilidade (fdp) lognormal (A, B e C) ajustada para determinar o déficit hídrico (mm) no ciclo da cultura da soja no solo Vacacaí de Santa Maria e fdp lognormal (D, E e F) e gama (G e H) no solo Piratini de Pelotas em função das datas de semeadura consideradas em dias acumulados após 20 de setembro, para três grupos de maturidade relativa (GMR).



Com relação à fdp gama, a qual também apresentou boa frequência de ajuste para os dados de déficit hídrico em Pelotas, verificou-se um decréscimo linear acentuado do parâmetro “a” (escalar) com o avanço da data de semeadura, principalmente a partir de 11 de outubro. As equações de regressão obtidas apresentaram $R^2 = 0,79$ para o GMR 5.9-6.8 (Figura 2G) e $R^2 = 0,96$ para o GMR 7.4-8.0 (Figura 2H). Também houve ajuste de equação de regressão linear negativa para o parâmetro “b” (forma), com $R^2 = 0,97$ e $R^2 = 0,66$, respectivamente (Figura 2G, 2H). Para as cultivares do GMR 6.9-7.3, não foi realizada análise

de regressão tendo em vista que a fdp gama foi a de melhor ajuste em apenas duas datas de semeadura.

Para os seis subperíodos de desenvolvimento da soja, foram obtidos 792 cenários para o teste de ajuste das fdp aos dados de excesso e déficit hídrico, obtidos a partir da combinação de 11 datas de semeadura, seis subperíodos, três GMR e os dois locais estudados. Pelo menos uma função ajustou-se significativamente em 328 dos 396 casos possíveis para a variável “número de dias com excesso hídrico”. Considerando o resumo das frequências de ajuste das fdps aos valores obtidos (Tabela 3), verifica-se que não houve diferença expressiva no ajuste de funções entre os dois locais.

Para os dados de Santa Maria, houve predominância da fdp weibull no ajuste à distribuição de frequências para os subperíodos (33,2%), seguida pela fdp normal (32,8%). As fdp normal e weibull também foram as que mais se ajustaram para os dados de excesso hídrico de Pelotas, perfazendo um total de ajuste de 34,8% e 29,8%, respectivamente. Considerando os dois locais, em 68 casos não se verificou ajuste de qualquer fdp (SA) (Tabela 3), utilizando-se a distribuição da frequência empírica.

Lucas (2014) obteve a maior frequência de ajuste para a fdp weibull, trabalhando com dias de excesso hídrico para a cultura do girassol, totalizando 41,5% dos casos. 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) e para dados de chuva mensal em Bento Gonçalves, RS (RODRIGUES; FILHO; CHAVES, 2013). Pode-se inferir então que também para os subperíodos, tal como para todo o ciclo, a ocorrência de excesso hídrico é mais dependente da distribuição da chuva do que da evapotranspiração, tendo em vista o melhor ajuste da mesma fdp para dados de chuva (SILVA et al., 2007) e de excesso hídrico.

Considerando os dados de déficit hídrico (mm) por subperíodo em Santa Maria, houve ajuste de pelo menos uma fdp em todas as datas de semeadura (Tabela 3). A fdp gama foi a que apresentou maior frequência de ajuste (32,3%) aos dados de Santa Maria, seguida das fdp lognormal (26,8%) e exponencial (26,3%). Essas fdp também foram as que predominaram para Pelotas, porém nesse local e solo a fdp exponencial (31,3%) foi a que apresentou maior frequência de ajuste (Tabela 3).

Apenas em cinco datas de semeadura não houve ajuste de nenhuma fdp para os dados de déficit hídrico para Pelotas (Figura 3). Assim, pode-se afirmar que houve maior frequência de ajuste das fdp aos dados de déficit hídrico em relação aos dados de excesso hídrico. Isso provavelmente ocorre pela maior variabilidade interanual da ocorrência de excesso hídrico, gerando valores extremos que dificultam o ajuste das fdp.

Tabela 3. Frequência (%) de casos em que as funções densidade de probabilidade (fdp) exponencial, gama, lognormal, normal e weibull apresentaram ajuste estatisticamente significativo para as variáveis excesso hídrico (dias) e déficit hídrico (mm) em seis subperíodos de desenvolvimento da cultura da soja em Planossolos de Santa Maria e Pelotas, RS.

fdp	Excesso hídrico (dias)		Déficit hídrico (mm)	
	% Frequência (Santa Maria)	% Frequência (Pelotas)	% Frequência (Santa Maria)	% Frequência (Pelotas)
Exponencial	1,5	1,5	26,3	31,3
Gama	10,6	12,1	32,3	21,2
Lognormal	5,3	4,1	26,8	23,2
Normal	32,8	34,8	0,5	2,0
Weibull	33,2	29,8	14,1	19,7
Sem Ajuste	16,6	17,7	0,0	2,6
Total*	n=198	n=198	n=198	n=198
n=792	n=396		n=396	

*Total de número de testes de aderência das fdp (n).

As fdp que melhor se ajustaram à distribuição de frequências da variável número de dias com excesso hídrico nos seis subperíodos de desenvolvimento nas 11 diferentes datas de semeadura, com os respectivos coeficientes para os três GMR estão apresentadas na Tabela 4, para Santa Maria e Tabela 5 para Pelotas. A fdp exponencial se ajustou melhor que as demais em apenas em três datas em cada local, das quais cinco foram exclusivamente para o subperíodo R1-R5. A fdp lognormal também apresentou baixa frequência de melhor ajuste, com apenas oito e nove seleções para os Santa Maria e Pelotas, respectivamente, distribuídas aleatoriamente para os três GMR em todos os quatro subperíodos após o estágio V2. Aleatoriedade similar de melhor ajuste também foi apresentada pela fdp gama para os mesmos estágios que a fdp lognormal nos dois locais, mas com uma frequência maior, totalizando 6, 14, 11 e 10 seleções nos subperíodos V2-R1, R1-R5, R5-R7 e R7-R8, respectivamente. As fdp Normal e Weibull apresentaram predomínio de casos de melhor ajuste para determinados subperíodos e, em alguns casos, para um conjunto sequencial de datas de semeadura, o que também ocorreu para os casos de falta de ajuste (SA).

Nos subperíodos S-EM, EM-V2, V2-R1 e R7-R8, predominou o melhor ajuste da fdp normal para descrever a distribuição dos dados “número de dias com excesso hídrico” nos dois locais. No subperíodo S-EM a fdp normal predominou até a data de semeadura de 01/nov, nos dois locais. No subperíodo EM-V2 houve tendência similar até a data de semeadura de 11/out, tanto para Santa Maria (Tabela 4), quanto para Pelotas (Tabela 5), inferindo-se clara evidência da maior ocorrência de excessos hídricos nos primeiros 60 dias da

primavera, o que melhora a homogeneidade da distribuição das frequências na forma da função normal, mesmo para subperíodos de curta duração. Considerando os dois subperíodos iniciais, na data de 11/nov a fdp Normal se ajustou apenas para os GMR 6.9-7.3 e 7.4-8.0 no subperíodo S-EM em Pelotas (Tabela 5). Para o GMR 5.9-6.3 nesse subperíodo e para os três GMR no subperíodo EM-V2 não houve ajuste de nenhuma fdp para esta data em nenhum dos dois locais. Ao analisar os dados de precipitação pluviométrica de todos os dias dos 45 e 49 anos, verifica-se que no período de 01 a 10 e 11 a 20 de novembro ocorre precipitação pluviométrica diária significativamente mais baixa do que nos demais dias do ano, o que resulta em menor ocorrência de excessos hídricos nos subperíodos S-EM e EM-V2 para soja semeada em 01/nov e 11/nov nos dois locais, o que implica em menor possibilidade de ajuste de alguma fdp para esses subperíodos de curta duração.

A fdp Weibull apresentou predominância de melhor ajuste aos dados que as demais funções testadas nos subperíodos de V2-R1 (compartilhando a maior frequência com a fdp normal), R1-R5 e R5-R7. Estes são os subperíodos reprodutivos determinantes da formação da produtividade e são os mais longos, ocorrendo mais regularidade na distribuição dos excessos hídricos, o que melhora a condição para que alguma fdp se ajuste a distribuição dos dados. Nesses três subperíodos a fdp Weibull totalizou 46 casos de melhor ajuste aos dados para Santa Maria e 50 casos para Pelotas, sendo estes aleatórios para datas de semeadura e GMR das cultivares de soja. Dentre esses três subperíodos a fdp Weibull teve o maior número de ajustes no subperíodo R5-R7, com 16 casos em Santa Maria e principalmente em Pelotas, com 23 casos. Em compensação para as quatro datas de semeadura mais tardias (dezembro), não houve ajuste da fdp Weibull no subperíodo R7-R8 para Pelotas e apenas dois dos 12 possíveis para Santa Maria.

O conjunto de todos os resultados indica que, para número de dias com excesso hídrico, não é possível uma clara caracterização da qual fdp melhor se ajusta a distribuição dos dados considerando as diferentes fontes de variação como o subperíodo de desenvolvimento e o GMR da soja, além das datas de semeadura. Para períodos mais longos, como o ciclo total de desenvolvimento, há uma tendência mais clara na definição da fdp que melhor se ajusta aos dados.

Tabela 4. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja (Subp) 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 setembro a 11 de novembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017. Santa Maria, RS

(continua)

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/set	S-EM	N	8,604	3,704	N	8,431	3,611	N	9,227	3,360
	EM-V2	N	11,229	4,263	N	11,625	4,489	N	11,937	4,582
	V2-R1	N	14,583	6,340	N	14,208	6,361	W	16,956	2,342
	R1-R5	SA	-	-	W	5,647	1,444	EXP	4,419	
	R5-R7	W	9,494	1,455	W	10,347	1,709	G	4,473	2,011
	R7-R8	G	1,338	3,935	W	5,360	1,864	W	6,281	1,954
01/out	S-EM	N	7,410	3,431	N	7,350	3,548	SA	-	-
	EM-V2	SA	-	-	N	10,468	3,999	SA	-	-
	V2-R1	G	3,304	3,985	LN	2,488	0,454	G	2,948	4,888
	R1-R5	W	6,081	1,590	W	6,267	1,671	G	1,929	2,608
	R5-R7	N	9,097	5,530	W	10,113	1,635	G	3,829	2,460
	R7-R8	LN	1,685	0,457	SA	-	-	N	6,342	3,038
11/out	S-EM	N	6,363	2,703	SA	-	-	N	6,842	2,736
	EM-V2	N	8,808	3,663	N	9,347	3,790	N	9,468	4,031
	V2-R1	W	13,188	2,040	W	13,783	2,147	W	14,774	1,837
	R1-R5	N	6,058	3,524	W	7,116	1,794	W	6,785	1,644
	R5-R7	LN	1,981	0,633	G	2,960	2,891	SA	-	-
	R7-R8	G	1,111	5,308	G	1,401	3,497	LN	1,852	0,484
21/out	S-EM	N	5,463	2,627	SA	-	-	SA	-	-
	EM-V2	W	9,068	2,361	W	9,478	2,459	W	9,529	2,349
	V2-R1	W	11,808	1,627	W	12,124	1,633	G	5,185	2,441
	R1-R5	W	6,387	1,416	LN	1,551	0,766	G	2,520	2,103
	R5-R7	W	8,975	1,640	W	9,155	1,812	N	8,309	4,744
	R7-R8	N	5,852	2,924	G	1,646	3,723	W	10,264	2,346
01/nov	S-EM	N	5,666	2,177	N	5,477	2,287	N	6,131	2,158
	EM-V2	N	6,700	2,662	SA	-	-	SA	-	-
	V2-R1	W	11,026	1,809	W	12,920	2,003	N	13,586	6,968
	R1-R5	LN	1,571	0,757	W	6,162	1,508	SA	-	-
	R5-R7	W	9,399	1,787	N	8,690	5,086	W	10,273	1,871
	R7-R8	LN	1,703	0,505	N	7,341	3,633	W	9,894	1,722
11/nov	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	SA	-	-
	EM-V2	SA	-	-	SA	-	-	SA	-	-
	V2-R1	G	3,750	2,719	N	11,617	6,309	W	16,416	2,414
	R1-R5	SA	-	-	W	6,024	1,566	EXP	4,424	
	R5-R7	N	8,738	5,282	W	10,312	1,950	W	10,836	2,178
	R7-R8	N	6,138	3,217	W	8,424	2,190	SA	-	-

*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 4. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja (Subp) 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 2017. Santa Maria, RS.

(conclusão)

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	-	-	W	4,762	2,206
	EM-V2	N	6,351	2,800	N	6,315	2,867	N	6,315	2,810
	V2-R1	SA	-	-	N	11,765	6,397	W	15,966	2,369
	R1-R5	W	5,789	1,674	W	5,672	1,581	W	4,907	1,521
	R5-R7	W	9,501	1,800	N	8,386	4,646	LN	2,040	0,602
	R7-R8	W	8,993	2,330	N	7,971	4,097	N	10,000	4,717
	01/dez	S-EM	W	4,843	2,982	N	4,156	1,833	N	4,325
EM-V2		W	6,126	2,201	W	6,281	2,054	N	5,743	2,890
V2-R1		W	11,112	1,835	W	13,455	2,224	W	16,328	2,259
R1-R5		EXP	4,315	-	SA	-	-	N	5,321	2,373
R5-R7		N	8,659	4,802	W	10,420	1,919	W	10,087	1,682
R7-R8		SA	-	-	N	6,352	3,675	G	2,515	4,005
11/dez		S-EM	SA	-	-	G	1,006	4,027	SA	-
	EM-V2	N	5,277	2,547	W	6,231	2,380	W	6,176	2,141
	V2-R1	W	11,715	1,964	N	12,239	6,457	N	14,297	7,064
	R1-R5	N	5,117	3,245	N	5,387	2,871	W	5,491	1,632
	R5-R7	W	10,407	1,764	G	4,010	2,232	W	10,006	1,633
	R7-R8	SA	-	-	LN	1,615	0,614	N	10,162	4,705
	21/dez	S-EM	SA	-	-	N	3,628	1,864	N	3,783
EM-V2		N	5,264	2,078	SA	-	-	SA	-	-
V2-R1		W	12,761	2,446	N	11,872	5,383	N	14,723	6,226
R1-R5		G	1,940	2,665	N	5,300	3,131	W	5,132	2,029
R5-R7		G	3,405	2,749	W	10,427	1,724	W	11,711	1,800
R7-R8		N	5,250	3,398	W	7,734	2,990	N	9,222	4,573
31/dez		S-EM	N	3,861	1,641	W	3,809	2,267	SA	-
	EM-V2	N	5,263	2,297	N	5,315	2,360	SA	-	-
	V2-R1	SA	-	-	N	12,413	5,175	W	15,845	2,721
	R1-R5	G	1,147	4,094	W	4,773	1,806	LN	1,059	0,722
	R5-R7	N	9,948	6,065	G	3,865	2,825	W	12,868	1,751
	R7-R8	G	1,319	4,085	W	6,050	2,142	N	7,428	3,987

*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 5. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja (Subp) 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 Piratini, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 21 de setembro a 11 de novembro simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017. Pelotas, RS

(continua)

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/set	S-EM	N	9,621	3,946	N	9,763	4,063	SA	-	-
	EM-V2	N	12,000	5,380	N	12,309	5,492	N	12,604	5,521
	V2-R1	N	14,534	7,768	N	14,395	7,678	W	16,790	2,017
	R1-R5	G	2,129	2,388	G	2,208	2,282	W	4,934	1,693
	R5-R7	G	3,515	1,934	LN	1,711	0,746	EXP	7,352	
	R7-R8	N	6,148	2,944	W	5,903	1,719	LN	1,793	0,529
01/out	S-EM	N	8,454	2,980	SA	-	-	N	8,105	3,108
	EM-V2	N	11,000	4,540	N	11,341	4,840	N	11,833	4,997
	V2-R1	N	14,023	7,304	W	16,091	2,077	W	17,300	2,314
	R1-R5	EXP	4,960	-	LN	1,280	0,705	G	1,670	2,448
	R5-R7	G	3,601	2,311	W	10,862	1,817	W	9,866	1,592
	R7-R8	G	1,587	3,700	W	6,561	1,722	G	1,833	4,306
11/out	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	N	7,684	2,641
	EM-V2	N	11,000	4,077	N	11,297	4,671	N	11,710	4,842
	V2-R1	N	13,142	6,672	W	14,871	2,089	G	4,669	2,993
	R1-R5	SA	-	-	LN	1,450	0,651	G	2,026	2,179
	R5-R7	G	4,394	1,992	W	9,606	1,514	W	10,653	1,798
	R7-R8	N	6,135	3,359	W	8,228	2,557	W	11,049	2,931
21/out	S-EM	N	6,270	2,785	N	6,324	2,392	N	6,705	2,855
	EM-V2	N	10,500	4,579	G	2,068	5,033	W	12,169	2,455
	V2-R1	LN	2,218	0,610	LN	2,280	0,587	W	14,949	1,907
	R1-R5	LN	1,382	0,662	W	6,150	1,958	SA	-	-
	R5-R7	W	9,981	1,720	SA	-	-	W	11,164	1,604
	R7-R8	N	8,102	3,346	SA	-	-	SA	-	-
01/nov	S-EM	N	6,611	2,780	W	7,777	3,590	SA	-	-
	EM-V2	SA	-	-	W	9,727	2,919	W	10,359	3,117
	V2-R1	W	11,830	1,881	W	13,324	1,931	W	14,549	1,870
	R1-R5	SA	-	-	N	4,423	2,452	N	4,222	2,358
	R5-R7	N	9,950	5,991	G	4,350	2,568	W	11,785	1,605
	R7-R8	SA	-	-	N	8,054	4,795	N	10,771	5,336
11/nov	S-EM	SA	-	-	N	5,529	2,440	N	5,205	2,716
	EM-V2	SA	-	-	SA	-	-	SA	-	-
	V2-R1	G	3,033	3,440	W	12,671	2,219	W	14,031	1,846
	R1-R5	W	5,172	1,851	W	5,658	2,089	W	5,126	1,714
	R5-R7	W	12,335	1,749	W	12,356	1,717	W	12,718	1,801
	R7-R8	W	8,599	1,790	SA	-	-	N	10,545	5,044

*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 5. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o número de dias com excesso hídrico nos subperíodos da cultura da soja (Subp) 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 Piratini, 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 1971 a 2017. Pelotas, RS.

(conclusão)

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	-	-	G	1,350	3,606
	EM-V2	N	6,818	2,615	N	6,735	2,788	N	6,914	2,983
	V2-R1	N	9,619	5,369	N	10,697	6,049	N	13,139	6,660
	R1-R5	W	5,481	1,967	W	6,303	1,845	G	2,047	2,564
	R5-R7	W	11,103	1,770	W	11,279	1,718	W	10,727	1,617
	R7-R8	SA	-	-	W	11,670	2,733	N	11,428	5,627
01/dez	S-EM	SA	-	-	N	4,896	1,952	G	1,039	4,399
	EM-V2	SA	-	-	N	5,794	3,002	N	5,942	3,114
	V2-R1	N	10,868	5,220	SA	-	-	N	13,441	6,870
	R1-R5	G	2,171	2,385	G	2,181	2,597	W	6,162	1,793
	R5-R7	W	11,177	1,685	G	5,182	1,977	W	12,509	1,674
	R7-R8	N	9,178	3,631	N	8,545	4,548	N	11,548	4,843
11/dez	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	SA	-	-
	EM-V2	N	6,466	2,713	N	6,322	2,868	N	6,741	2,886
	V2-R1	N	10,825	5,183	N	11,512	5,848	W	15,488	1,984
	R1-R5	W	6,064	1,791	W	6,333	1,788	G	1,865	2,248
	R5-R7	W	11,675	1,688	W	13,667	1,959	W	13,419	1,762
	R7-R8	SA	-	-	N	8,034	3,353	N	10,451	4,537
21/dez	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	SA	-	-
	EM-V2	W	5,919	1,937	N	5,548	3,042	N	6,000	3,112
	V2-R1	N	11,525	5,777	SA	-	-	N	14,046	7,107
	R1-R5	W	5,672	1,712	EXP	4,454		W	4,369	1,478
	R5-R7	W	13,441	1,865	W	13,642	1,720	W	14,088	1,874
	R7-R8	N	6,666	3,230	G	2,803	2,346	N	9,586	4,609
31/dez	S-EM	SA	-	-	SA	-	-	N	5,000	1,441
	EM-V2	N	5,351	2,627	N	5,513	2,422	SA	-	-
	V2-R1	W	12,392	1,971	N	11,750	6,046	N	14,068	6,848
	R1-R5	W	4,567	1,536	G	2,188	2,035	G	2,232	2,120
	R5-R7	W	13,781	1,790	W	14,466	1,781	LN	2,259	0,893
	R7-R8	N	6,360	3,672	G	1,547	3,909	N	7,892	3,909

*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.

Os coeficientes das fdps, obtidos a partir do respectivo ajuste à distribuição de frequências do déficit hídrico (mm) acumulado nos seis subperíodos de desenvolvimento, nas 11 diferentes datas de semeadura, para os três GMR, considerando os dados de Santa Maria

(Tabela 6) e Pelotas (Tabelas 7), indicam a predominância de ajuste da fdp exponencial nos dois subperíodos mais curtos (S-EM e R7-R8). Nos subperíodos V2-R1, R1-R5 e R5-R7 as fdps gama e a lognormal predominaram para Santa Maria, enquanto gama, lognormal e weibull predominaram para Pelotas.

Para o subperíodo EM-V2 houve certo equilíbrio no número de melhores ajustes das fdps exponencial, gama e lognormal. A fdp normal apresentou melhor ajuste apenas para a data semeadura de 01/12 referente ao GMR 7.4-8.0, em Santa Maria (Tabela 6). Nos dois locais, salvo algumas exceções aleatórias, não se verificou clara influência dos GMR sobre a frequência dos ajustes de cada fdp para déficit hídrico.

A frequência de ajuste significativamente maior da fdp exponencial nos subperíodos de desenvolvimento compreendidos entre a semeadura e a emergência (S-EM) e início da maturação e maturação plena (R7-R8) nos dois locais estudados está relacionada à menor duração desses subperíodos ao longo do ciclo da soja em relação aos demais (TRENTIN et al., 2013), o que gera valores de déficit hídrico de menor magnitude e faixa estreita de distribuição, levando a um melhor ajuste da fdp exponencial.

Tabela 6. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o déficit hídrico nos subperíodos da cultura da soja (Subp) 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 setembro a 11 de novembro simuladas em cada ano do período de 1968 a 2017. Santa Maria, RS

(continua)

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/set	S-EM	LN	0,415	0,970	EXP	2,263		LN	0,337	0,900
	EM-V2	LN	1,012	0,962	LN	1,066	0,956	LN	1,082	0,950
	V2-R1	LN	3,217	0,631	LN	3,296	0,637	G	12,611	3,213
	R1-R5	W	81,824	1,949	G	21,704	3,435	G	17,573	3,509
	R5-R7	G	21,746	2,365	G	21,222	2,390	G	21,403	2,393
	R7-R8	EXP	2,966	-	EXP	2,312	-	EXP	3,278	-
01/out	S-EM	EXP	3,390	-	EXP	3,353	-	EXP	3,219	-
	EM-V2	EXP	4,175	-	G	2,897	1,477	G	3,024	1,490
	V2-R1	LN	3,411	0,597	G	11,177	3,459	W	54,718	2,046
	R1-R5	G	17,426	4,270	G	17,911	4,261	W	70,055	2,021
	R5-R7	G	22,090	2,268	LN	3,653	0,742	W	54,735	1,561
	R7-R8	LN	0,643	1,089	EXP	2,681		EXP	4,300	
11/out	S-EM	EXP	3,136	-	EXP	3,643		EXP	3,597	
	EM-V2	W	4,202	1,636	LN	1,174	0,738	G	1,745	2,369
	V2-R1	G	10,363	3,689	G	13,319	3,340	W	63,728	2,134
	R1-R5	G	18,674	4,145	G	18,803	4,116	W	69,313	1,915
	R5-R7	W	52,314	1,659	LN	3,591	0,665	LN	3,573	0,655
	R7-R8	EXP	3,421	-	EXP	3,589	-	LN	1,221	0,905
21/out	S-EM	G	2,383	1,408	EXP	3,251	-	G	2,316	1,399
	EM-V2	G	1,922	2,150	LN	1,192	0,785	G	2,179	2,084
	V2-R1	G	12,338	3,329	G	12,831	3,835	LN	4,002	0,487
	R1-R5	W	83,754	2,025	G	22,889	3,163	W	62,682	1,657
	R5-R7	LN	3,555	0,628	G	12,085	3,262	LN	3,485	0,569
	R7-R8	EXP	3,952	-	EXP	3,806	-	EXP	5,033	-
01/nov	S-EM	EXP	3,999	-	EXP	3,254	-	EXP	3,604	-
	EM-V2	LN	1,495	0,824	LN	1,517	0,807	LN	1,596	0,819
	V2-R1	G	10,645	4,049	LN	3,818	0,500	G	13,764	4,506
	R1-R5	G	23,112	2,893	W	70,225	1,733	G	18,878	2,459
	R5-R7	LN	3,481	0,565	W	41,251	1,782	LN	3,380	0,636
	R7-R8	LN	0,674	1,085	EXP	3,558	-	EXP	5,062	-
11/nov	S-EM	G	3,005	1,407	EXP	4,569	-	W	5,657	1,382
	EM-V2	EXP	6,529	-	EXP	6,866	-	EXP	7,239	-
	V2-R1	G	10,121	4,122	LN	3,786	0,529	LN	3,984	0,504
	R1-R5	G	21,151	2,740	G	19,217	2,719	W	41,482	1,710
	R5-R7	G	11,977	3,010	LN	3,365	0,630	LN	3,365	0,579
	R7-R8	LN	0,606	1,243	EXP	3,860	-	EXP	5,223	-

*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 6. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o déficit hídrico nos subperíodos da cultura da soja (Subp) 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 2017. Santa Maria, RS.

(conclusão)

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	W	4,502	1,178	G	3,125	1,441	G	3,325	1,343
	EM-V2	EXP	5,812	-	EXP	6,027	-	G	3,403	1,810
	V2-R1	G	12,430	3,336	G	12,692	3,856	G	13,251	4,168
	R1-R5	G	16,753	2,809	LN	3,573	0,616	G	13,065	2,394
	R5-R7	LN	3,335	0,638	LN	3,297	0,575	G	9,093	3,422
	R7-R8	LN	0,733	1,249	EXP	4,521	-	EXP	5,547	-
01/dez	S-EM	LN	0,951	0,996	W	4,647	1,403	LN	0,886	0,925
	EM-V2	G	3,313	1,688	G	3,411	1,758	G	3,455	1,754
	V2-R1	G	12,148	3,243	LN	3,620	0,568	LN	3,712	0,545
	R1-R5	LN	3,462	0,606	LN	3,369	0,650	W	30,424	1,590
	R5-R7	LN	3,286	0,579	LN	3,256	0,577	LN	3,203	0,676
	R7-R8	EXP	3,713	-	EXP	3,954	-	EXP	4,763	-
11/dez	S-EM	EXP	4,421	-	EXP	3,979	-	EXP	3,688	-
	EM-V2	EXP	5,955	-	W	6,826	1,446	W	6,905	1,521
	V2-R1	EXP	34,069	-	W	41,731	1,773	G	11,227	3,541
	R1-R5	G	12,783	2,408	W	33,202	1,630	G	11,441	2,132
	R5-R7	LN	3,244	0,561	LN	3,192	0,685	G	11,024	2,647
	R7-R8	EXP	3,421	-	EXP	3,220	-	EXP	3,528	-
21/dez	S-EM	W	4,776	1,395	W	4,517	1,307	G	2,356	1,477
	EM-V2	EXP	5,736	-	G	4,031	1,444	G	3,775	1,508
	V2-R1	W	31,759	1,739	LN	3,282	0,561	G	8,668	3,831
	R1-R5	G	12,595	2,083	G	11,441	2,232	LN	2,867	0,627
	R5-R7	G	11,286	2,604	W	32,771	1,816	N	28,922	16,564
	R7-R8	G	2,530	1,016	LN	-0,129	1,662	W	2,148	0,808
31/dez	S-EM	EXP	3,858	-	EXP	3,806	-	G	2,524	1,248
	EM-V2	EXP	5,190	-	EXP	5,287	-	G	4,368	1,178
	V2-R1	LN	3,036	0,542	G	6,955	3,625	G	7,235	3,794
	R1-R5	LN	2,856	0,670	LN	2,911	0,592	LN	2,667	0,738
	R5-R7	W	32,644	1,776	W	32,255	1,734	G	10,975	2,592
	R7-R8	LN	0,364	1,580	EXP	1,389	-	EXP	1,420	-

*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 7. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o déficit hídrico nos subperíodos da cultura da soja (Subp) 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 Piratini, considerando três grupos de maturidade relativa (GMR), para as datas de semeadura (DS) de 21 de setembro a 11 de novembro simuladas em cada ano do período de 1971 a 2017. Pelotas, RS

(continua)

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/set	S-EM	EXP	2,353	-	EXP	2,318	-	EXP	2,146	-
	EM-V2	W	4,142	1,393	LN	1,059	0,873	W	4,384	1,432
	V2-R1	G	7,817	3,629	W	36,246	2,184	SA	-	-
	R1-R5	W	75,150	2,278	W	76,810	2,420	W	60,730	2,362
	R5-R7	W	50,491	2,056	G	13,187	3,309	W	49,221	2,012
	R7-R8	G	2,832	1,053	EXP	2,927	-	EXP	3,579	-
01/out	S-EM	LN	0,651	0,936	EXP	2,754	-	EXP	2,522	-
	EM-V2	LN	1,056	0,825	EXP	4,009	-	LN	1,098	0,809
	V2-R1	W	35,302	2,374	N	37,013	17,617	W	54,000	2,321
	R1-R5	W	73,659	2,475	G	12,683	5,123	SA	-	-
	R5-R7	G	12,845	3,302	G	13,020	3,160	LN	3,548	0,606
	R7-R8	EXP	2,912	-	EXP	2,565	-	EXP	3,035	-
11/out	S-EM	EXP	2,757	-	EXP	2,783	-	LN	0,405	0,918
	EM-V2	EXP	3,948	-	EXP	4,064	-	EXP	3,957	-
	V2-R1	G	9,317	3,860	G	10,632	4,020	LN	3,861	0,519
	R1-R5	W	69,052	2,542	N	58,797	25,776	W	49,041	2,077
	R5-R7	W	45,205	1,997	LN	3,521	0,522	LN	3,498	0,498
	R7-R8	EXP	2,255	-	EXP	1,989	-	LN	0,594	0,972
21/out	S-EM	EXP	2,461	-	LN	0,476	0,849	EXP	2,476	-
	EM-V2	W	3,658	1,344	G	1,718	1,983	EXP	3,651	-
	V2-R1	G	9,357	4,184	G	11,239	4,052	G	10,401	5,168
	R1-R5	N	54,337	24,802	W	59,515	2,081	LN	3,534	0,600
	R5-R7	W	41,169	2,280	LN	3,351	0,523	G	9,831	3,090
	R7-R8	LN	0,346	1,012	LN	0,369	1,002	EXP	3,298	-
01/nov	S-EM	EXP	2,173	-	SA	-	-	EXP	2,112	-
	EM-V2	LN	1,091	0,720	SA	-	-	LN	1,158	0,714
	V2-R1	G	9,637	4,082	G	10,112	4,408	W	57,676	2,507
	R1-R5	W	54,963	2,010	LN	3,701	0,540	W	39,144	1,927
	R5-R7	W	35,117	2,059	W	30,560	1,632	W	30,282	1,691
	R7-R8	EXP	2,342	-	EXP	2,516	-	EXP	2,987	-
11/nov	S-EM	EXP	2,247	-	EXP	2,365	-	EXP	2,272	-
	EM-V2	G	2,201	1,717	G	2,288	1,710	G	2,236	1,781
	V2-R1	LN	3,505	0,508	G	9,014	4,661	W	54,152	2,486
	R1-R5	W	48,068	1,994	LN	3,510	0,557	LN	3,220	0,537
	R5-R7	G	11,603	2,353	G	10,250	2,562	LN	3,004	0,676
	R7-R8	EXP	2,207	-	EXP	2,409	-	EXP	3,187	-

*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 7. Funções densidade de probabilidade (fdp) selecionadas para determinar o déficit hídrico nos subperíodos da cultura da soja (Subp) 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 Piratini, 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 1971 a 2017. Pelotas, RS.

(conclusão)

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	EXP	2,637	-	EXP	2,737	-	EXP	2,886	-
	EM-V2	G	2,108	2,277	W	5,528	1,727	G	2,308	2,290
	V2-R1	G	8,596	3,943	W	43,677	2,249	G	9,198	4,672
	R1-R5	LN	3,403	0,578	LN	3,322	0,554	W	26,022	1,825
	R5-R7	G	10,432	2,450	LN	2,962	0,659	LN	2,946	0,624
	R7-R8	G	2,002	1,324	EXP	3,063	-	EXP	3,740	-
01/dez	S-EM	G	1,780	1,673	W	3,442	1,377	W	3,123	1,282
	EM-V2	W	5,595	1,580	G	2,695	2,003	G	2,707	1,993
	V2-R1	LN	3,271	0,565	LN	3,384	0,532	LN	3,485	0,499
	R1-R5	G	8,216	3,500	W	28,957	1,942	N	18,874	12,067
	R5-R7	LN	2,950	0,668	G	8,245	2,733	LN	2,937	0,624
	R7-R8	EXP	2,568	-	EXP	2,780	-	EXP	3,421	-
11/dez	S-EM	EXP	2,981	-	EXP	2,792	-	EXP	2,810	-
	EM-V2	EXP	4,891	-	EXP	5,323	-	EXP	5,406	-
	V2-R1	G	7,607	3,584	LN	3,220	0,518	LN	3,283	0,533
	R1-R5	W	23,985	1,836	G	9,703	2,149	W	18,928	1,681
	R5-R7	LN	2,925	0,650	LN	2,915	0,628	LN	2,857	0,658
	R7-R8	EXP	2,360	-	EXP	2,329	-	EXP	2,836	-
21/dez	S-EM	EXP	3,442	-	G	3,292	1,036	EXP	2,839	-
	EM-V2	G	3,380	1,356	EXP	4,625	-	W	4,926	1,254
	V2-R1	LN	2,937	0,582	EXP	23,486	-	G	5,972	4,096
	R1-R5	G	7,922	2,202	G	7,819	2,293	LN	2,487	0,701
	R5-R7	LN	2,893	0,634	W	23,449	1,712	W	23,582	1,645
	R7-R8	EXP	1,958	-	EXP	1,918	-	EXP	2,255	-
31/dez	S-EM	EXP	2,562	-	EXP	2,735	-	EXP	2,530	-
	EM-V2	LN	0,828	0,996	LN	0,928	0,955	LN	0,964	0,973
	V2-R1	LN	2,727	0,537	G	4,295	4,212	LN	2,831	0,540
	R1-R5	G	5,718	2,548	LN	2,499	0,723	W	14,454	1,496
	R5-R7	G	9,036	2,342	SA	-	-	W	23,347	1,706
	R7-R8	EXP	1,497	-	EXP	1,288	-	LN	-0,245	1,253

*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.

CONCLUSÕES

A maior frequência de ajuste para os dados de excesso hídrico no ciclo da soja foi obtida para a fdp normal, em Santa Maria e fdp weibull e gama em Pelotas.

A fdp lognormal foi a que melhor se ajustou aos dados de déficit hídrico ao longo do ciclo da soja, independentemente do local.

Considerando o excesso hídrico nos subperíodos de desenvolvimento da soja, as fdp normal e weibull foram as que apresentaram o melhor desempenho para ambos os locais. Já para o déficit hídrico o melhor ajuste se deu para as fdp gama, lognormal e exponencial.

REFERÊNCIAS

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

ARAÚJO, E. M. et al. Aplicação de seis distribuições de probabilidade a séries de temperatura máxima em Iguatu – CE. **Revista Ciência Agronômica**, 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**, v. 12, n. 1, p. 113-121, 2004.

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**, v. 8, n. 1, p. 121-132, 2000.

BEUTLER, A. N. et al. Soil hydric excess and soybean yield and development in Brazil. **Australian Journal of Crop Science**. v. 8, n. 10, p. 1461-1466, 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**, v. 7, n. 1, p. 97-104, 2001.

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**, v. 10, n. 1, p. 153-162, 2002.

ECK, H. V.; MATHERS, A. C.; MUSICK, J. T. Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans. **Field Crops Research**, v. 17, n. 1, p. 1-16. 1987.

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

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

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.

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**, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2005.

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

RODRIGUES, J. A.; FILHO, J. S.; CHAVES, L. M. Funções densidade de probabilidade para a estimativa de precipitação mensal. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 34, n. 1, p. 03-08, 2013.

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

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**, 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**, v. 11, n. 1, p. 67-72, 2007.

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

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