Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Variabilidade e efeitos da precipitação pluvial sobre a disponibilidade hídrica,
crescimento e produção de soja em uma fazenda no estado de Mato Grosso

Brena Geliane Ferneda

Dissertação apresentada para a obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2020

Brena Geliane Ferneda
Engenheira Agrícola e Ambiental

**Variabilidade e efeitos da precipitação pluvial sobre a disponibilidade hídrica,
crescimento e produção de soja em uma fazenda no estado de Mato Grosso**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **FELIPE GUSTAVO PILAU**

Dissertação apresentada para a obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Ferneda, Brena Geliane

Variabilidade e efeitos da precipitação pluvial sobre a produção de soja em uma área de produção no estado de Mato Grosso / Brena Geliane Ferneda. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

79 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Soja 2. Variabilidade da chuva 3. APSIM-Soybean 4. Modelagem 5. Variabilidade produtiva I. Título

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, um agradecimento mais que especial à minha mãe, Bernadete, pela preocupação, apoio e entendimento às ausências.

À minha irmã Bruna, pelas conversas quase diárias e à proximidade que se firmou devido à distância. E ao meu irmão Renan, exemplo de pessoa e meu orgulho.

Agradeço ao meu orientador, Felipe, pelos ensinamentos e apoio durante toda minha trajetória no curso e nessa etapa da vida.

Aos integrantes do GEPEMA-AGRIMET, em especial ao Karlmer, amigo para todas as horas, sejam elas de trabalho, comemorações ou perrengues.

Ao Wilson, por disponibilizar parte dos dados utilizados para a calibração do modelo.

À Isis e à Tamara, pela amizade, conversas, risadas e pela companhia diária em nossa casa/lar.

Ao Acácio, por tornar minha mudança tão sutil e prazerosa, e pela companhia em tantos momentos felizes.

Aos funcionários do departamento de biossistemas, em especial ao Áureo, Chicão, Juarez e Gilmar que auxiliaram na manutenção e aferição de equipamentos.

Ao Departamento de Biossistemas e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela possibilidade de aprimorar meus conhecimentos e possibilitar tanto crescimento como pessoa como profissional.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	9
REFERÊNCIAS	12
2. VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CHUVA UMA ÁREA DE PRODUÇÃO DE SOJA NA REGIÃO DE CERRADO MATOGROSSENSE	17
RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	17
2.1. INTRODUÇÃO	17
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
2.2.1. Área experimental.....	19
2.2.2. Variabilidade espaço-temporal da chuva e espacial do solo	20
2.2.3. Consistência da série de dados e análise da variabilidade espacial da precipitação	22
2.2.4. Variabilidade espacial das características físicas do solo	23
2.2.5. Balanço hídrico sequencial.....	24
2.2.6. Produtividade da cultura da soja.....	24
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
2.3.1. Variabilidade espaço-temporal da chuva.....	25
2.3.2. Variabilidade espacial das características de solo.....	30
2.2.6. Disponibilidade hídrica pontual.....	32
2.4. CONCLUSÕES	36
REFERÊNCIAS	37
3. CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO APSIM-SOYBEAN PARA UMA ÁREA DE PRODUÇÃO DE SOJA NO MATO GROSSO	47
RESUMO.....	47
ABSTRACT.....	47
3.1. INTRODUÇÃO	47
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.2.1. O modelo APSIM-Soybean.....	50
3.2.2. Dados experimentais.....	50
3.2.3. Análise de sensibilidade do modelo APSIM-SOYBEAN.....	54

3.2.4. Avaliação do modelo	56
3.2.5. Relação entre produtividade observada e estimada	56
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
3.3.1. Caracterização meteorológica	56
3.3.2. Sensibilidade do modelo APSIM-Soybean.....	59
3.3.3. Calibração e avaliação do modelo	63
3.3.4. Relação entre a produtividade observada e simulada.....	64
3.4 CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS.....	69
4.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79

RESUMO

Variabilidade e efeitos da precipitação pluvial sobre a disponibilidade hídrica, crescimento e produção de soja em uma fazenda no estado de Mato Grosso

A produção agrícola é determinada pela interação solo, clima e planta, mais restritamente por condições de disponibilidade hídrica. Porém, apesar da chuva estar diretamente atrelada ao sucesso da lavoura, normalmente há apenas um ponto de coleta na unidade e isso gera incertezas de como a distribuição pluviométrica afetará a variabilidade produtiva. Então, partindo da hipótese de que há variabilidade de chuva em curtas distâncias, e que esse fator, atrelado às características de solo refletem na produção agrícola, objetivou-se avaliar o efeito de clima e solo na produtividade da soja em uma área de produção de soja no estado de Mato Grosso. O estudo foi realizado em uma fazenda localizada no município de General Carneiro – MT durante a safra 2018/19, para o monitoramento meteorológico foi instalada uma estação meteorológica e 9 pluviômetros em uma área de 535 hectares. Avaliou-se a fenologia da cultura e a produtividade ao final. Além, foi calibrado o modelo APSIM-Soybean para a região de estudo para a determinação da produtividade atingível da área. Os principais resultados encontrados evidenciaram que há variabilidade espacial das chuvas em uma área pequena, porém esses dados devem ser atrelados a demais características da área e durante um período maior de tempo para a confirmação da interferência na produtividade da cultura. A variabilidade produtiva da área estudada foi considerável, com dados evidenciando a forte influência da disponibilidade hídrica no cultivo de soja e o modelo APSIM-Soybean subestimou a produção de biomassa da cultura, mas apresentou bons resultados na estimativa de produtividade nos diferentes talhões da área de estudo.

Palavras-chave: Soja, Variabilidade da chuva, APSIM-Soybean, Modelagem, Variabilidade produtiva

ABSTRACT

Variability and effects of rainfall on water availability, growth and soybean production on a farm in the state of Mato Grosso

Agricultural production is determined by soil, climate and plant interaction, more restrictively by water availability conditions. However, although rainfall is directly linked to the success of the crop, there is usually only one collection point in the unit and this creates uncertainties about how rainfall distribution will affect production variability. So, assuming that there is variability of rainfall over short distances, and that this factor, linked to the soil characteristics reflect the agricultural production, the objective was to evaluate the effect of climate and soil on soybean yield in a production area of soybean in the state of Mato Grosso. The study was carried out in a farm located in the city of General Carneiro – MT during the 2018/19 harvest. For meteorological monitoring, a meteorological station and 9 rainfall gauges were installed in an area of 535 hectares. Crop phenology and yield were evaluated at the end. In addition, the APSIM-Soybean model was calibrated for the study region to determine attainable area productivity. The main results showed that there is spatial variability of rainfall in a small area, but these data must be linked to other characteristics of the area and for a longer period of time to confirm the interference with crop yield. The productive variability of the studied area was considerable, with data showing the strong influence of water availability on soybean cultivation and the APSIM-Soybean model underestimated the biomass production of the crop, but presented good results in the estimated yield in the study area.

Keywords: Soybean, Rainfall variability, APSIM, Modeling, Yield variability

1. INTRODUÇÃO GERAL

Em todo o mundo, a agricultura certamente é a atividade econômica mais dependente e influenciada pelas condições de solo e especialmente clima, onde eventos meteorológicos extremos são as principais causas de insucesso nas lavouras. Em escala mundial, a agricultura é majoritariamente de sequeiro, e os dados oficiais apontam que mais de 80% da variabilidade produtiva se devem as condições meteorológicas (BORGHETTI et al., 2017). A disponibilidade hídrica, naturalmente variável devido à distribuição irregular da precipitação, é o fator mais restritivo.

Ao proceder a análises ao nível de um talhão de produção é possível encontrar subáreas com diferentes níveis de qualidade e, portanto, com diferentes potenciais produtivos, embora as práticas de manejo adotadas sejam aplicadas uniformemente (Amado et al., 2005). Entender e quantificar espacialmente as diferenças dos atributos químicos e físicos do solo, biológicos e microbiológicos e, também, meteorológicos, todos condicionantes da variabilidade espacial da produção é essencial para adoção de manejos diferenciados, objetivo da Agricultura de Precisão.

Nesse contexto, inúmeros trabalhos já foram desenvolvidos, explorando principalmente as questões relativas ao solo e suas relações com a produtividade das culturas (RAB et al., 2009; MOLIN & RABELLO, 2011; MONDO et al., 2012; SANA et al., 2014; CORDERO et al., 2019). A variabilidade espacial e temporal dos elementos meteorológicos na unidade de produção e efeitos sobre o rendimento final das lavouras, porém, foi praticamente negligenciada.

De acordo com os dados das últimas safras, 2008/09 a 2018/19, o Brasil aumentou de 57,1 para 115,0 milhões de toneladas a sua produção de soja (Conab, 2019). Nesse período o estado do Mato Grosso (MT) manteve-se como maior produtor nacional, passando dos 17,9 para os 32,4 milhões de toneladas de grãos, correspondendo, em média, a 28,8% da produção nacional. A produtividade média das lavouras no MT, se mostra variável, oscilando aleatoriamente entre os 2.931 kg ha⁻¹ e os 3.447 kg ha⁻¹. A principal causa da variabilidade produtiva são os elementos meteorológicos, principalmente temperatura e falta ou excesso de chuvas (BERGAMASCHI et al., 2006; SEIDEL et al., 2019; HE & WANG, 2019). Isso ressalta a importância de congrega a análise meteorológica e seus impactos na produção,

das escalas regionais do estado até o nível de lavoura (WONG & ASSENG, 2006; IRMAK et al., 2019; KUKAL & IRMAK, 2020).

Comumente, aumentos pontuais de precipitação pluvial tendem a favorecer a cultura, enquanto as estiagens são responsáveis por perdas produtivas consideráveis. Entretanto, é necessário analisar a quantidade precipitada e o respectivo momento de sua ocorrência, uma vez que o excesso hídrico também pode causar perda produtiva (ELY et al., 2003; SILVA et al., 2008; BATTISTI & SENTELHAS, 2019). Portanto, o monitoramento da variabilidade temporal e espacial da precipitação pluvial é essencial à determinação da época de semeadura bem como para o monitoramento da cultura estabelecida em campo.

A variabilidade das chuvas pode ser observado tanto espacial, sendo fortemente influenciada pela latitude (WESTRA et al., 2013) quanto temporalmente, característica observada mais claramente quando as chuvas tem origem convectivas, tanto em escala diária quanto menores (LENDERINK & VAN MEIJGAARD, 2008; UTSUMI et al., 2011).

Stol (1972) e Bega et al., (2005) destacam essa questão, mostrando com dados medidos que a variabilidade espacial das chuvas se acentua quando há predomínio de chuvas convectivas, condição que caracteriza também o estado do Mato Grosso (BORSATO, 2011). Ao contrário, sob a influência de sistemas frontais tem-se distribuição espacial mais uniforme mesmo para longas distâncias (VIANELLLO & ALVES, 1991).

Assim como a meteorologia, o solo exerce papel crucial sobre a variabilidade espacial da produção. Seus atributos químicos (nutrição mineral) e físicos (compactação, retenção e fluxo de água e gases, etc.) agem sobre o crescimento e desenvolvimento vegetal (ROSOLEM et al., 2011). De forma geral, culturas agrícolas implantadas em solos de textura média ou argilosa tendem a ser beneficiadas, uma vez que esses solos proporcionam melhor drenagem e tem maior capacidade de reter a água, quando comparados a solos de textura predominantemente arenosa (SANTOS & CARLESSO, 1999).

Considerando a importância das características físicas do solo para a retenção de água (STONE & SILVEIRA, 2001; SECCO et al., 2005), mas entendendo a dificuldade de quantificá-las em alta resolução espacial, diversos trabalhos propõem equações físico-matemáticas denominadas funções de pedotransferência (FPTs) (BOUMA, 1989; TOMASELLA & HODNETT, 1998; TOMASELLA et al., 2000;

TOMASELLA et al., 2003; TORMENA et al., 2007; FIORIN, 2008; BARROS et al., 2013; MEDRADO & LIMA, 2014).

Os dados de entrada demandados por tais modelos (FPTs) são, muitas vezes, usualmente definidos nas áreas manejadas com Agricultura de Precisão. Assim, uma vez determinados os parâmetros da curva de retenção (VAN GENUCHTEN, 1980) a partir das FPTs, tem-se a possibilidade de simular a variação espaço-temporal do armazenamento de água no solo e seus efeitos ao longo do ciclo e na produtividade final das lavouras, seja através de relações simples com os mapas de produtividade ou a partir de simulações da variação temporal do armazenamento de água (SHELIA et al., 2019).

No contexto das simulações com modelos de crescimento de plantas, a máxima produtividade, denominada Potencial (Y_o), será definida pelas características de uma planta, bem adaptada às condições nas quais está inserida, respondendo unicamente à disponibilidade de CO_2 e energia (radiação solar/fotoperíodo/temperatura do ar). Esta situação elimina todas as demais influências, sejam de clima, solo ou bióticas. Portanto, há um valor referencial teórico do máximo produtivo local. Ao considerar a natural variabilidade da precipitação pluvial e sua interferência na produção agrícola, tem-se definido um novo limite de produtividade, denominado de atingível (Y_a). A partir deste segundo nível, se estabelece o efeito hídrico sobre a produção vegetal. A produtividade de campo ou real, é a que integra todos os demais condicionantes ao efeito hídrico (PEREIRA et al., 2002; MARIN et al., 2008).

Para identificar Y_o e Y_a podem ser usados modelos simples (FAO) aos mais robustos (JONES et al., 2003; HOLZWORTH et al., 2014). O uso dessas ferramentas é amplo, abrangendo inúmeros objetivos e cultivos agrícolas (NASSIF et al., 2012; ALMEIDA, 2013; ZHAO et al., 2014; DIETZEL et al., 2016; DESCHEEMAER et al., 2018; DIXIT et al., 2018; NÓIA JUNIOR & SENTELHAS, 2019). A singularidade entre as ferramentas é o uso de um banco de dados de características de solo, planta e clima. Ao considerar as variações desses elementos na unidade de produção (talhão) e suas consequências sobre a produtividade, a forma tradicional de simulação deve ser substituída por aquelas que simulem em alta resolução espacial (SHELIA et al., 2019).

Uma vez identificada a variabilidade espaço-temporal da chuva e de solo em uma área de produção agrícola, especificamente para a cultura da soja, pretende-se

validar a hipótese de que parte da variabilidade produtiva, descritas pelos mapas de produção (AP), é por isso ocasionada.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. S. Modelagem agrometeorológica-espectral para estimativa da produtividade de cafeeiros para áreas irrigadas do noroeste de Minas Gerais. p. 63, 2013.
- BARROS, A. H. C. et al. Comissão 2.2 - Física do solo Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 379–391, 2013.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v. 240, n. June, p. 95–105, 2019.
- BEGA, R. M. et al. Variabilidade espacial das precipitações pluviárias diárias em uma estação experimental, em Pindorama, SP. **Bragantia**, v. 64, n. 1, p. 149–156, 2005.
- BERGAMASCHI, H. et al. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243–249, 2006.
- BORGHETTI, J. R. et al. **Agricultura irrigada sustentável no Brasil : Identificação de áreas prioritárias**. [s.l.: s.n.].
- BORSATO, V. DA A. A dinâmica atmosférica no centro-sul do Brasil no verão e as influências do El Niño Oscilação Sul (ENOS). **Geography Department, University of Sao Paulo**, v. 22, n. 2011, p. 135–157, 2011.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Advances in Soil Science**. 9. ed. New York: Springer Verlag, 1989. p. 177–213.
- CORDERO, E. et al. Spatial management strategies for nitrogen in maize production based on soil and crop data. **Science of The Total Environment**, v. 697, p. 133854, 2019.
- DESCHEEMAEEKER, K. et al. Effects of climate change and adaptation on the livestock component of mixed farming systems: A modelling study from semi-arid Zimbabwe. **Agricultural Systems**, v. 159, n. May 2017, p. 282–295, 2018.
- DIETZEL, R. et al. How efficiently do corn- and soybean-based cropping systems use water ? A systems modeling analysis. **Global Change Biology**, v. 22, p. 666–681, 2016.
- DIXIT, P. N. et al. Decadal analysis of impact of future climate on wheat production in dry Mediterranean environment: A case of Jordan. **Science of the Total Environment**, v. 610–611, p. 219–233, 2018.

ELY, D. F.; ALMEIDA, I. R. DE; NETO, J. L. S. Variabilidade climática e o rendimento da cultura do milho no estado do Paraná: algumas implicações políticas e econômicas. **Geografia**, v. 12, n. 1, p. 495–508, 2003.

FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

HE, D.; WANG, E. On the relation between soil water holding capacity and dryland crop productivity. **Geoderma**, v. 353, n. January, p. 11–24, 2019.

IRMAK, S. et al. Disk-till vs. no-till maize evapotranspiration, microclimate, grain yield, production functions and water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 216, n. November 2018, p. 177–195, 2019.

KUKAL, M. S.; IRMAK, S. Characterization of water use and productivity dynamics across four C3 and C4 row crops under optimal growth conditions. **Agricultural Water Management**, v. 227, n. May 2019, p. 105840, 2020.

LENDERINK, G.; VAN MEIJGAARD, E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 8, p. 511–514, 2008.

MARIN, F. R. et al. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 1449–1455, 2008.

MEDRADO, E.; LIMA, J. E. F. W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma Regional**, v. 1, p. 59–66, 2014.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 90–101, 2011.

MONDO, V. H. V. et al. Spatial variability of soil fertility and its relationship with seed physiological potential in a soybean production area. **Revista brasileira de sementes**, v. 34, n. 2, p. 193–201, 2012.

NASSIF, D. S. P. et al. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 3, p. 311–318, 2012.

NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, n. August 2018, p. 140–151, 2019.

PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas. **Guaíba: Agropecuária**, 2002.

RAB, M. A. et al. Advances in precision agriculture in south-eastern Australia. IV. Spatial variability in plant-available water capacity of soil and its relationship with yield in site-specific management zones. **Crop and Pasture Science**, v. 60, n. 9, p. 885–900, 2009.

ROSOLEM, C. A.; BICUDO, S. J.; MARUBAYASHI, O. M. Soybean yield and root growth as affected by lime rate and quality. **Plant-Soil Interactions at Low pH: Principles and Management**, n. 1, p. 543–547, 2011.

SANA, R. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 994–1002, 2014.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Relações Água-Solo-Planta-Atmosfera: Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a déficit hídrico em diferentes solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 1–6, 1999.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e produtividade de culturas em um latossolo vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 407–414, 2005.

SEIDEL, S. J. et al. The influence of climate variability, soil and sowing date on simulation-based crop coefficient curves and irrigation water demand. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 73–83, 2019.

SHELIA, V. et al. A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies. **Environmental Modelling and Software**, v. 115, n. October 2018, p. 144–154, 2019.

SILVA, D. F. DA; PRELA-PANTANO, A.; NETO, J. L. S. Variabilidade da precipitação e produtividade agrícola na região do médio Paranapanema, SP. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, p. 101–116, 2008.

STOL, P. T. The relative efficiency of the density of rain-gage networks. **Journal of Hydrology**, v. 15, n. 3, p. 193–208, 1972.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 395–401, 2001.

TOMASELLA, J.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, p. 1085–1092, 2003.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, n. 3, p. 190–202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 327–338, 2000.

TORMENA, C. A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 211–219, 2007.

UTSUMI, N. et al. Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 16, p. 1–5, 2011.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V.; ZWIERS, F. W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. **Journal of Climate**, v. 26, n. 11, p. 3904–3918, 2013.

WONG, M. T. F.; ASSENG, S. Determining the causes of spatial and temporal variability of wheat yields at sub-field scale using a new method of upscaling a crop model. **Plant and Soil**, v. 283, n. 1–2, p. 203–215, 2006.

ZHAO, G.; BRYAN, B. A.; SONG, X. Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: Interactions between cultivar, environmental, and management parameters. **Ecological Modelling**, v. 279, p. 1–11, 2014.

2. VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CHUVA E ESPACIAL DO SOLO EM UMA ÁREA DE PRODUÇÃO DE SOJA NA REGIÃO DE CERRADO MATOGROSSENSE

RESUMO

A variabilidade produtiva de culturas agrícolas é observada em diferentes escalas e justificada, majoritariamente, por fatores de solo, porém, considerando a água como fator limitante ao crescimento, desenvolvimento e produção, é imprescindível o conhecimento acerca da variabilidade espaço-temporal da disponibilidade hídrica em nível de fazenda. Então, considerando a pouca ou inexistente medida pontual de chuva em área de produção de soja, objetivou-se avaliar a variabilidade espaço-temporal da precipitação e sua influência no crescimento e produção da soja em uma área produtiva. Para tanto, foram instalados 9 pluviômetros com distância máxima de 3022 metros em três talhões de soja. Os resultados evidenciam a presença de variabilidade espacial e temporal da chuva mesmo entre distâncias curtas. O efeito combinado de solo e do clima, analisado através de um balanço hídrico, aponta que parte da variabilidade de produtividade agrícola pode estar ligada a variabilidade espaço-temporal da disponibilidade de água para a cultura.

Palavras-chave: Variabilidade espaço-temporal da chuva, Variabilidade espacial do solo, Disponibilidade hídrica, Soja

ABSTRACT

The yield variability of agricultural crops is observed in different scales and mainly justified by soil factors, however, considering water as a limiting factor for growth, development and production, knowledge about the spatiotemporal variability of water availability is essential at farm level. Therefore, considering the little or no point measure of rainfall in soybean production area, the objective was to evaluate the spatiotemporal variability of precipitation and its influence on soybean growth and production in productive area. To this end, 9 rain gauges were installed with a maximum distance of 3022 meters in three soybean stands. The results evidenced the presence of spatial and temporal variability of the rainfall even between short distances. The combine effect of soil and climate, analyzed through Water Balance, shows that part of the variability in agricultural yield may be linked to the spatiotemporal variability for the crop.

Keywords: Spatial-temporal rainfall variability, Soil spatial variability, Water availability, Soybean

2.1. INTRODUÇÃO

O Brasil, segundo maior produtor mundial de soja, é responsável por 32,7% da produção da oleaginosa. A posição de destaque mundial só foi alcançada com investimentos em pesquisa, que levaram à "*tropicalização*" da soja. Foi o

melhoramento genético, trazendo cultivares com período de juvenilidade prolongada, que possibilitou produzir o grão em regiões de baixas latitudes, entre o trópico de capricórnio e a linha do equador. Ademais, o manejo teve de associar uma produção em solos naturalmente ácidos e pouco férteis (LOPES & GUILHERME, 1994), mas que bem manejados permitem altos rendimentos.

O resultado de todo esse processo pode ser sucintamente descrito ao marcar o Centro Oeste como responsável por 46% da produção nacional da soja. Na região, o estado do Mato Grosso (MT) desde o início do cultivo da oleaginosa assumiu a liderança na produção. Na safra 2018/19 no MT foram cultivados 9,95 milhões de hectares, produzindo 33,12 milhões de toneladas de soja (CONAB, 2019).

Localizado entre os meridianos $-53,2^{\circ}$ e $-58,1^{\circ}$ e paralelos $-18,0^{\circ}$ e $-7,35^{\circ}$, composto pelo Bioma Pantanal (extremo sudoeste), o Bioma Cerrado (centro-sul), área de transição Cerrado-Amazônia (centro-norte) e o Bioma Amazônia (porção norte), o estado tem como principais características climáticas a temperatura elevada e a sazonalidade das chuvas, com uma estação seca entre os meses de abril e setembro e outra chuvosa entre outubro e março. Pois são nesses meses, com temperatura média entre os 23°C e 27°C , e totais sazonais de chuva acumulada chegando até os 1900 mm, que a produção agrícola atinge recordes produtivos.

Portanto, na região Centro-Sul do Mato Grosso, sob um clima tropical de savana - tipo Aw (AYOADE, 1996; ALVARES et al., 2013; SOUZA et al., 2013), a agricultura local versa de safra e safrinha nas áreas de sequeiro, com a possibilidade de uma terceira safra em lavouras irrigadas.

Na maior parte do estado do Mato Grosso as chuvas são predominantemente convectivas, devido à proximidade do estado com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (VIANELLO & ALVES, 1991; BORSATO, 2011; Oliveira et al., 2015). Chuvas convectivas são marcadas por intensidades elevadas e de curta duração (DEY & MUJUMDAR, 2019; SREEKANTH et al., 2019). Nas áreas tropicais esses registros são explicados por alterações no teor de umidade e movimento/circulação atmosféricas, bem como por índices de instabilidade dinâmica local (KUMAR et al., 2019).

Basicamente por isso, Sousa et al., (2007) e Marcuzzo et al., (2011) apontam uma irregularidade espacial na distribuição das chuvas no Mato Grosso. De acordo com os trabalhos, há um gradiente latitudinal com redução dos totais anuais de chuva entre o norte e o sul do estado. Enquanto na porção norte os valores podem chegar

aos 2750 mm ano⁻¹, no sul do estado as chuvas apresentam totais acumulados de 1400 a 1500 mm (NIMER, 1979; DINIZ et al., 2018).

Para locais e épocas com predominância de chuvas convectivas, similar ao Mato Grosso, alguns trabalhos registraram variabilidade dos volumes precipitado mesmo em áreas muito próximas, entre 1 km (MELLAART, 1999) e 5 km (HUBBARD, 1994). De forma similar, (REICHARDT et al., 1995) relataram variabilidade em distâncias menores que 1000m e em locais de clima árido e semiárido a distâncias de 1,5 a 2,8 km (MARRA & MORIN, 2018).

Em vista da ocorrência natural da variabilidade espaço-temporal da chuva, especialmente quando há predominância de chuvas convectivas, agronomicamente torna-se importante integrar as características de solo quanto a capacidade de reter água. Assim, com o pleno entendimento da variabilidade de armazenamento de água, também variável no espaço e no tempo, associado à fenologia da cultura, pode-se ter um melhor juízo do efeito hídrico dentro da unidade de produção.

Essa análise agrometeorológica, associada a todas as outras correlações já normalmente feitas em áreas de Agricultura de Precisão (AP), como a determinação espacial de zonas produtivas (MOLIN et al., 2015), melhoram a capacidade de entendimento a cerca da variabilidade produtiva e auxilia na compreensão do quão efetivo é cada manejo implementado, a exemplo de novas cultivares, manejo mineral, etc.

Portanto, partindo do pressuposto que o solo de uma determinada área pode ser manejado e tratado heterogeneamente, contrapondo ao realizado com condições de chuva por se tratar de um fator incontrollável, o objetivo foi determinar e discutir sobre a presença de variabilidade de disponibilidade hídrica em uma área de produção de soja.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Área experimental

O trabalho foi conduzido na Fazenda São Sebastião (coordenadas da sede: 15,549803°S, 53,624680°O, 574 m), localizada no município de General Carneiro, estado do Mato Grosso (Figura). De acordo com a classificação de Koppen, o clima

local é classificado como tropical de savana – tipo Aw (SOUZA et al., 2013), marcado por duas estações bem definidas, uma seca e outra chuva, compreendendo os períodos de abril a outubro e de novembro a março, respectivamente. A precipitação média local é de 1600 mm ano⁻¹, registrando maiores valores acumulados nos meses de dezembro e janeiro. Nos período primavera/verão também são registradas temperaturas do ar elevadas, com a máxima podendo superar os 40°C.

Na propriedade foram delimitados três talhões (T1, T2 e T3) de produção de soja, totalizando 535 hectares. Nessa área foram realizados o monitoramento da variabilidade espacial e temporal da chuva, espacial do solo e monitoramento do crescimento, desenvolvimento e produção da cultura da soja. O período experimental prolongou-se do mês de Outubro de 2018 a Fevereiro de 2019, compreendendo a safra de soja 2018/19.

Figura 1. Localização dos pluviômetros nas cidades circunvizinhas à fazenda e nos talhões da fazenda localizada em General Carneiro - MT.

2.2.2. Variabilidade espaço-temporal da chuva e espacial do solo

Para analisar a variabilidade regional da precipitação foram utilizados dados de precipitação diária das bases do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional das Águas (ANA), compreendendo o período de janeiro de 2008 a maio de 2019 (Tabela 1). As estações meteorológicas (Tabela 1) estão instaladas com

distância mínima de 41,9 km e máxima de 313,8 km entre si, circunvizinhas da Fazenda São Sebastião, no município de General Carneiro, MT.

Tabela 1. Localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas para avaliação pluviométrica em mesoescala.

Cidade	Latitude (S)	Longitude (O)	Altitude (m)	Agência
Barra do Garças	15°02'08"	52°14'16"	318	ANA
Campo Verde	15°31'53"	55°08'08"	748	INMET
General Carneiro	15°42'00"	52°45'00"	366	ANA
Guiratinga	16°21'03"	53°45'03"	551	INMET
Nova Xavantina	14°40'24"	52°21'11"	275	ANA
Poxoréo	15°49'36"	54°23'42"	450	ANA
Primavera do Leste	15°34'47"	54°22'51"	680	ANA
Santo Antônio do Leste	14°55'40"	53°53'01"	664	INMET

Para analisar a variabilidade espaço-temporal da precipitação, foram instalados nove pluviômetros nos talhões da fazenda São Sebastião (Figura 1). Os sensores foram distribuídos na área de produção de soja fazendo as distâncias entre pontos variaram de 700 a 3022m. Para organizar a coleta, armazenamento e análises os pluviômetros foram identificados como P1, P2, P3 instalados no talhão 1 (T1); P4, P5 e P6 no talhão 2 (T2); P7, P8 e P9 no talhão 3 (T3). Os pluviômetros dos talhões T1 e T2 (P1, P2, P3, P4, P5 e P6) foram instalados no dia 19/10/2018, enquanto os demais (P7, P8 e P9) foram instalados no dia 09/11/2018. Portanto, em função das diferenças em períodos de coleta entre os talhões T1 e T2 (132 dias consecutivos de medida), frente ao talhão T3 (111 dias consecutivos de medidas), a análise da variabilidade espaço-temporal da chuva foi feita separadamente.

Entretanto, ressalta-se que ambos os períodos de mensuração possibilitaram analisar o efeito da chuva sobre a soja, pois os períodos de produção da oleaginosa (semeadura à colheita) foram totalmente compreendidos (Tabela 2).

Tabela 2. Cultivares, datas de semeadura, duração fenológica (com relação aos estádios apresentados na figura 4 (S-Vn, R1, R3, R6, R8) e data colheita da soja em cada talhão da área de produção.

Talhão	Cultivar	Ciclo médio (Dias)	Data de semeadura	Data de Colheita	Fenologia (dias)				
					S-R1	R1-R3	R3-R5	R5-R6	R6-R8
T1	TMG 1180RR	113	20/10/2018	10/02/2018	37	13	12	34	17
T2	BRS 7780IPRO	116	27/10/2018	20/02/2019	39	12	14	35	15
T3	NS 7709IPRO	123	02/11/2018	05/03/2019	40	15	15	35	16

Os pluviômetros de modelo “*Tipping Bucket*”, marca Vaisala, com superfície de coleta de 380 cm², foram instalados a 1,5 m acima da superfície, nivelados e ligados a sistemas de aquisição de dados “Log Chart II”, coletando na frequência de 1 Hz e armazenando as medidas a cada minuto.

2.2.3. Consistência da série de dados e análise da variabilidade espacial da precipitação

As séries temporais de dados de precipitação regional (Tabela 1) e da fazenda (Figura 1) foram preliminarmente avaliadas incluindo os períodos com funcionamento simultâneo de todos os pluviômetros de cada malha amostral.

A variabilidade espacial da precipitação, para as escalas diária e mensal, foi quantificada a partir do desvio padrão (Eq. 1) e do coeficiente de variação (Eq. 2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

onde σ é o desvio padrão da amostra (mm), n é o tamanho da amostra. e $\bar{x}$ é a média aritmética (mm).

$$Cv = 100 \cdot \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2)$$

sendo Cv o coeficiente de variação de Pearson (%), σ o desvio padrão (mm) e $\bar{x}$ a média aritmética (mm) da precipitação entre os pluviômetros.

Também foi avaliada a correlação de Pearson (ρ) em relação às distâncias entre os pluviômetros (Eq. 3).

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (3)$$

Em que ρ é a correlação de Pearson, $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias aritméticas de cada variável, n é o tamanho da amostra, $cov(X,Y)$ é a covariância entre as duas variáveis e $var(X,Y)$ é a variância da amostra.

2.2.4. Variabilidade espacial das características físicas do solo

As características granulométricas do solo [argila (%), silte (%) e areia (%)] foram determinadas a partir da coleta de amostras deformadas, com o uso de um trado do tipo holandês nos talhões da Fazenda São Sebastião (Figura 1). Uma área circular, com aproximadamente 10m de raio foi demarcada para as coletas, circulando cada pluviômetro instalado. Para cada ponto foram coletadas três amostras de solo em cada profundidade, de 0-20 e 20-40 cm. As amostras extraídas de cada camada de solo foram homogeneizadas, resultando em uma única análise laboratorial. A única exceção foi o ponto 7 (P7) que, por conta da presença de cascalho na profundidade de 20-40cm, teve somente coletas para a profundidade de 0-20 cm.

A determinação da granulometria foi realizada pelo método da sedimentação (BOUYOUCOS & CASAGRANDE, 1934), baseado na “Lei de Stokes”.

Para determinar a densidade do solo e foram coletadas doze amostras indeformadas no talhão T1, próximo ao pluviômetro P3. Para as coletas foi utilizado um trado tipo “Uhland” e anéis cilíndricos de 100 cm³ (5,1cm de diâmetro e 5,0cm de altura). Seis amostras foram extraídas na profundidade de 0-20 cm e outras seis na profundidade de 20-40 cm. As amostras foram devidamente armazenadas para a determinação da curva de retenção de água. Para isso as amostras foram saturadas e posteriormente acondicionadas na câmara de Richards, iniciando com a pressão de 10 KPa, até 1500 KPa.

Para a determinação da umidade do solo em capacidade de campo (θ_{cc} , cm³ cm⁻³) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp} , cm³ cm⁻³), de todos os pontos de coleta da precipitação, nos três talhões, foram utilizadas funções de pedotransferência (MEDRADO & LIMA, 2014).

Com os parâmetros definidos, a partir da equação de Van Genuchten (Eq. 4) foram determinados os referenciais de umidade θ_{cc} (capacidade de campo, 30 KPa) e θ_{pmp} (ponto de murcha permanente, 1500 KPa).

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{(1 + \alpha \cdot h)^n} \right]^{(1-1/n)} \quad (4)$$

Onde θ é o conteúdo volumétrico de água, θ_r é a umidade residual e θ_s umidade de saturação, α é um parâmetro relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar m e n são adimensionais.

2.2.5. Balanço hídrico sequencial

Para estimar a variação do armazenamento de água no solo ao longo dos ciclos de produção da soja, em cada um dos talhões (Tabela 2), foram contabilizados balanços hídricos (Thorthwaite & Mather, 1955) diários ponto a ponto, para cada local de medida da chuva na área de produção de soja, considerando as especificidades pontuais de solo.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada segundo o modelo proposto por Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408s*(Rn-G) + \frac{\gamma*900*U_2*(es-ea)}{T+273}}{s + \gamma(1+0,34*U_2)}$$

Em que R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹), G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹), e_s é a pressão saturante de vapor da água (KPa), e_a é a pressão parcial de vapor da água (KPa), T é a temperatura média do ar (°C), U₂ é a velocidade do vento a 2m de altura (m s⁻¹), s é a tangente da curva de pressão saturante de vapor d'água no ar (KPa °C⁻¹) e γ o coeficiente psicrométrico (KPa °C⁻¹)

Todos os dados meteorológicos foram obtidos da estação meteorológica do INMET, localizada em Primavera do Leste – MT.

Para estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) foram utilizados os coeficientes de cultura (K_c) propostos por da Silva et al., (2019).

2.2.6. Produtividade da cultura da soja

A produtividade média da soja, para cada talhão (T1, T2 e T3) foi obtida a partir do mapa de produtividade gerado por uma colhedora da marca Case, modelo AF4130, com plataforma tipo caracol de 7,6m de largura. O monitoramento e aquisição dos dados produtivos foram realizados no intervalo de 0,01 minuto e corrigidos em função da umidade do grão pelo sistema. A consistência dos dados de produtividade foi avaliada através do software MapFilter 2.0, com a eliminação dos valores inconsistentes. Após, os dados foram manipulados no software ArcGis 10.5 e confeccionado um mapa de produtividade real da área a partir do método do inverso do quadrado da distância (IDW), considerando o fator “p” como 2 (LAMDIM, 2000).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Variabilidade espaço-temporal da chuva

As medições de chuva a partir dos 9 pluviômetros (Figura 1) evidenciou a ocorrência de variabilidade espaço-temporal da chuva ao longo dos períodos de medida, coincidentes aos ciclos de produção da soja (Tabela 2). A precipitação acumulada média do período de medição, no talhão 1, foi de 900,92 mm. No talhão 2 a média do volume acumulados pelos sensores P4, P5 e P6 foi de 884,86, no mesmo período de tempo de medida do talhão 1. Já no talhão 3 a precipitação média acumulada foi de 770,51 mm (Tabela 2). A diferença entre as médias do talhão 3 frente aos talhões 1 e 2, em parte, se justifica pelo menor tempo de medição, devido ao atraso de 20 dias na instalação/funcionamento dos pluviômetros no talhão 3.

As maiores médias mensais foram de 315,3 mm ($\pm 59,4$ mm) e 263,06, mm ($\pm 5,15$) mm, registradas nos meses de novembro de 2018 e fevereiro de 2019, respectivamente. Já nos meses de dezembro de 2018 e janeiro de 2019 foram registrados volumes totais médios de 178,37 mm e 108,95 mm, respectivamente. Em relação a esses dois meses, mesmo sendo os menores volumes acumulados mensais da série mensal analisada (Tabela 3), conforme descrito por SOUZA et al., (2013) não se distanciaram da normalidade, já que os valores esperados são de aproximadamente 126 mm, 129 mm, 128 mm e 111 mm nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, respectivamente. No caso, foi registrado nos meses de novembro de 2018 e fevereiro de 2019 (Tabela 3), os totais acumulados acima do esperado.

Tabela 3. Chuva média mensal e total acumulada na safra 2018/19, para os nove pontos de coleta, na Fazenda São Sebastião, General Carneiro - MT.

Ponto	out/2018	nov/2018	dez/2018	jan/2019	fev/2019	Máximo ^{16/1} ² (mm d ⁻¹)	Período total
Chuva mensal (mm)							
P1	39,12	337,77	182,74	116,88	268,76	81,89	945,27
P2	38,10	354,33	169,42	115,57	269,24	81,79	946,66
P3	31,96	277,67	171,53	112,00	216,43	69,78	809,59
P4	38,96	317,77	201,64	105,50	262,74	78,74	926,61
P5	41,08	303,32	177,61	97,66	297,17	81,43	916,84
P6	40,08	300,96	167,28	106,08	264,00	79,20	878,40
P7	*	212,28	154,45	141,28	269,38	79,30	777,38*
P8	*	192,53	166,12	128,27	264,72	75,29	751,64*
P9	*	211,02	175,21	121,48	252,89	68,24	760,60*
Média	38,22	315,30*	178,37	108,95	263,06	78,80	903,90
D. P.	3,23	59,43	13,09	13,14	21,08	5,13	81,93
C. V. (%)	8,45	18,85	7,34	12,06	8,01	6,51	9,06

*precipitação acumulada média, o desvio padrão e o coeficiente de variação do mês de novembro não considera as medições dos pluviômetros P7, P8 e P9, do talhão 3, pois as medições feitas nesses pontos não contemplaram todos os dias do referido mês. **Totais acumulados no período total integram ausência de coleta no mês de outubro de 2018 e coleta temporal parcial realizada no mês de novembro de 2018.

Ao analisar os eventos de chuva diários (Figura 2) em cada um dos nove pontos de coleta, considerado somente os sensores em efetivo funcionamento, na área de produção de soja observou-se uma distribuição uniforme das chuvas durante a segunda quinzena de outubro de 2018 e durante o mês de novembro de 2018, com registro médio de 8,9 mm dia⁻¹. Já no mês de dezembro de 2018 a média de chuva diária foi menor, de 4,52 mm.dia⁻¹. Nesse mês em apenas 8 dias o volume precipitado foi maior ou igual a 5 mm dia⁻¹. Além disso no mês de dezembro foram contabilizados 15 dias consecutivos (entre 13 e 27 de dezembro) com registro inferior a 5 mm de chuva acumulada, comum em todos os pontos de coleta.

No mês de janeiro de 2019 (Figura 2) as precipitações foram temporalmente ainda mais irregulares. Em média, a chuva acumulada foi de 3,74 mm d⁻¹. Nesse mês foram registrados apenas 5 dias com mais de 5,00 mm dia⁻¹ acumulados.

A partir dos dados diários de chuva dos nove pontos de medida (Figura 2), tomando-se o P1 um como referência para a análise da variabilidade espacial em relação aos demais sensores (P2 à P9), as diferenças no volume acumulado diário

em vários eventos superaram os 10mm. Os valores mais extremos na relação entre os pluviômetros P1-P3 e P2-P3 (Figura 2B e 2C) foram de 27,60 mm e 34,26mm, registrados nos dias 31/12 e 14/11, respectivamente. Além destes, nos demais comparativos entre pluviômetros, foram obtidas diferenças de até 13,8mm (27/11), 18,24mm (19/02), 14,50mm (19/02), 22,2mm (14/11), 10,52mm (28/02) e 13,2mm (02/12) entre P4-P3, P5-P3, P6-P3, P7-P3, P8-P3, P9-P3 (Figura 2D, 2E, 2F, 2G, 2H e 2I).

A análise (Figura 2) mostrou que a variabilidade média, considerando todo período de medida, variou de 2,21 a 4,11 mm, com média de 1,64mm entre todos os pontos observados.

Ciach & Krajewski (2006) apresentam resultados interessantes relacionados ao comportamento de 32 tempestades de volume superior a 10 mm, onde a variabilidade de duração foi de 40 minutos a 18 horas e mostram que eventos de pico são menos variáveis no espaço, porém tais resultados foram gerados a partir de índices estatísticos e os mesmos contradizem os valores do presente trabalho, bem como os apresentados por Habib & Krajewski (2002) e Habib et al., (2004).

Em relação aos registros diários máximos, ressalta-se que em fevereiro de 2019, no dia 16, foram acumulados 81,89 mm no pluviômetro P1 (talhão 1), correspondendo a 30% do total registrado pelo ponto (P1) no referido mês. No mesmo dia, no talhão 3, no ponto de coleta P9, o acumulado foi de 68,24mm, 13,65mm a menos que no P1 (Figura 2), pontos distantes 1530 m um do outro (Figura 1).

Figura 2. Precipitação diária no pluviômetro de referência “P3” (A) e diferença deste em relação ao P1 (B), P2 (C), P4 (D), P5 (E), P6 (F), P7 (G), P8 (H) e P9 (I).

A relação entre a variabilidade das chuvas e a distância entre pontos de coleta mostrou relação inversa entre a distância entre pluviômetros e a similaridade entre seus registros, expresso a partir do coeficiente de determinação (Figura 3). Para essa análise foram incorporados os dados coletados em estações meteorológicas locadas em municípios ao redor de General Carneiro (Figura 1), a fim de melhor entender a referida relação para maiores distancias na região do estudo.

Os valores de R^2 variaram entre 0,02 e 0,52 para a relação entre os pontos de coleta e a distância entre cidades próximas ao experimento, mantendo-se acima de 0,80 para todas as relações de dados em nível de fazenda (Figura 3), onde os pluviômetros apresentavam distância máxima de 3,02 km de distância entre si (Figura 1). Morin et al., (2006) observaram mesmo comportamento na correlação entre valores de precipitação obtidos por meio de estações e radares meteorológicos região de Arizona-EUA.

Nesse estudo, a relação entre os volumes acumulados de chuva e a distância entre coleta para os pluviômetros das cidades próximas não apresentaram regularidade, assim como obtido por (CIACH & KRAJEWSKI, 2006). Os autores

chamam a atenção para a diferença no comportamento dos dados de chuva, bem como o coeficiente de ajuste de equações estatísticas, quando modificado o intervalo de tempo de obtenção.

Figura 3. Relação entre coeficiente de determinação da chuva mensal e distância entre pluviômetros na região e na Fazenda localizada em General Carneiro-MT durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2019.

Corroborando com a variabilidade espacial de precipitação na distância máxima de 3,02 km, Marra & Morin (2018) avaliaram a distribuição espaço-temporal de chuvas convectivas na região de Israel (local semiárido do Meridiano oriental) com uso de radar meteorológico e notaram que aproximadamente 50% dos valores registrados apresentavam variabilidade em um raio de 1,5 a 2,8 km, e na maioria dos eventos, a variabilidade atingiu distância máxima de 5 a 6 km.

Porém, estudos realizados em região característica de clima tropical, Krajewski et al., (2003) obtiveram correlação de valores de chuva atingindo 0,2 quando os locais de coleta distanciavam 0,8 km. Alguns autores já estudaram a variabilidade local das chuvas, a exemplo, Reichardt et al. (1995) que avaliaram em uma extensão de 1000 hectares, na cidade de Piracicaba - SP, a distribuição das chuvas no período de um ano, porém não encontraram relação significativa entre a distância entre pontos e os volumes precipitados. Bega et al. (2005) avaliaram, no município de Pindorama - SP, a variação da precipitação uma área de 532,8 ha com

postos de coleta distantes em até 300 metros e obtiveram diferentes volumes acumulados, porém esses volumes eram baixos (menor que 5 mm).

A avaliação da variação espacial das chuvas no Brasil é realizada em maioria em nível estadual (MORAES et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2015), regional (DA SILVA et al., 2012; GONÇALVES & BACK, 2018). Considerando sua extensa área e a limitação de estações de coleta desses dados, o estudo em pequena escala se torna inviável e dispendioso, uma vez que há necessidade de manutenção dos aparelhos de medição e o deslocamento e serviços de técnicos encarecem e inviabilizam tal atividade.

Porém, apesar dos entraves citados para o estudo em microescala, os mesmos são necessários principalmente em locais cuja agricultura é a fundamental para a atividade econômica, como no estado de Mato Grosso, o qual destina 10,39% de sua área ao cultivo agrícola, e apesar da representatividade, a precipitação (principal reguladora produtiva) não é monitorada espacialmente na maioria das fazendas.

Estudos acerca da variabilidade espacial de chuvas convectivas na região amazônica apontaram variabilidade em um raio de até 2 km (FISCH et al., 2007; HANAOKA, 2004), foi observado também que as mesmas ocorrem em maioria no final ou no início do dia, devido a processos convectivos (SANTOS NETO et al., 2014). Em relação ao comportamento das chuvas em cidades localizadas na América do Sul, Ásia e África, Moura & Vitorino (2012) observaram que, apesar de pertencentes à semelhante latitude e submetidas espacialmente à atuação da ZCIT, não apresentaram mesma regularidade nos volumes precipitados.

2.3.2. Variabilidade espacial das características de solo

O solo da área de produção de soja da Fazenda São Sebastião apresentou variabilidade espacial de características texturais nas duas profundidades analisadas (Tabela 4). Conforme resultados o solo é basicamente classificado como argiloso. O solo coletado em profundidade de 0-20 cm foi classificado como argiloso nos pontos 1, 2, 6, 7 e 9 e como argila pesada nos pontos 3, 5 e 8. O ponto amostral 4 foi o único classificado como argila arenosa, com 43,59% de argila e 45,98% de areia. Já o solo coletado entre os 20-40 cm abaixo da superfície, foi classificado como argiloso apenas nos pontos 1 e 4, e nos demais como argila pesada. Os valores obtidos e sua

respectiva classificação assemelham-se aos resultados apresentados por (OTTONI et al., 2019) para uma região próxima à Fazenda São Sebastião.

Os resultados, relacionados a coletas de solos em pontos com distância de até 3000 m entre si, relacionados a uma área de produção de mais de 500 ha, no interior do Mato Grosso, mostra uma variabilidade espacial dos caracteres analisados (Tabela 4) com desvio padrão chegando aos 56,6% e 60,5% em relação aos teores de argila nas camadas de solo de 0-20cm e 20-40 cm, respectivamente. Para uma área de produção agrícola menor, de apenas 4,2 há, Vidana Gamage et al. (2019) apresentam variação na porcentagem granulométrica entre pontos amostrais, definindo coeficiente de variação máximo de 4,88% para argila e silte e de 3,6% para areia. (LI et al., 2019) também apresentam valores menores da variabilidade física do solo para área de 4,9 hectares, onde a variação foi de 6,93% e 9,60% em diferentes perfis do solo.

Tabela 4. Classificação granulométrica do solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm nos nove pontos de coleta na Fazenda São Sebastião, localizada no município de General Carneiro-MT.

Ponto	Profundidade (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	θ_{cc} (cm cm ⁻¹)	θ_{pmp} (cm cm ⁻¹)	Classificação*
1	0-20	53,01	10,37	36,62	0,36	0,16	Argila
	20-40	60,34	7,85	31,81	0,42	0,18	Argila
2	0-20	56,59	13,94	29,47	0,36	0,17	Argila
	20-40	70,96	10,38	18,66	0,36	0,21	Argila pesada
3	0-20	64,74	13,94	21,32	0,36	0,20	Argila pesada
	20-40	70,91	13,95	15,14	0,37	0,23	Argila pesada
4	0-20	43,59	10,43	45,98	0,36	0,13	Argila arenosa
	20-40	50,60	8,01	41,40	0,36	0,14	Argila
5	0-20	69,52	13,93	16,55	0,36	0,22	Argila pesada
	20-40	73,15	12,78	14,07	0,39	0,24	Argila pesada
6	0-20	58,65	12,77	28,58	0,36	0,18	Argila
	20-40	72,96	10,42	16,62	0,38	0,23	Argila pesada
7	0-20	41,59	17,33	41,08	0,36	0,14	Argila
8	0-20	68,07	13,91	18,02	0,41	0,23	Argila pesada
	20-40	70,49	12,77	16,74	0,36	0,22	Argila pesada
9	0-20	53,69	13,84	32,48	0,36	0,16	Argila
	20-40	75,29	0,88	23,83	0,36	0,18	Argila pesada
Média	0-20	56,6	13,4	30,00	0,33	0,16	
DP	%	9,90	2,10	10,20	0,12	0,06	
Média	20-40	60,50	8,60	19,80	0,37	0,20	
DP	%	8,40	4,20	9,70	0,02	0,03	

*Classificação segundo o Triângulo de Agrupamento Textural do Solo

A variabilidade percentual dos componentes físicos do solo (silte, argila e areia) ocasionou diferentes coeficientes a partir das FPTs (MEDRADO & LIMA, 2014). Em relação aos parâmetros empíricos da equação de VAN GENUCHTEN, (1980), α apresentou valores oscilando de 0,58 a 0,84, com desvio padrão de 0,07, enquanto n e m apresentaram amplitude de 0,18 e 0,10, respectivamente. Para θ_p , θ_s e θ_r foram obtidos valores médios de 0,7568 ($\pm 0,09$), 1,00 ($\pm 0,15$) e 0,18 ($\pm 0,01$). Valores médios de θ_{cc} e θ_{pmp} da camada de solo de 0-20cm foram respectivamente 0,33 cm cm^{-1} ($\pm 0,12$) e 0,16 cm cm^{-1} ($\pm 0,06$), respectivamente (Tabela 4).

As características físico-hídricas do solo (Tabela 4), assim como os atributos químicos, quando variáveis espacialmente interferem diretamente no armazenamento hídrico e disponibilidade de água ao cultivo agrícola, exercendo ação direta sobre a produtividade agrícola. Delin & Berglund, (2005), avaliando o rendimento de grãos em função das características hídricas e texturais de alguns solos, observaram que o rendimento foi mais bem correlacionado à fração argila e umidade do solo. Os autores também observaram que em safras com predominância de dias chuvosos as diferenças produtivas não apresentaram correlação significativa. Porém, com tal condição meteorológica as plantas cultivadas em baixa altitude e em solos argilosos foram afetadas pela baixa drenagem e falta de oxigenação, enquanto plantas cultivadas em situação oposta não foram afetadas. De forma similar, Amado et al., (2009) obtiveram diferença significativa entre zonas de alto, médio e baixo rendimento e correlação significativa entre rendimento de grãos em função da capacidade de máximo armazenamento de água no solo, em estudo realizado em dois locais produtivos na região sul do Brasil.

2.3.3. Disponibilidade hídrica pontual

Ao longo dos ciclos de produção da soja na Fazenda São Sebastião, safra 2018/19, os valores médios de chuva acumulada por talhão de produção (Figura 1) foram de 900,92 mm (T1), 909,87 mm (T2) e 770,51 mm (T3). Apesar das diferenças entre os três talhões, os 139,36 mm a menos (em comparação ao T2), a média produtiva nesse talhão foi de 3480 kg ha^{-1} . Enquanto em T1 e T2, foi colhido 3060 e 3900 kg ha^{-1} , respectivamente. (ROSSETTI, 2001) Salienta que 95% das quebras produtivas em cultivo sob condição de sequeiro ocorrem por excesso ou déficit hídrico na safra. Porém, Sandreas et al., (2012) e Zaro et al., (2018) mostram que essa quebra

produtiva apresenta um comportamento não linear na relação entre produtividade e deficiência hídrica acumulada, remetendo à importância de avaliar essas restrições por fase fenológica da cultura.

Da semeadura ao final do subperíodo vegetativo da soja (Tabela 2) a distribuição temporal da chuva foi regular (Figura 4) em relação ao período semeadura final do subperíodo vegetativo. No talhão 1 foram acumulados, em média, 285,20 mm no talhão T1. Nos talhões 2 e 3, em relação ao mesmo período de desenvolvimento da soja (S-Vn), foram 360,87 mm e 263,68 mm, respectivamente.

Em relação aos subperíodos reprodutivos da soja (Tabela 2) para o talhão T1, durante as fases R1 – R4, volume médio de chuva foi de 5,94 mm d⁻¹, enquanto para T2 e T3 foi de 4,14 mm d⁻¹ e 3,72 mm d⁻¹, respectivamente. No estágio R5, devido à diferença de datas de semeadura entre os três talhões (Tabela 2), o volume médio acumulado foi de 2,89 mm d⁻¹ para T1, e de 3,95 mm d⁻¹ (T2) e 3,72 mm d⁻¹ (T3).

Figura 4. Precipitação diária para os talhões T1, T2 e T3, e fenologia observada da soja durante a safra 2018/19 em fazenda localizada no município de General Carneiro – MT.

Durante a fase reprodutiva, a cultura direciona sua atividade metabólica para a geração de inflorescências e legumes. Nesse momento, a redução de água disponível ocasiona fechamento estomático, bloqueando o fluxo de CO₂ (PAIVA et al., 2005) e, por fim, diminuindo a produção de fitomassa (GHOLZ et al., 1990). A escassez hídrica causa perda produtiva de sistemas vegetais. Culturas anuais de ciclo curto são afetadas de acordo com o momento e a duração do período de ocorrência da restrição de água como apresentado por Zhang et al., (2017). Os autores concluem ainda que, apesar do volume precipitado responder majoritariamente às adversidades de sistemas vegetados, é necessário o conhecimento sobre fatores como horas de

brilho solar e temperatura do ar para inteirar os demais parâmetros e, através de um balanço hídrico, determinar a disponibilidade hídrica às culturas.

A partir do balanço hídrico foram calculadas as razões ETr/ETc , a fim de analisar o efeito combinada da variabilidade espacial das características físico-hídricas do solo e da variabilidade espaço-temporal da chuva. Considerando os ciclos de desenvolvimento da soja em cada talhão (Tabela 2), em média a razão ETr/ETc foi de $0,83 \pm 0,20$ (T1), $0,93 \pm 0,20$ (T2) e $0,85 \pm 0,18$ (T3). Considerando o registro médio de 35 dias com ETr/ETc unitária para os três talhões, observa-se que a cultura da soja não enfrentou longos períodos de estresse hídrico (Figura 5). Em poucos dias a relação ETr/ETc ficou abaixo de 0,5 (entre 0,32 e 0,37) na fase reprodutiva da cultura (Figura 5). A condição pode antecipar a senescência da folhagem, reduzir crescimento da planta e afetar floração, formação de vagens e grãos (MARTORANO, 2007; FERNEDA et al., 2016), consequentemente reduzindo a produtividade (MARTORANO et al., 2014). KUKAL & IRMAK (2020) observaram que a razão ETr/ETc estimada por balanços hídricos variam em apenas 2% em relação aos mensurados em cultivo isento de estresse hídrico. Esse erro é decorrente da variação e/ou adoção de valores de Kc constantes durante as fases fenológicas da cultura (PAYERO & IRMAK, 2011)

Figura 5.

Relação ETr/ETc (mm) para a soja cultivada nos talhões T1, T2 e T3 durante a safra 2018/19 no município de General Carneiro-MT.

Ao avaliar a disponibilidade hídrica espacialmente na área de produção de soja, a partir dos pontos de medida de chuva e solo, em relação ao desenvolvimento da cultura (Tabela 2), foram obtidos valores médios da razão ETr/ETc , de 0,91 nos pontos P1, P2 e P3 (talhão T1); 0,93, 0,99 e 0,99 nos pontos P4, P5 e P6 (talhão T2) e de 1 nos pontos P7, P8 e P9 (talhão T3) nos estágios compreendidos entre a semeadura e vegetativo 2 (S-V2). Nas demais fases vegetativas (V2-Vn) a disponibilidade hídrica média manteve-se alta, com valores variando entre 0,95 e 0,96 no talhão T1, entre 0,97 e 1 no talhão T2 e entre 0,94 a 0,97 no talhão T3. Porém, no período compreendido entre o florescimento e enchimento de grãos (R1-R5) a os valores de ETr/ETc ficaram abaixo de 0,85 para todos os pontos avaliados (Figura 6).

Figura 6. Variabilidade espacial da disponibilidade hídrica (ET_r/ET_c) média, durante as fases fenológicas da soja durante a safra 2018/19 no município de General Carneiro-MT.

2.4. CONCLUSÕES

A precipitação pluvial apresentou variabilidade espaço-temporal na época de produção da soja, em uma fazenda do município de General Carneiro, estado do Mato Grosso. Mesmo medições realizadas entre curtas distâncias, inferior a 3 mil metros, as diferenças em acumulados diários e mensais foram observadas, evidenciando a importância de se considerar a chuva como condicionante da variabilidade produtiva em unidades de produção. Para um melhor entendimento de como a disponibilidade de água exerce ação sobre a cultura, foi analisada a variabilidade espacial dos

caracteres físico-hídricos do solo, variáveis e assim tornando também variável a capacidade de armazenamento de água no solo.

Ao integrar elementos de solo e meteorológicos, através de um balanço hídrico, ficou evidente que parte da variabilidade de produtividade da área, certamente deve-se a variabilidade da disponibilidade hídrica.

REFERÊNCIAS

- ADEBOYE, O. B. et al. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ife-Ife, Nigeria. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 1130–1146, 2019.
- AHMED, M. et al. Calibration and validation of APSIM-Wheat and CERES-Wheat for spring wheat under rainfed conditions: Models evaluation and application. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 384–401, 2016.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**, v. 56, p. 1–15, 1998.
- ALMEIDA, T. S. Modelagem agrometeorológica-espectral para estimativa da produtividade de cafeeiros para áreas irrigadas do noroeste de Minas Gerais. p. 63, 2013.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 831–843, 2009.
- AMARASINGHA, R. P. R. K. et al. Simulation of crop and water productivity for rice (*Oryza sativa* L.) using APSIM under diverse agro-climatic conditions and water management techniques in Sri Lanka. **Agricultural Water Management**, v. 160, p. 132–143, 2015.
- ARCHONTOULIS, S. V.; MIGUEZ, F. E.; MOORE, K. J. A methodology and an optimization tool to calibrate phenology of short-day species included in the APSIM PLANT model: Application to soybean. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 465–477, 2014.
- ARORA, V. K. et al. Irrigation, tillage and mulching effects on soybean yield and water productivity in relation to soil texture. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 4, p. 563–568, 2011.
- BALBOA, G. R. et al. A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high- and low-management inputs in the Western US Corn Belt using APSIM. **Agricultural Systems**, v. 174, p. 145–154, 2019.
- BARROS, A. H. C. et al. Comissão 2.2 - Física do solo Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 379–391, 2013.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v. 240, n. June, p. 95–105, 2019.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28–37, 2017.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Sensitivity and requirement of improvements of four soybean crop simulation models for climate change studies in Southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, n. 5, p. 823–832, 2018.

BEGA, R. M. et al. Variabilidade espacial das precipitações pluviais diárias em uma estação experimental, em Pindorama, SP. **Bragantia**, v. 64, n. 1, p. 149–156, 2005.

BERGAMASCHI, H. et al. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243–249, 2006.

BORGHETTI, J. R. et al. **Agricultura irrigada sustentável no Brasil : Identificação de áreas prioritárias**. [s.l.: s.n.].

BORSATO, V. DA A. A dinâmica atmosférica no centro-sul do Brasil no verão e as influencias do El Niño Oscilação Sul (ENOS). **Geography Department, University of Sao Paulo**, v. 22, n. 2011, p. 135–157, 2011.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Advances in Soil Science**. 9. ed. New York: Springer Verlag, 1989. p. 177–213.

CACUCI, D. G. et al. **Sensitivity and uncertainty analysis: Applications to Large-Scale Systems**. [s.l.: s.n.].

CIACH, G. J.; KRAJEWSKI, W. F. Analysis and modeling of spatial correlation structure in small-scale rainfall in Central Oklahoma. **Advances in Water Resources**, v. 29, n. 10, p. 1450–1463, 2006.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira - Grãos. **Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB**, v. 6, p. 1–69, 2019.

CORDERO, E. et al. Spatial management strategies for nitrogen in maize production based on soil and crop data. **Science of The Total Environment**, v. 697, p. 133854, 2019.

DA SILVA, E. H. F. M. et al. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 1–7, 2019.

DE OLIVEIRA, J. F. et al. Spatial variability of the physical quality of soil from management zones. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 6, p. 1251–1273, 2019.

DELIN, S.; BERGLUND, K. Management zones classified with respect to drought and waterlogging. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 4, p. 321–340, 2005.

DESCHEEMAEKER, K. et al. Effects of climate change and adaptation on the livestock component of mixed farming systems: A modelling study from semi-arid Zimbabwe. **Agricultural Systems**, v. 159, n. May 2017, p. 282–295, 2018.

DEY, P.; MUJUMDAR, P. P. On the uniformity of rainfall distribution over India. **Journal of Hydrology**, v. 578, n. July, p. 124017, 2019.

DI MAURO, G. et al. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. **European Journal of Agronomy**, v. 99, p. 186–194, 2018.

- DIETZEL, R. et al. How efficiently do corn- and soybean-based cropping systems use water ? A systems modeling analysis. **Global Change Biology**, v. 22, p. 666–681, 2016.
- DINIZ, F. DE A.; RAMOS, A. M.; REBELLO, E. R. G. Brazilian climate normals for 1981-2010. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 53, n. 2, p. 131–143, 2018.
- DIXIT, P. N. et al. Decadal analysis of impact of future climate on wheat production in dry Mediterranean environment: A case of Jordan. **Science of the Total Environment**, v. 610–611, p. 219–233, 2018.
- ELY, D. F.; ALMEIDA, I. R. DE; NETO, J. L. S. Variabilidade climática e o rendimento da cultura do milho no estado do Paraná: algumas implicações políticas e econômicas. **Geografia**, v. 12, n. 1, p. 495–508, 2003.
- FERNEDA, B. G. et al. Estudo de riscos climáticos para o cultivo da josa transgênica e convencional, na região de Sinop-MT - Safra 14/15. **Livro do XLV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2016**, p. 1689–1699, 2016.
- FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2008.
- FISCH, G.; VENDRAME, I. F.; DE MELO HANAOKA, P. C. Variabilidade espacial da chuva durante o experimento LBA/TRMM 1999 na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 4, p. 583–590, 2007.
- GARNER, W. W.; ALLARD, H. A. Photoperiodic response of soybeans in relation to temperature and other environmental factors. **Journal of Agricultural Research**, v. 41, n. 10, p. 719–735, 1930.
- GAVIOLI, E. A. **Explanations for the rise of soybean in Brazil**. [s.l: s.n.]. v. J. Board (
- GAYDON, D. S. et al. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. **Field Crops Research**, v. 204, p. 52–75, 2017.
- GHOLZ, H. L.; EWEL, K. C.; TESKEY, R. O. Water and forest productivity. **Forest Ecology and Management**, v. 30, p. 1–18, 1990.
- GONÇALVES, F. N.; BACK, Á. J. Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região sul do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 592–602, 2018.
- GORTHI, A.; VOLENEC, J. J.; WELP, L. R. Stomatal response in soybean during drought improves leaf-scale and field-scale water use efficiencies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 276–277, n. June, p. 107629, 2019.
- GRASSINI, P. et al. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, v. 179, p. 150–163, 2015.
- GUIAMÉT, J. J.; NAKAYAMA, F. The effects of long days upon reproductive growth in soybeans (*Glycine Max* (L.) Merr.) cv. Williams. **Japanese Journal of Crop Science**, v. 53, p. 35–40, 1984.
- HABIB, E.; CIACH, G. J.; KRAJEWSKI, W. F. A method for filtering out raingauge representativeness errors from the verification distributions of radar and raingauge rainfall. **Advances in Water Resources**, v. 27, n. 10, p. 967–980, 2004.

HABIB, E.; KRAJEWSKI, W. F. Uncertainty analysis of the TRMM ground-validation radar-rainfall products: Application to the TEFLUN-B field campaign. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, n. 5, p. 558–572, 2002.

HE, D.; WANG, E. On the relation between soil water holding capacity and dryland crop productivity. **Geoderma**, v. 353, n. January, p. 11–24, 2019.

HOCHMAN, Z. et al. Smallholder farmers managing climate risk in India: 1. Adapting to a variable climate. **Agricultural Systems**, v. 150, p. 54–66, 2017.

HOLZWORTH, D. P. et al. APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 327–350, 2014.

HUBBARD, K. G. Spatial variability of daily weather variables in the high plains of the USA. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, n. 1–2, p. 29–41, 1994.

IRMAK, S. et al. Disk-till vs. no-till maize evapotranspiration, microclimate, grain yield, production functions and water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 216, n. November 2018, p. 177–195, 2019.

JONES, J. W. et al. **The DSSAT cropping system model**. [s.l.: s.n.]. v. 18

KANTOLIC, A. G.; PERALTA, G. E.; SLAFER, G. A. Seed number responses to extended photoperiod and shading during reproductive stages in indeterminate soybean. **European Journal of Agronomy**, v. 51, p. 91–100, 2013.

KANTOLIC, A. G.; SLAFER, G. A. Development and seed number in indeterminate soybean as affected by timing and duration of exposure to long photoperiods after flowering. **Annals of Botany**, v. 99, p. 925–933, 2007.

KASPAR, T. C. et al. Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. **Precision Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 87–101, 2003.

KRAJEWSKI, W. F.; CIACH, G. J.; HABIB, E. An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 2, p. 151–162, 2003.

KUCHERENKO, S.; TARANTOLA, S.; ANNONI, P. Estimation of global sensitivity indices for models with dependent variables. **Computer Physics Communications**, v. 183, n. 4, p. 937–946, 2012.

KUKAL, M. S.; IRMAK, S. Characterization of water use and productivity dynamics across four C3 and C4 row crops under optimal growth conditions. **Agricultural Water Management**, v. 227, n. May 2019, p. 105840, 2020.

KUMAR, K. N. et al. Influence of tropical-extratropical interactions on the dynamics of extreme rainfall event: A case study from Indian region. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 85, n. July 2018, p. 28–40, 2019.

LENDERINK, G.; VAN MEIJGAARD, E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 8, p. 511–514, 2008.

LI, S. et al. Spatial variability of soil bulk density and its controlling factors in an agricultural intensive area of Chengdu Plain, Southwest China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 2, p. 290–300, 2019.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. A. G. Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para a produção agropecuária. **Boletim Técnico Nº 5**, n. 2º Edição, p. 62, 1994.

- LUO, T. et al. Summer solstice marks a seasonal shift in temperature sensitivity of stem growth and nitrogen-use efficiency in cold-limited forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, n. October 2017, p. 469–478, 2018.
- MACHADO, S. et al. Spatial and temporal variability of sorghum grain yield: Influence of soil, water, pests, and diseases relationships. **Precision Agriculture**, v. 3, n. 4, p. 389–406, 2002.
- MARCUZZO, F. F. N.; ROCHA, H. M.; MELO, D. C. DE R. Mapeamento da precipitação pluviométrica no Bioma Cerrado do estado do Mato Grosso. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 83–97, 2011.
- MARIN, F. R. et al. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 1449–1455, 2008.
- MARIN, F. R. Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. ago. 2014.
- MARRA, F.; MORIN, E. Autocorrelation structure of convective rainfall in semiarid-arid climate derived from high-resolution X-Band radar estimates. **Atmospheric Research**, v. 200, n. September 2017, p. 126–138, 2018.
- MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. [s.l: s.n.].
- MARTORANO, L. G. et al. **Differential expression in soybean leaf during water deficit in Brazil management system** *International Journal of AgriScience*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.inacj.com>. Acesso em: 30 jan. 2019.
- MATTIONI, N. M.; SCHUCH, L. O. B.; VILLELA, F. A. Variabilidade espacial da produtividade e da qualidade das sementes de soja em um campo de produção. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 4, p. 608–615, 2011.
- MEDRADO, E.; LIMA, J. E. F. W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma Regional**, v. 1, p. 59–66, 2014.
- MELLAART, E. A. R. Integrated Drought Management: Lessons for Sub-Saharan Africa. **IHP-V/Technical Documents in Hydrology | No. 35**, p. 138–147, 1999.
- MOHANTY, M. et al. Simulating soybean-wheat cropping system: APSIM model parameterization and validation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 152, p. 68–78, 2012.
- MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 90–101, 2011.
- MONDO, V. H. V. et al. Spatial variability of soil fertility and its relationship with seed physiological potential in a soybean production area. **Revista brasileira de sementes**, v. 34, n. 2, p. 193–201, 2012.
- MORAES, B. C. DE et al. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 207–214, 2005.
- MORIN, E. et al. Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response. **Advances in Water Resources**, v. 29, n. 6, p. 843–860, 2006.

- MOURA, M. DO N.; VITORINO, M. I. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à Zona de Convergência Intertropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 475–483, 2012.
- MÜLLER, D. H. et al. Spatial variability in soybean seeds quality and in chemical attributes of the soil of a production field in the Brazilian Cerrado. **Journal of Seed Science**, v. 40, n. 1, p. 25–35, 2018.
- NASSIF, D. S. P. et al. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 3, p. 311–318, 2012.
- NENDEL, C. et al. The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 9, p. 1614–1625, 2011.
- NICO, M.; MIRALLES, D. J.; KANTOLIC, A. G. Post-flowering photoperiod and radiation interaction in soybean yield determination: Direct and indirect photoperiodic effects. **Field Crops Research**, v. 176, p. 45–55, 2015.
- NICO, M.; MIRALLES, D. J.; KANTOLIC, A. G. Natural post-flowering photoperiod and photoperiod sensitivity: Roles in yield-determining processes in soybean. **Field Crops Research**, v. 231, n. July 2018, p. 141–152, 2019.
- NISSANKA, S. P. et al. Calibration of the phenology sub-model of APSIM-Oryza: Going beyond goodness of fit. **Environmental Modelling and Software**, v. 70, p. 128–137, 2015.
- NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, n. August 2018, p. 140–151, 2019.
- OLIVEIRA, N. D. L.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, R. G. Influência do El Niño e La Niña no número de dias de precipitação pluviométrica no Estado do Mato Grosso. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 4, p. 284–297, 2015.
- OTTONI, M. V. et al. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**, v. 575, n. May, p. 1345–1358, 2019.
- PAIVA, A. S. et al. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 161–169, 2005.
- PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Daily crop evapotranspiration, crop coefficient and energy balance components of a surface-irrigated maize fiels. In: **Gerosa, G; A. (Ed.), Evapotranspiration: From Measurements to Agricultural and Enviromental Applications. Chapter 4. INTECH Publisher**, v. November, p. 59–78, 2011.
- PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas. **Guaíba: Agropecuária**, 2002.
- PÍPOLO, A. E. . et al. Teores de óleo e proteína e soja: fatores envolvidos e qualidade para a indústria. **Circular Técnica 86**, p. 1–16, 2015.
- RAB, M. A. et al. Advances in precision agriculture in south-eastern Australia. IV. Spatial variability in plant-available water capacity of soil and its relationship with yield in site-specific management zones. **Crop and Pasture Science**, v. 60, n. 9, p. 885–900, 2009.

- REICHARDT, K. et al. Daily rainfall variability at a local scale (1.000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. **Scientia Agricola**, v. 52, n. 1, p. 43–49, 1995.
- ROBERTSON, M. J. et al. Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 53, n. 4, p. 429–446, 2002.
- 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.
- ROSOLEM, C. A.; BICUDO, S. J.; MARUBAYASHI, O. M. Soybean yield and root growth as affected by lime rate and quality. **Plant-Soil Interactions at Low pH: Principles and Management**, n. 1, p. 543–547, 2011.
- ROSSETTI, L. A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 386–399, 2001.
- SABINO, M. **Intensidade-duração-frequência de precipitação máxima em mato grosso**. [s.l: s.n.].
- SALTELLI, A. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. **Computer Physics Communications**, v. 145, n. 2, p. 280–297, 2002.
- SALTELLI, A. et al. **Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models**. [s.l: s.n.].
- SALTELLI, A. et al. **Global Sensitivity Analysis: The Primer**. [s.l: s.n.]. v. 76
- SANA, R. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 994–1002, 2014.
- SANTOS NETO, L. A. DOS et al. Distribuição horária da precipitação em Porto Velho - RO no período de 1998-2013. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, p. 213–228, 2014.
- SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Relações Água-Solo-Planta-Atmosfera: Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a déficit hídrico em diferentes solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 1–6, 1999.
- SECCO, D. et al. Atributos físicos e produtividade de culturas em um latossolo vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 407–414, 2005.
- SEIDEL, S. J. et al. The influence of climate variability, soil and sowing date on simulation-based crop coefficient curves and irrigation water demand. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 73–83, 2019.
- SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil - Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.
- SHELIA, V. et al. A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies. **Environmental Modelling and Software**, v. 115, n. October 2018, p. 144–154, 2019.

SILVA, D. F. DA; PRELA-PANTANO, A.; NETO, J. L. S. Variabilidade da precipitação e produtividade agrícola na região do médio Paranapanema, SP. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, p. 101–116, 2008.

SILVA, V. DE P. R. DA; PEREIRA, E. R. R.; ALMEIDA, R. S. R. Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 163–172, 2012.

SOUSA, R. R. DE; TOLEDO, L. G.; TOPANOTTI, D. Q. Oscilação das chuvas na porção centro oeste do estado de Mato Grosso, entre os anos de 1996 a 2001. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 27, n. 3, p. 71–89, 2007.

SOUZA, A. P. DE et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34–43, 2013.

SREEKANTH, T. S. et al. Classification and seasonal distribution of rain types based on surface and radar observations over a tropical coastal station. **Atmospheric Research**, v. 218, n. October 2018, p. 90–98, 2019.

STOL, P. T. The relative efficiency of the density of rain-gage networks. **Journal of Hydrology**, v. 15, n. 3, p. 193–208, 1972.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 395–401, 2001.

SUN, H. et al. Assessing the contribution of weather and management to the annual yield variation of summer maize using APSIM in the North China Plain. **Field Crops Research**, v. 194, p. 94–102, 2016.

TOMASELLA, J.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, p. 1085–1092, 2003.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, n. 3, p. 190–202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 327–338, 2000.

TORMENA, C. A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 2, p. 211–219, 2007.

UTSUMI, N. et al. Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 16, p. 1–5, 2011.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

WANG, G. C. et al. Soil carbon sequestration potential as affected by management practices in northern China: A simulation study. **Pedosphere**, v. 24, n. 4, p. 529–543, 2014.

WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V.; ZWIERS, F. W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. **Journal of Climate**, v. 26, n. 11, p. 3904–3918, 2013.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.

WONG, M. T. F.; ASSENG, S. Determining the causes of spatial and temporal variability of wheat yields at sub-field scale using a new method of upscaling a crop model. **Plant and Soil**, v. 283, n. 1–2, p. 203–215, 2006.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence Soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1447–1454, 2016.

ZARO, G. C. et al. Inter-annual analysis of soybean and corn yield in relation to water deficit in a transitional zone between subtropical and tropical climate. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 4, p. 511–518, 2018.

ZHANG, Q. et al. Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. **Global and Planetary Change**, v. 152, p. 1–11, 2017.

ZHAO, G.; BRYAN, B. A.; SONG, X. Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: Interactions between cultivar, environmental, and management parameters. **Ecological Modelling**, v. 279, p. 1–11, 2014.

3. CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO APSIM-SOYBEAN PARA UMA ÁREA DE PRODUÇÃO DE SOJA NO MATO GROSSO

RESUMO

A produtividade de culturas agrícolas é variável com o ambiente na qual é cultivada, sendo fortemente influenciada pelas condições hídricas. Apesar de conhecidas as condições heterogêneas dentro de uma propriedade, normalmente o manejo é realizado considerando a lavoura como homogênea. Objetivou-se calibrar o modelo APSIM – Soybean para uma fazenda produtora de soja e estimar a produtividade dos três talhões com base em diferentes condições de solo e chuva. A calibração do modelo foi realizada com dados meteorológicos, de solo e de planta, coletados em três locais, durante três safras. O experimento para a avaliação do modelo foi realizado em uma fazenda localizada em General Carneiro, a sul do estado de Mato Grosso. Foram determinadas as características físicas e químicas do solo a partir de análise laboratorial, obtidos dados meteorológicos a partir da instalação de uma estação meteorológica e volumes de chuva por talhão, através de uma malha de nove pluviômetros. Os dados de produtividade foram obtidos durante a colheita, posteriormente tratados e gerado o mapa de produtividade. O modelo APSIM-Soyben apresentou bons resultados de predição fenológica, bem como na estimativa produtiva, porém subestimou demasiadamente a biomassa. A variabilidade das características de solo e chuva foram refletidas na produtividade de grãos na área de estudo.

Palavras-chave: Variabilidade produtiva, Soja, Simulação de produtividade

ABSTRACT

The yield of agricultural crops varies with the environment in which it is grown and is strongly influenced by water conditions. Although heterogeneous conditions within a property are known, management is usually performed considering the crop as homogeneous. The objective was to calibrate the APSIM-Soybean model for a soybean farm and to estimate the productivity of the three plots based on different soil and rain conditions. The model was calibrated with meteorological, soil and plant data collected at three locations during three harvests. The model evaluation experiment was performed in General Carneiro – MT. The physical and chemical characteristics of the soil were determined by laboratory analysis, meteorological data were obtained from the installation of a meteorological station and rain volumes per field, through a nine rainfall mesh. Yield data were obtained during harvest, further processed and the yield map generated. The APSIM-Soybean model presented good phenological prediction results as well as the productive estimate, but overestimated the biomass. The variability of soil and rain characteristics were reflected in grain yield in the study area.

Keywords: Yield variability, Soybean, Yield simulation

3.1. INTRODUÇÃO

Uma cultura agrícola submetida a condições ótimas para o crescimento e desenvolvimento, isto é, sem a falta ou excesso de qualquer elemento climático, nutricional ou de solo produzirá seu potencial (Y_p) (SENTELHAS et al., 2015). Porém, se restrita ao fator hídrico, sua produtividade será reduzida a um segundo potencial (Y_w) o qual é ainda superior à colheita real (Y_r) do campo (SENTELHAS et al., 2015; GRASSINI et al., 2015; LUO et al., 2018; DI MAURO et al., 2018).

A soja é a principal oleaginosa produzida no Brasil, correspondendo em 59,4% da área cultivada por grãos (culturas de verão), com produtividade média nacional de 3.711 kg ha^{-1} . No Mato Grosso, maior estado produtor, a produtividade média supera a do Brasil, chegando aos 4.021 kg ha^{-1} (CONAB, 2019). O grão da soja é composto, em média, por 40% de proteínas e 20% de lipídeos e sua massa, destinando à fabricação de produtos para alimentação humana (óleo vegetal), ração animal, farelo e biodiesel (BEZERRA, 2015; PÍPOLO et al., 2015).

Considerando sua importância socioeconômica, busca-se cada vez mais diminuir as perdas produtivas em campo. Isso só é possível a partir do entendimento pleno do sistema de produção, mas sobretudo da influência pedoclimática. Para auxiliar nessa tarefa surgem os modelos baseados em processos, que simulam o crescimento e desenvolvimento da cultura, permitindo projetar o quanto seria possível produzir diante das características locais de clima e solo.

Alguns softwares são mundialmente conhecidos e utilizados, como o Decision Support System for Agrotechnology Transfer – DSSAT (JONES et al., 2003), o Model for Nitrogen and Carbon in Agroecosystems – MONICA (NENDEL et al., 2011) e o Agricultural Production Systems Simulator – APSIM (HOLZWORTH et al., 2014).

A resposta produtiva de uma cultura é dada em função de diversos fatores e sua inter-relação. São considerados como principais condicionantes a radiação solar, a temperatura do ar e o fotoperíodo. Somam-se a esses os fatores definidos como limitantes, em especial a água (precipitação/irrigação) e a nutrição nutricional. Estes fatores condicionantes/limitantes são abordados na modelagem pois interferem diretamente nas variáveis calculadas pelo modelo, a exemplo da biomassa, área foliar, produtividade, entre outras. Logo, é imprescindível o entendimento de como a planta responde a cada variável, e isso é realizado através de análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade de um modelo é realizada objetivando avaliar a resposta das saídas em função da variação dos parâmetros de entrada (SALTELLI et al., 2008). A análise pode então ser definida como medida local, considerando o efeito

de uma entrada a um resultado (CACUCI et al., 2005) ou global, a qual permite investigar como a incerteza nos dados de saída pode ser respondida de maneira fracionada entre os parâmetros de entrada do modelo (SALTELLI et al., 2008; KUCHERENKO et al., 2012).

Portanto, para que um modelo simule a resposta da planta as condições meteorológicas e de solo local, é necessário que haja uma calibração. Esse processo é realizado para diversas culturas em toda a extensão global (WANG et al., 2014; NISSANKA et al., 2015; AHMED et al., 2016; HOCHMAN et al., 2017; ADEBOYE et al., 2019) e se faz necessário sempre que estudado uma cultivar de diferente material genético, ou inserida em distintas condições climatológicas e/ou pedológicas (ZHAO et al., 2014).

Devido ao constante avanço no desenvolvimento genético, a soja foi adaptada aos mais diversos cenários climáticos. Classificando as cultivares em grupos de maturação (GM) segundo a resposta fisiológica à latitude local, é possível o cultivo de norte a sul do Brasil. Para região Centro-Oeste, recomenda-se a implantação de GM entre 7 e 8.

No software APSIM, estão cadastradas 54 cultivares de soja em sua plataforma, as quais já foram testadas em simulações para diversas localidades (ARCHONTOULIS et al., 2014; GAYDON et al., 2017; BATTISTI et al., 2018; NÓIA JÚNIOR & SENTELHAS, 2019; BALBOA et al., 2019). Entretanto, o modelo APSIM-Soybean ainda não possui parametrização para todos os grupos de maturação (GM), procedimento que pode ser feito a partir da inclusão de dados de campo de um novo material genético (ARCHONTOULIS et al., 2014).

De forma tradicional, essas ferramentas são usadas para quantificar o potencial produtivo desconsiderando a variabilidade espaço-temporal dos elementos meteorológicos e de solo dentro da unidade de produção ou de seus talhões (MARIN, 2014; ZANON et al., 2016). Essa questão, por conta das técnicas de agricultura de precisão que analisam a área com maior detalhamento, foi abordada por Shelia et al. (2019) que apresentam um sistema de modelagem de culturas denominado CCAFS - *Regional Agricultural Forecasting Toolbox* (CRAFT), exatamente permitindo executar os modelos pré-instalados DSSAT, APSIM e SARRA-H. O CRAFT requer dados de entrada em grade para executar as simulações de culturas em escalas espaciais de 5 e 30 minutos de arco. Estudos de

caso para o Sul Ásia para duas culturas, incluindo trigo e arroz, mostra sua potencial aplicação para avaliação de riscos e na estação previsão de rendimento.

Portanto, considerando a variabilidade espacial de características do solo e a variabilidade espaço-temporal dos elementos meteorológicos dentro de uma unidade de produção, e seus efeitos sobre a produção agrícola, o trabalho buscou utilizar o modelo APSIM-Soybean para analisar a existência de variabilidade de produtividade em uma área de produção de soja no estado do Mato Grosso.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. O modelo APSIM-Soybean

O modelo APSIM-Soybean simula a fenologia, o crescimento, o rendimento de grãos dentre outras respostas da soja, por unidade de área e tempo. Para sua utilização requer dados meteorológicos diários: radiação solar global, temperatura do ar (máxima e mínima) e precipitação pluvial, além de parâmetros de solo e definição de cultivar. Informações de adubação, manejo e irrigação no sistema também podem ser incluídos para simulações.

Na plataforma APSIM os parâmetros genéticos de cada espécie são derivados de um modelo genérico de plantas com adaptações, podendo ainda, apresentar distinção em coeficientes genéticos para genótipos dentro da mesma espécie. A fenologia da soja é dividida em fases, cuja duração é definida por tempo térmico ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$), tendo como temperatura basal inferior 10°C e superior 34°C .

A área foliar é descrita por funções de surgimento, expansão e senescência foliar. A interceptação de radiação solar pela planta é determinada pelo índice de área foliar e pelo coeficiente de extinção da radiação solar. A partir da eficiência de uso da radiação solar global da cultura, o modelo simula o acúmulo potencial de biomassa acima do solo, limitada também pela disponibilidade hídrica. A mesma abordagem é usada para simular a produção de grãos.

3.2.2. Dados experimentais

Para calibrar e avaliar o modelo APSIM-Soybean, foram utilizados dados experimentais de soja de grupo de maturação relativa 8.0 (Tabela 1), provenientes de

experimentos conduzidos nos municípios de Sinop – MT (11° 58' 56" S; 55° 33' 57" W; 367m), Primavera do Leste – MT (15° 34' 47" S; 54° 22' 51" W; 680m) e Montividiu – GO (17° 26' 38" S; 48° 36' 25" W; 857m) (Figura 1). Apesar dos experimentos não serem irrigados, a partir de uma análise prévia do balanço hídrico, do manejo realizado e das produtividades, os dados foram considerados apropriados para a calibração do modelo.

Tabela 1. Especificações das cultivares utilizadas para calibração e avaliação do modelo APSIM-Soybean.

Local	Safra	Cultivar	Grupo de maturação
Calibração			
Sinop	2013/14	TMG 132RR	8.5
	2017/18	TMG 1180	8
Primavera do Leste	2014/15	CD 2720	7.2
Montividiu	2013/14	Desafio	7.4
Avaliação			
Sinop	2017/18	TMG 1180	8
Primavera do Leste	2015/16	M 8372 IPRO	8.3
	2014/15	CD 2720/Desafio	7.2/7.4
Montividiu	2015/16	Desafio/7110 IPRO	7.4/6.8

Segundo a classificação climática de Koppen, o microclima da região é classificado como Aw para Sinop e Cwa para Primavera do Leste, Montividiu e General Carneiro, com verões chuvosos e inverno seco (ALVARES et al., 2013). Os solos das áreas experimentais são predominantemente classificados como Latossolos (EMBRAPA, 2013).

Figura 1. Localização geográfica dos locais experimentais.

Para Sinop – MT os dados meteorológicos usados para calibrar o modelo (temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar ($\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$) e precipitação pluvial (mm d^{-1}), foram medidas por uma estação meteorológica automática (EMA), localizada a 6,5 km do local experimental, na UFMT-Sinop (SOUZA et al., 2013). Os dados meteorológicos para Primavera do Leste – MT e Montividiu – GO foram obtidos das EMA's do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mais próximas dos locais experimentais.

As avaliações fenológicas seguiram a escala proposta por Fehr & Caviness (1977), caracterizando o estágio fenológico quando a cultura apresentava ao menos 50% na área classificada como tal. A partir de análises biométricas, foram determinadas biomassa e produtividade de grãos ao final do ciclo da cultura.

Para a avaliação do modelo APSIM-Soybean foram utilizados dados de produtividade de três talhões de produtividade de soja da Fazenda São Sebastião – MT ($15,552^{\circ} \text{S}$; $53,633^{\circ} \text{O}$; 638 m).

Nos talhões foram instalados nove pluviômetros (Figura 1), abrangendo uma área de soja de 535 hectares. Para organizar a coleta, armazenamento e análises dos dados de chuva, os pluviômetros foram identificados como: P1, P2 e P3 (T1), P4, P5

e P6 (T2) e P7, P8 e P9 (T3). Além dos pluviômetros, foi instalada uma estação meteorológica próxima ao P3, para aquisição dos dados de temperatura (°C) e umidade relativa (%) do ar e radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

A textura do solo [argila (%), silte (%) e areia(%)] foi determinada a partir da coleta de amostras deformadas, nos talhões da Fazenda São Sebastião, no posicionamento de cada pluviômetro (Figura 1). Para cada ponto foram coletadas três amostras de solo em cada profundidade, de 0-20 e 20-40 cm. A determinação foi realizada pelo método da sedimentação (BOUYOUCOS & CASAGRANDE, 1934), baseado na “Lei de Stokes”. A densidade do solo foi determinada apenas para o ponto P3 e, devido as características pouco variáveis nos talhões, foi considerada para os demais pontos. Para a determinação da umidade do solo em capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), de todos os pontos de coleta da precipitação/solo, nos três talhões, foram utilizadas funções de pedotransferência (MEDRADO & LIMA, 2014).

A semeadura da soja foi iniciada no dia 20 de outubro de 2018, no talhão 1. Após foram semeados os talhões 2 e 3 (Tabela 2). Cada talhão recebeu uma cultivar específica, todas de mesmo grupo de maturação relativa (GMR), 8.0, com ciclo médio de 110 dias. Em todas as áreas o espaçamento entre linhas foi de 0,5m com 15 plantas por metro linear para todas as cultivares ($300.000 \text{ plantas ha}^{-1}$). A colheita da soja foi iniciada no dia 27 de janeiro de 2019 (Tabela 2).

Tabela 2. Especificações das cultivares utilizadas na fazenda localizada em General Carneiro-MT.

Talhão	Cultivar	Ciclo médio (dias)	Data de semeadura	Data de Colheita
T1	TMG 1180 RR	113	20/10/2018	10/02/2018
T2	BRS 7780 IPRO	116	27/10/2018	20/02/2019
T3	NS 7709 IPRO	123	02/11/2018	05/03/2019

Antecedendo a semeadura, foi realizada coletas deformadas de solo na área experimental para a recomendação de adubação, a qual foi feita junto à semeadura, conforme recomendado por Coelho (2006), com considerações preconizadas pela EMBRAPA (1977), com base na análise química do solo (Tabela 3). Assim foram aplicados 250 Kg de KCl na pré-semeadura e 300 kg de formulação NPK 06-35-00.

Tabela 3. Análise de solo referente a safra 2018/19 na profundidade de 0-20 cm, para os talhões de cultivo de soja em General Carneiro-MT.

Talhão	Perfil	pH		P	K	V	M	M.O
		H2O	CaCl2	mg.dm ³		%		g.dm ³
T1	0-20	5,20	4,53	4,27	40,80	32,36	14,33	30,63
T2		5,37	4,80	4,33	39,73	41,6	6,94	33,13
T3		5,25	4,65	4,10	38,00	30,85	5,57	34,85
Talhão	Perfil	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	
		cmolc.dm ³						
T1	0-20	1,60	0,60	0,33	5,03	2,40	7,40	
T2		2,33	0,70	0,17	4,77	3,30	8,10	
T3		1,75	0,65	0,15	2,60	2,60	8,50	

A produtividade média da soja, para cada talhão (T1, T2 e T3) foi obtida a partir do mapa de produtividade gerado por uma colhedora da marca Case, modelo AF4130, com plataforma tipo caracol de 7,6m de largura. O monitoramento e aquisição dos dados produtivos foram realizados no intervalo de 0,01 minuto e corrigidos em função da umidade do grão pelo sistema. A consistência dos dados de produtividade foi avaliada através do software MapFilter 2.0, com a eliminação dos valores inconsistentes. Após, os dados foram manipulados no software ArcGis 10.5 e confeccionado um mapa de produtividade real da área a partir do método do inverso do quadrado da distância (IDW), considerando o fator “p” como 2 (LAMDIM, 2000).

3.2.3. Análise de sensibilidade do modelo APSIM-Soybean

Após a calibração do modelo, foi realizada a análise de sensibilidade. Foram selecionados os parâmetros de entrada: fotoperíodo durante o fim do período juvenil à iniciação floral (x pp end of juvenile), fotoperíodo para a iniciação floral (x pp floral initiation), fotoperíodo durante o enchimento de grãos à maturação (x pp flowering), fotoperíodo para completar o período de enchimento de grãos (x pp start grain fill) tempo térmico para a transição entre período juvenil e iniciação floral (y tt end of juvenile), tempo térmico do florescimento ao enchimento de grão (y tt flowering), tempo térmico para o período de enchimento de grãos à maturação (y tt grain fill), água disponível na capacidade de campo e desenvolvimento das raízes (Tabela 4).

Tabela 4. Valores calibrados para cultivar de soja de grupo de maturação 8.0 na plataforma APSIM.

Parâmetro	Descrição	Valor inicial	Valor calibrado
y_hi_incr	Índice de colheita (1/dia)	0,01-0,01	0,1-0,1
y_hi_max_pot	Potencial máximo do índice de colheita (adm)	0,5-0,5	0,5-0,5
x_pp_end_of_juvenile	Fotoperíodo para fim do período juvenil à iniciação floral (hora)	12,7-12,80- 13,60-14,30	12,07-13,5- 14,2-15,1
y_tt_end_of_juvenile	Tempo térmico para fim do período juvenil à iniciação floral (°C d ⁻¹)	100-133-200- 400	95-125-190- 380
x_pp_floral_initiation	Fotoperíodo para iniciação floral (hora)	12,7-12,80- 13,60-14,30	12,07-13,5- 14,2-15,1
y_tt_floral_initiation	Tempo térmico para iniciação floral (°C d ⁻¹)	262-349-524- 1048	235-314-497- 943
x_pp_flowering	Fotoperíodo para o período de floração ao enchimento de grãos (hora)	12,7-12,80- 13,60-14,30	12,07-13,5- 14,2-15,1
y_tt_flowering	Tempo térmico para o período de floração ao enchimento de grãos (°C d ⁻¹)	286-382-572- 1526	250-360-543- 1349
x_pp_start_grain_fill	Fotoperíodo para completar o período de enchimento de grãos à maturação (hora)	12,7-12,80- 13,60-14,30	12,07-13,5- 14,2-15,1
y_tt_start_grain_fill	Tempo térmico para completar o período de enchimento de grãos à maturação (°C d ⁻¹)	581-775-1162- 3099	551-852-1570- 2900
SoybeanLL	Água disponível para a soja (mm)	60	30
SoybeanKL	Linha 1 (0 - 10 cm)	0,08	0,08
	Linha 2 (10 - 20 cm)	0,08	0,08
	Linha 3 (20 - 40 cm)	0,08	0,08
	Linha 4 (40 - 60 cm)	0,08	0,08

Os parâmetros de entrada foram alterados um a um, mantendo os demais constantes. Para a determinação da sensibilidade do modelo, os parâmetros foram submetidos a variações de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$. As variações dos parâmetros de entrada foram correlacionadas ao índice de área foliar (IAF), massa de matéria seca (MS) e produtividade de grãos a 13% de umidade. Essas variáveis foram escolhidas por expressarem o comportamento da planta bem como sua produção.

A fim de cálculos, seguiu-se a metodologia proposta por Saltelli, (2002) e Saltelli et al., (2004), a qual estabelece a determinação da sensibilidade absoluta (Equação 1), posteriormente convertida em sensibilidade relativa (Equação 2).

$$\sigma = \frac{\delta y}{\delta k} \quad (1)$$

Onde: σ – sensibilidade absoluta; δy – diferença entre os dados de saída do modelo e observados em campo e δk – diferença entre as variáveis de entrada do modelo.

$$\sigma_r = \sigma \frac{k}{y} \quad (2)$$

Onde: σ_r – sensibilidade relativa; k – valor do parâmetro padrão e y – valor de saída da variável padrão.

3.2.4. Avaliação do modelo

Para avaliação do desempenho do modelo para a região de estudo, foram utilizados os índices estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice de concordância de Willmontt (d) (WILLMOTT et al., 1985):

$$R^2 = \frac{(\sum_{n=1}^N (xi - \bar{x}) * Yi)^2}{\sum_{n=1}^N (xi - \bar{x})^2 * \sum_{n=1}^N (Yi - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Yi - xi)^2} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{n=1}^N (xi - \bar{x})(Yi - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum_{n=1}^N (xi - \bar{x})^2] * [\sum_{n=1}^N (Yi - \bar{Y})^2]}} \quad (5)$$

$$d = \frac{\sum_{n=1}^N (Xi - Yi)^2}{\sum_{n=1}^N (|Xi - \bar{X}| + |Yi - \bar{Y}|)^2} \quad (6)$$

3.2.5. Relação entre produtividade observada e estimada

Com o modelo calibrado, foram feitas as simulações para a área de estudo a fim de identificar a razão entre a produtividade atingível (Y_a) e a produtividade potencial (Y_o) da soja (Y_a/Y_o). Os ciclos de produção simulados seguiram as datas de semeadura e colheita observadas em cada um dos talhões. Essas informações, Y_a/Y_o , se relacionadas ao mapas de produtividade real auxilia no entendimento da variabilidade produtiva real da lavoura (Y_r), identificando as zonas mais influenciadas pela disponibilidade hídrica.

Para isso foram realizadas três simulações, uma para cada talhão. Foram obtidas médias dos dados de chuva dos pluviômetros instalados em cada talhão, então para T1 foram utilizados dados de P1, P2 e P3, para T2, os dados de P4, P5 e P6 e para T3, os dados de P7, P8 e P9. As demais informações meteorológicas usadas para simulações foram iguais para os três talhões.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Caracterização meteorológica

Durante os três períodos de produção de soja (Tabela 2), a temperatura e umidade relativa do ar oscilaram entre 17,5°C e 38°C e entre 23,62% e 100%, respectivamente. Em média, o ciclo de produção do T1 apresentou valores de 24,42°C e 83,76%, condição semelhante aos ciclos de produção de T2 (24,43°C e 84,26%) e de T3 (24,39°C e 84,76%) para temperatura e umidade relativa do ar (Figura 2).

A partir da medida da radiação fotossinteticamente ativa na estação meteorológica, foi determinado o montante de energia radiante disponível ao longo do ciclo da soja em cada talhão (Figura 2). No talhão 1, durante os 113 dias de produção, foram acumulados 468,63 mol m⁻², no talhão T2, nos 116 dias de ciclo, foram 484,51 mol m⁻² e nos 123 dias de cultivo no talhão T3, 473,02 mol m⁻². Em média, a partir do ajuste estatístico, a PAR em cada talhão variou de 1,37 a 70,9 mol m⁻².

Figura 2. Temperatura do ar e precipitação média diária na área e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) acumulada durante o ciclo da soja no talhão T1, T2 e T3.

Na maior parte dos dias com registro de chuva a diferença entre medidas dos pluviômetros foi inferior a 5 mm. Porém, em alguns momentos ocorreram diferenças que superaram os 20 mm. De acordo com Lenderink & Van Meijgaard, 2008 e Utsumi et al., 201, essas informações caracterizam chuvas convectivas, intensas, de curta duração e localizadas, atingindo parcialmente a área monitorada.

A precipitação, coletada espacialmente nos três talhões com os nove pluviômetros, apresentou variabilidade espaço-temporal internamente, em cada talhão (Figura 3). Foram obtidas variações de até 35mm entre os as leituras dos

pluviômetros no talhão T1, 16,4mm no talhão T2 e no T3 diferença máximas de 14,6 e 25,1mm (Figura 4).

A precipitação diária média no talhão T1 foi de 6,5mm, no T2 de 6,79mm e de 6,81mm no talhão T3. As chuvas foram bem distribuídas, porém houve estiagem no último decêndio de dezembro, com volumes acumulados de menos de 5mm em todos os pontos de coleta. Devido as diferentes datas de semeadura dos talhões (Tabela 2), período mais seco de final de ano coincidiu com diferentes estádios de desenvolvimento da soja, em subperíodo reprodutivo nos talhões T1 e T2, e previamente a passagem pro subperíodo reprodutivo no T3, entre 60 e 70 dias após a semeadura (Figura 4).

Figura 3. Precipitação diária nos pluviômetros de referência P3 (A), P4 (D) e P7 (G) e as diferenças dentro de cada talhão: P1-P3 (B), P2-P3 (C) para T1, P5-P4 (H), P6-P4 (I) para T2 e P8-P7, P9-P7 para T3.

Figura 4. Precipitação média entre os pluviômetros P1, P2 e P3 (T1), P4, P5 e P6 (T2), P7, P8, P9 (T3) durante o cultivo da soja nos talhões três talhões.

3.3.2. Sensibilidade do modelo APSIM-Soybean

Quando variado todos os parâmetros referentes ao fotoperíodo (x_{pp}), a resposta do modelo quanto à quantidade de dias entre as fases fenológicas e ao ciclo completo da planta apresentou pouca sensibilidade à variação de +5% e +10%. Porém, a redução dos parâmetros em 5% e 10% ocasionou variação no período de duração das fases fenológicas. Avaliando a mesma resposta de saída do modelo em dias após a semeadura (DAS), agora em função do parâmetro tempo térmico, também foi observada maior sensibilidade à redução dos valores e quase nenhuma ao aumento.

Ainda referente aos parâmetros relacionados ao fotoperíodo (x_{pp}), seu aumento em 5% e 10% resultou em diminuição no ciclo da cultura em, no máximo 3 dias, sem diferença entre a duração das fases fenológicas. Já a redução em 5% do parâmetro $x_{pp_start_grain_fill}$ causou um aumento de até 9 dias para completar a fase R5, e a redução em 10% do parâmetro $x_{pp_floral_initiation}$ (fotoperíodo

necessário para o início do florescimento) em aumento de 22 dias para completar as fases R3 e R6 e de 21 dias para a fase R5 e colheita.

A resposta da planta a variação fotoperiódica ao longo do ciclo da soja foram apresentadas por Nico et al. (2015) como um efeito indireto, pois regulam a duração do período crítico para a determinação do número de sementes e, conseqüentemente, a quantidade final de sementes (KANTOLIC et al., 2013). Logo, um efeito positivo ocasionará maior produtividade de biomassa e grãos e essa resposta deve ser avaliada em função do genótipo/grupo de maturação da cultura, como apresentado por NICO et al. (2019).

Os autores avaliaram diferentes genótipos de 4 grupos de maturação e, para todas as cultivares, foi observado um comportamento diretamente proporcional na relação fotoperíodo/duração da fase fenológica pós floração, assim como apresentado por estudos anteriores (GUIAMÉT & NAKAYAMA, 1984; KANTOLIC & SLAFER, 2007).

A sensibilidade do modelo aumentou em função da diminuição do fotoperíodo, mas para a variação positiva dos valores, houve pouca ou nenhuma sensibilidade nas variáveis de saída avaliadas. A exemplo, somando 10% aos parâmetros do modelo referentes ao fotoperíodo ($x_{pp_end_of_juvenile}$; $x_{pp_floral_initiation}$; $x_{pp_flowering}$ e $x_{pp_start_grain_fill}$) condicionamos a planta às condições contrárias de seu cultivo no campo.

A variação dos parâmetros em $\pm 10\%$ do valor padrão não refletiu no acúmulo de biomassa e IAF nos estágios fenológicos semeadura (S) e emergência (VE). Nesse período a planta está iniciando seu crescimento e não possui folhas, justificando a sensibilidade relativa nula do modelo. A fase compreendida entre a germinação e o final da fase vegetativa (VN) é denominada “período juvenil” (GAVIOLI, 2013). No início do crescimento, a soja apresenta pouca ou nenhuma sensibilidade ao comprimento do dia, condição alterada após o surgimento do quinto ou sexto trifólio (RANGEL, 2012). Estudos conduzidos por Rodrigues et al. (2001) utilizando genótipos de diferentes grupos de maturação, apresentam distintas respostas da cultura quando submetida a variações na quantidade de horas de sol, onde o aumento da temperatura e a taxa de desenvolvimento apresentam diferentes relações para cada genótipo.

A biomassa apresentou maior sensibilidade (-57%) quando submetida à diminuição em 10% do fotoperíodo na fase de iniciação floral (Figura 6B). Para as demais fases e variação do parâmetro, a sensibilidade relativa variou entre -17,1% e

0%. Vale ressaltar que, quando reduzido o fotoperíodo e tempo térmico em 10%, na fase de enchimento de grãos (Figura 5D e 6D), a cultura não completou o ciclo. Isso ocorreu, pois, apesar de ser considerada uma cultura de dias curtos (GARNER & ALLARD, 1930), se submetida a horas de sol muito abaixo das indicadas, o período de tempo necessário para a mesma completar a fase fenológica é prolongado e, dependendo do grupo de maturação (genótipo), o ciclo se prolongará de modo a não encher grãos e consequentemente não completar seu ciclo.

O modelo não apresentou sensibilidade relativa ao IAF na fase juvenil (Figura 6A). Porém, durante a fase de iniciação floral, a sensibilidade relativa atingiu 115 pontos (Figura 6B) e no florescimento 35 (Figura 6C), quando reduzido o fotoperíodo em até 10%.

Figura 5. Sensibilidade relativa para biomassa em função da variação dos parâmetros relacionados ao fotoperíodo: x_pp_end_of_juvenile (A); x_pp_floral_initiation (B); x_pp_flowering (C) e x_pp_start_grain_fill (D) da soja.

Figura 6. Sensibilidade relativa para IAF em função da variação dos parâmetros relacionados ao fotoperíodo: $x_{pp_end_of_juvenile}$ (A); $x_{pp_floral_initiation}$ (B); $x_{pp_flowering}$ (C) e $x_{pp_start_grain_fill}$ (D) da soja.

Figura 7. Sensibilidade relativa para biomassa em função da variação dos parâmetros relacionados ao tempo térmico: $y_{tt_end_of_juvenile}$ (A); $y_{tt_floral_initiation}$ (B); $y_{tt_flowering}$ (C) e $y_{tt_start_grain_fill}$ (D) da soja.

Figura 8. Sensibilidade relativa para IAF em função da variação dos parâmetros relacionados ao tempo térmico: y_tt_end_of_juvenile (A); y_tt_floral_initiation (B); y_tt_flowering (C) e y_tt_start_grain_fill (D) da soja.

3.3.3. Calibração e avaliação do modelo

O processo de calibração do modelo foi realizado em três etapas. Primeiramente realizou-se as simulações com os valores padrão para a cultivar genérica MG_8 cadastrada na base dados do software. O segundo passo (fase 2) foi de ajustar os parâmetros referentes à fenologia da cultura, e por fim, na fase 3, ajustou-se os parâmetros referentes às variáveis de solo.

A produtividade atingível (Y_a) simulada foi inferior ao valor de produtividade real, reiterando que o cultivo foi realizado em sistema de sequeiro*. Apesar das condições meteorológicas, especialmente chuva ao longo do ciclo de produção da soja ter favorecido a cultura, julga-se a necessidade de uma calibração mais acurada do modelo, com maior quantidade de dados, de preferência em cultivos irrigados, sem deficiência hídrica. A correlação entre Y_a e Y_r resultou em RQME de 642 kg ha^{-1} , atingindo R^2 de 0,81 (Tabela 5).

Na Índia, Mohanty et al., (2012) parametrizaram o modelo para a soja e obtiveram subestimativa de apenas 100 kg ha^{-1} na produtividade, em Iowa EUA,

Dietzel et al., (2016) avaliaram o desempenho do modelo na simulação da produtividade para a rotação soja/milho e, segundo o índice RRMSE, encontraram resultado classificado como “bom” com valores de 14% e Balboa et al., (2019), no Kansas, 0,31% com R^2 de 0,75. Na região sul do Brasil, Battisti et al, (2017) obtiveram valores de RMSE abaixo de 769 kg ha⁻¹ com R^2 de 0,69. Além da soja, o modelo apresenta bom desempenho na estimativa de produtividade de grãos para diversas outros grãos como canola, milho (SUN et al., 2016), arroz (AMARASINGHA et al., 2015).

A estimativa da biomassa total da planta também foi abaixo do esperado, apresentando RMSE de 5.348 kg ha⁻¹ e R^2 de 0,02. Os valores coletados em campo atingiram 17.823 kg ha⁻¹ de biomassa, enquanto a simulação realizada com o modelo resultou em no máximo 8.913 kg ha⁻¹.

Diversos estudos apresentam aproximações na estimativa da biomassa, como apresentado por Mohanty et al., (2012) que obtiveram subestimativa na simulação da biomassa, mas diferindo em apenas 600 kg ha⁻¹ do mensurado em campo, Robertson et al., (2002) também apresentam bons resultados para a estimativa da biomassa ao longo do ciclo de diversas leguminosas, com R^2 atingindo 0,76, resultados semelhantes aos obtidos por (DIETZEL et al., 2016) para soja e milho.

Tabela 5. Desempenho estatístico do modelo APSIM para a produtividade e biomassa de soja de grupo de maturação 8.

Produtividade						
RMSE kg ha ⁻¹	Bias	R	d	R ²	Medida	Estimada
642	-585	0,9	0,69	0,81	4102,1	3516
Biomassa						
RMSE kg ha ⁻¹	Bias	R	d	R ²	Medida	Estimada
5348	-3685	-0,15	0,44	0,02	11094 ¹	7812,5

¹Valor médio para as duas localidades (cinco safras).

3.3.4. Relação entre a produtividade observada e simulada

Considerando a existente variabilidade de solo e chuva em cada talhão, foram realizadas simulações pontuais da produtividade atingível da soja nos 9 pontos de coleta, porém, devido à pouca variabilidade produtiva simulada, foram plotados gráficos com a média produtiva (real e simulada) por talhão A produtividade atingível

(ya) foi de $3678,1 \pm 141,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (T1), $3637,2 \pm 123,9 \text{ kg ha}^{-1}$ (T2) e $3521,5 \pm 25,7 \text{ kg ha}^{-1}$ (T3) (Figura 9).

Figura 9. Produtividade real e simulada nos talhões T1, T2 e T3 para a safra 2018/19 na fazenda localizada em General Carneiro-MT.

Como apresentado na Figura 10, a produtividade real da soja variou entre 0,500 e 6000 kg ha^{-1} . A média obtida por talhão foi de $3.148 \pm 695 \text{ kg ha}^{-1}$ (T1), $3.126 \pm 718 \text{ kg ha}^{-1}$ (T2) e $3.776 \pm 725 \text{ kg ha}^{-1}$ (T3) e, apesar de serem obtidas amplitudes de 5458 kg ha^{-1} , 5.570 kg ha^{-1} , 5.452 kg ha^{-1} para T1, T2 e T3, notamos que a maioria dos valores foi obtida entre de 2.362 a 4.723 kg ha^{-1} (T1), 2.344 a 4.689 kg ha^{-1} (T2) e 2.832 a 5.664 kg ha^{-1} (T3). A média produtiva da área foi aproximadamente 712 kg ha^{-1} abaixo do registrado no estado (CONAB, 2019).

Figura 10. Variabilidade da produtividade real da soja cultivada durante a safra 2018/19 na fazenda localizada em General Carneiro – MT.

A região mais produtiva do talhão T1 não coincide com o maior volume acumulado de chuva (Figura 11), mas sim com as regiões onde a precipitação foi melhor distribuída durante o ciclo da soja. Observa-se que, mesmo em regiões próximas há variabilidade na textura do solo (Figura 12) porém, como detalhado na Figura 13, a produtividade não apresentou um padrão quando relacionada apenas às características de solo. No talhão T2 foram observados na área correspondente ao pluviômetro P5, com maior uniformidade dos dados no restante da extensão do talhão. Já no talhão T3 observamos poucas linhas com produtividade inferior a 1000 kg ha^{-1} , refletindo em menor variação produtiva espacial.

A produtividade de soja correlaciona-se diretamente com a quantidade de argila quando o solo apresenta classificação textural variável entre arenoso e argiloso, porém quando classificado como argila pesada tem sua porosidade diminuída e acaba dificultando o desenvolvimento das raízes, bem como o transporte de nutrientes, acarretando em diminuição produtiva do Santos et al., (2008).

Considerando então a relação entre textura e capacidade de retenção de água no solo, e a isso agregando a variabilidade espaço-temporal da chuva, o mapa da razão Y_a/Y_o permite observar aderência entre as áreas de menor perda produtiva simulada, por causa da deficiência hídrica, e as produtividades reais do mapa de colheita (Figura 14).

Figura 11. Variabilidade espacial da precipitação acumulada durante o ciclo da soja em fazenda de produção na cidade de General Carneiro-MT, durante a safra 2018/19.

Figura 12. Teor médio de argila nos pontos amostrais em área de produção de soja em General Carneiro-MT.

Figura 13. Mapa da produtividade real de soja, cultivada na safra 2018/19 na fazenda localizada em General Carneiro – MT.

Figura 14. Variabilidade espacial da razão entre a produtividade atingível (Y_a) e produtividade potencial (Y_p) da soja, simulada em uma fazenda de produção em General Carneiro-MT, durante a safra 2018/19.

3.4 CONCLUSÕES

O modelo APSIM-Soybean, a partir da calibração feita, mostrou-se apropriado para simular o desenvolvimento da cultura da soja. Porém, os valores de produtividade estimados apontam para a necessidade de incorporar maior quantidade de dados de campo para, provavelmente, melhorar a calibração e os resultados simulados. A agregação das variáveis meteorológicas ao modelo de crescimento de planta APSIM-Soybean, identificando a variabilidade espacial e temporal em unidades de produção, mesmo que com desempenho aquém do desejado do modelo, permitiu vislumbrar o quão importante é analisar detalhadamente cada talhão de produção.

REFERÊNCIAS

- ADEBOYE, O. B. et al. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 1130–1146, 2019.
- AHMED, M. et al. Calibration and validation of APSIM-Wheat and CERES-Wheat for spring wheat under rainfed conditions: Models evaluation and application. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 384–401, 2016.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**, v. 56, p. 1–15, 1998.
- ALMEIDA, T. S. Modelagem agrometeorológica-espectral para estimativa da produtividade de cafeeiros para áreas irrigadas do noroeste de Minas Gerais. p. 63, 2013.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 831–843, 2009.
- AMARASINGHA, R. P. R. K. et al. Simulation of crop and water productivity for rice (*Oryza sativa* L.) using APSIM under diverse agro-climatic conditions and water management techniques in Sri Lanka. **Agricultural Water Management**, v. 160, p. 132–143, 2015.
- ARCHONTOULIS, S. V.; MIGUEZ, F. E.; MOORE, K. J. A methodology and an optimization tool to calibrate phenology of short-day species included in the APSIM PLANT model: Application to soybean. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 465–477, 2014.
- ARORA, V. K. et al. Irrigation, tillage and mulching effects on soybean yield and water productivity in relation to soil texture. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 4, p. 563–568, 2011.

BALBOA, G. R. et al. A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high- and low-management inputs in the Western US Corn Belt using APSIM. **Agricultural Systems**, v. 174, p. 145–154, 2019.

BARROS, A. H. C. et al. Comissão 2 . 2 - Física do solo Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 4, p. 379–391, 2013.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v. 240, n. June, p. 95–105, 2019.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28–37, 2017.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Sensitivity and requirement of improvements of four soybean crop simulation models for climate change studies in Southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, n. 5, p. 823–832, 2018.

BEGA, R. M. et al. Variabilidade espacial das precipitações pluviais diárias em uma estação experimental, em Pindorama, SP. **Bragantia**, v. 64, n. 1, p. 149–156, 2005.

BERGAMASCHI, H. et al. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243–249, 2006.

BORGHETTI, J. R. et al. **Agricultura irrigada sustentável no Brasil : Identificação de áreas prioritárias**. [s.l: s.n.].

BORSATO, V. DA A. A dinâmica atmosférica no centro-sul do Brasil no verão e as influencias do El Niño Oscilação Sul (ENOS). **Geography Department, University of Sao Paulo**, v. 22, n. 2011, p. 135–157, 2011.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B. A. (Ed.). . **Advances in Soil Science**. 9. ed. New York: Springer Verlag, 1989. p. 177–213.

CACUCI, D. G. et al. **Sensitivity and uncertainty analysis: Applications to Large-Scale Systems**. [s.l: s.n.].

CIACH, G. J.; KRAJEWSKI, W. F. Analysis and modeling of spatial correlation structure in small-scale rainfall in Central Oklahoma. **Advances in Water Resources**, v. 29, n. 10, p. 1450–1463, 2006.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira - Grãos. **Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB**, v. 6, p. 1–69, 2019.

CORDERO, E. et al. Spatial management strategies for nitrogen in maize production based on soil and crop data. **Science of The Total Environment**, v. 697, p. 133854, 2019.

DA SILVA, E. H. F. M. et al. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 1–7, 2019.

DE OLIVEIRA, J. F. et al. Spatial variability of the physical quality of soil from management zones. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 6, p. 1251–1273, 2019.

DELIN, S.; BERGLUND, K. Management zones classified with respect to drought and waterlogging. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 4, p. 321–340, 2005.

- DESCHEEMAER, K. et al. Effects of climate change and adaptation on the livestock component of mixed farming systems: A modelling study from semi-arid Zimbabwe. **Agricultural Systems**, v. 159, n. May 2017, p. 282–295, 2018.
- DEY, P.; MUJUMDAR, P. P. On the uniformity of rainfall distribution over India. **Journal of Hydrology**, v. 578, n. July, p. 124017, 2019.
- DI MAURO, G. et al. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. **European Journal of Agronomy**, v. 99, p. 186–194, 2018.
- DIETZEL, R. et al. How efficiently do corn- and soybean-based cropping systems use water? A systems modeling analysis. **Global Change Biology**, v. 22, p. 666–681, 2016.
- DINIZ, F. DE A.; RAMOS, A. M.; REBELLO, E. R. G. Brazilian climate normals for 1981-2010. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 2, p. 131–143, 2018.
- DIXIT, P. N. et al. Decadal analysis of impact of future climate on wheat production in dry Mediterranean environment: A case of Jordan. **Science of the Total Environment**, v. 610–611, p. 219–233, 2018.
- ELY, D. F.; ALMEIDA, I. R. DE; NETO, J. L. S. Variabilidade climática e o rendimento da cultura do milho no estado do Paraná: algumas implicações políticas e econômicas. **Geografia**, v. 12, n. 1, p. 495–508, 2003.
- FERNEDA, B. G. et al. Estudo de riscos climáticos para o cultivo da josa transgênica e convencional, na região de Sinop-MT - Safra 14/15. **Livro do XLV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2016**, p. 1689–1699, 2016.
- FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2008.
- FISCH, G.; VENDRAME, I. F.; DE MELO HANAOKA, P. C. Variabilidade espacial da chuva durante o experimento LBA/TRMM 1999 na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 4, p. 583–590, 2007.
- GARNER, W. W.; ALLARD, H. A. Photoperiodic response of soybeans in relation to temperature and other environmental factors. **Journal of Agricultural Research**, v. 41, n. 10, p. 719–735, 1930.
- GAVIOLI, E. A. **Explanations for the rise of soybean in Brazil**. [s.l.: s.n.]. v. J. Board (
- GAYDON, D. S. et al. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. **Field Crops Research**, v. 204, p. 52–75, 2017.
- GHOLZ, H. L.; EWEL, K. C.; TESKEY, R. O. Water and forest productivity. **Forest Ecology and Management**, v. 30, p. 1–18, 1990.
- GONÇALVES, F. N.; BACK, Á. J. Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região sul do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 592–602, 2018.
- GORTHI, A.; VOLENEC, J. J.; WELP, L. R. Stomatal response in soybean during drought improves leaf-scale and field-scale water use efficiencies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 276–277, n. June, p. 107629, 2019.
- GRASSINI, P. et al. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, v. 179, p. 150–163, 2015.

- GUIAMÉT, J. J.; NAKAYAMA, F. The effects of long days upon reproductive growth in soybeans (*Glycine Max* (L.) Merr.) cv. Williams. **Japanese Journal of Crop Science**, v. 53, p. 35–40, 1984.
- HABIB, E.; CIACH, G. J.; KRAJEWSKI, W. F. A method for filtering out raingauge representativeness errors from the verification distributions of radar and raingauge rainfall. **Advances in Water Resources**, v. 27, n. 10, p. 967–980, 2004.
- HABIB, E.; KRAJEWSKI, W. F. Uncertainty analysis of the TRMM ground-validation radar-rainfall products: Application to the TEFLUN-B field campaign. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, n. 5, p. 558–572, 2002.
- HE, D.; WANG, E. On the relation between soil water holding capacity and dryland crop productivity. **Geoderma**, v. 353, n. January, p. 11–24, 2019.
- HOCHMAN, Z. et al. Smallholder farmers managing climate risk in India: 1. Adapting to a variable climate. **Agricultural Systems**, v. 150, p. 54–66, 2017.
- HOLZWORTH, D. P. et al. APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 327–350, 2014.
- HUBBARD, K. G. Spatial variability of daily weather variables in the high plains of the USA. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, n. 1–2, p. 29–41, 1994.
- IRMAK, S. et al. Disk-till vs. no-till maize evapotranspiration, microclimate, grain yield, production functions and water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 216, n. November 2018, p. 177–195, 2019.
- JONES, J. W. et al. **The DSSAT cropping system model**. [s.l: s.n.]. v. 18
- KANTOLIC, A. G.; PERALTA, G. E.; SLAFER, G. A. Seed number responses to extended photoperiod and shading during reproductive stages in indeterminate soybean. **European Journal of Agronomy**, v. 51, p. 91–100, 2013.
- KANTOLIC, A. G.; SLAFER, G. A. Development and seed number in indeterminate soybean as affected by timing and duration of exposure to long photoperiods after flowering. **Annals of Botany**, v. 99, p. 925–933, 2007.
- KASPAR, T. C. et al. Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. **Precision Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 87–101, 2003.
- KRAJEWSKI, W. F.; CIACH, G. J.; HABIB, E. An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 2, p. 151–162, 2003.
- KUCHERENKO, S.; TARANTOLA, S.; ANNONI, P. Estimation of global sensitivity indices for models with dependent variables. **Computer Physics Communications**, v. 183, n. 4, p. 937–946, 2012.
- KUKAL, M. S.; IRMAK, S. Characterization of water use and productivity dynamics across four C3 and C4 row crops under optimal growth conditions. **Agricultural Water Management**, v. 227, n. May 2019, p. 105840, 2020.
- KUMAR, K. N. et al. Influence of tropical-extratropical interactions on the dynamics of extreme rainfall event: A case study from Indian region. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 85, n. July 2018, p. 28–40, 2019.

- LENDERINK, G.; VAN MEIJGAARD, E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 8, p. 511–514, 2008.
- LI, S. et al. Spatial variability of soil bulk density and its controlling factors in an agricultural intensive area of Chengdu Plain, Southwest China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 2, p. 290–300, 2019.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. A. G. Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para a produção agropecuária. **Boletim Técnico Nº 5**, n. 2º Edição, p. 62, 1994.
- LUO, T. et al. Summer solstice marks a seasonal shift in temperature sensitivity of stem growth and nitrogen-use efficiency in cold-limited forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, n. October 2017, p. 469–478, 2018.
- MACHADO, S. et al. Spatial and temporal variability of sorghum grain yield: Influence of soil, water, pests, and diseases relationships. **Precision Agriculture**, v. 3, n. 4, p. 389–406, 2002.
- MARCUZZO, F. F. N.; ROCHA, H. M.; MELO, D. C. DE R. Mapeamento da precipitação pluviométrica no Bioma Cerrado do estado do Mato Grosso. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 83–97, 2011.
- MARIN, F. R. et al. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 1449–1455, 2008.
- MARIN, F. R. Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. ago. 2014.
- MARRA, F.; MORIN, E. Autocorrelation structure of convective rainfall in semiarid-arid climate derived from high-resolution X-Band radar estimates. **Atmospheric Research**, v. 200, n. September 2017, p. 126–138, 2018.
- MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. [s.l: s.n.].
- MARTORANO, L. G. et al. **Differential expression in soybean leaf during water deficit in Brazil management system** *International Journal of AgriScience*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.inacj.com>. Acesso em: 30 jan. 2019.
- MATTIONI, N. M.; SCHUCH, L. O. B.; VILLELA, F. A. Variabilidade espacial da produtividade e da qualidade das sementes de soja em um campo de produção. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 4, p. 608–615, 2011.
- MEDRADO, E.; LIMA, J. E. F. W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma Regional**, v. 1, p. 59–66, 2014.
- MELLAART, E. A. R. Integrated Drought Management: Lessons for Sub-Saharan Africa. **IHP-V/Technical Documents in Hydrology | No. 35**, p. 138–147, 1999.
- MOHANTY, M. et al. Simulating soybean-wheat cropping system: APSIM model parameterization and validation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 152, p. 68–78, 2012.
- MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 90–101, 2011.

- MONDO, V. H. V. et al. Spatial variability of soil fertility and its relationship with seed physiological potential in a soybean production area. **Revista brasileira de sementes**, v. 34, n. 2, p. 193–201, 2012.
- MORAES, B. C. DE et al. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 207–214, 2005.
- MORIN, E. et al. Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response. **Advances in Water Resources**, v. 29, n. 6, p. 843–860, 2006.
- MOURA, M. DO N.; VITORINO, M. I. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à Zona de Convergência Intertropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 475–483, 2012.
- MÜLLER, D. H. et al. Spatial variability in soybean seeds quality and in chemical attributes of the soil of a production field in the Brazilian Cerrado. **Journal of Seed Science**, v. 40, n. 1, p. 25–35, 2018.
- NASSIF, D. S. P. et al. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 3, p. 311–318, 2012.
- NENDEL, C. et al. The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 9, p. 1614–1625, 2011.
- NICO, M.; MIRALLES, D. J.; KANTOLIC, A. G. Post-flowering photoperiod and radiation interaction in soybean yield determination: Direct and indirect photoperiodic effects. **Field Crops Research**, v. 176, p. 45–55, 2015.
- NICO, M.; MIRALLES, D. J.; KANTOLIC, A. G. Natural post-flowering photoperiod and photoperiod sensitivity: Roles in yield-determining processes in soybean. **Field Crops Research**, v. 231, n. July 2018, p. 141–152, 2019.
- NISSANKA, S. P. et al. Calibration of the phenology sub-model of APSIM-Oryza: Going beyond goodness of fit. **Environmental Modelling and Software**, v. 70, p. 128–137, 2015.
- NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, n. August 2018, p. 140–151, 2019.
- OLIVEIRA, N. D. L.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, R. G. Influência do El Niño e La Niña no número de dias de precipitação pluviométrica no Estado do Mato Grosso. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 4, p. 284–297, 2015.
- OTTONI, M. V. et al. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**, v. 575, n. May, p. 1345–1358, 2019.
- PAIVA, A. S. et al. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 161–169, 2005.
- PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Daily crop evapotranspiration, crop coefficient and energy balance components of a surface-irrigated maize fiels. In: **Gerosa, G; A. (Ed.), Evapotranspiration: From Measurements to Agricultural and Enviromental Applications. Chapter 4. INTECH Publisher**, v. November, p. 59–78, 2011.

PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas. **Guaíba: Agropecuária**, 2002.

PÍPOLO, A. E. et al. Teores de óleo e proteína e soja: fatores envolvidos e qualidade para a indústria. **Circular Técnica** 86, p. 1–16, 2015.

RAB, M. A. et al. Advances in precision agriculture in south-eastern Australia. IV. Spatial variability in plant-available water capacity of soil and its relationship with yield in site-specific management zones. **Crop and Pasture Science**, v. 60, n. 9, p. 885–900, 2009.

REICHARDT, K. et al. Daily rainfall variability at a local scale (1.000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. **Scientia Agricola**, v. 52, n. 1, p. 43–49, 1995.

ROBERTSON, M. J. et al. Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 53, n. 4, p. 429–446, 2002.

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

ROSOLEM, C. A.; BICUDO, S. J.; MARUBAYASHI, O. M. Soybean yield and root growth as affected by lime rate and quality. **Plant-Soil Interactions at Low pH: Principles and Management**, n. 1, p. 543–547, 2011.

ROSSETTI, L. A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e seguridade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 386–399, 2001.

SABINO, M. **Intensidade-duração-frequência de precipitação máxima em mato grosso**. [s.l: s.n.].

SALTELLI, A. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. **Computer Physics Communications**, v. 145, n. 2, p. 280–297, 2002.

SALTELLI, A. et al. **Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models**. [s.l: s.n.].

SALTELLI, A. et al. **Global Sensitivity Analysis: The Primer**. [s.l: s.n.]. v. 76

SANA, R. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 994–1002, 2014.

SANTOS NETO, L. A. DOS et al. Distribuição horária da precipitação em Porto Velho - RO no período de 1998-2013. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, p. 213–228, 2014.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Relações Água-Solo-Planta-Atmosfera: Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a déficit hídrico em diferentes solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 1–6, 1999.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e produtividade de culturas em um latossolo vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 407–414, 2005.

SEIDEL, S. J. et al. The influence of climate variability, soil and sowing date on simulation-based crop coefficient curves and irrigation water demand. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 73–83, 2019.

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

SHELIA, V. et al. A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies. **Environmental Modelling and Software**, v. 115, n. October 2018, p. 144–154, 2019.

SILVA, D. F. DA; PRELA-PANTANO, A.; NETO, J. L. S. Variabilidade da precipitação e produtividade agrícola na região do médio Paranapanema, SP. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, p. 101–116, 2008.

SILVA, V. DE P. R. DA; PEREIRA, E. R. R.; ALMEIDA, R. S. R. Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 163–172, 2012.

SOUSA, R. R. DE; TOLEDO, L. G.; TOPANOTTI, D. Q. Oscilação das chuvas na porção centro oeste do estado de Mato Grosso, entre os anos de 1996 a 2001. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 27, n. 3, p. 71–89, 2007.

SOUZA, A. P. DE et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34–43, 2013.

SREEKANTH, T. S. et al. Classification and seasonal distribution of rain types based on surface and radar observations over a tropical coastal station. **Atmospheric Research**, v. 218, n. October 2018, p. 90–98, 2019.

STOL, P. T. The relative efficiency of the density of rain-gage networks. **Journal of Hydrology**, v. 15, n. 3, p. 193–208, 1972.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 395–401, 2001.

SUN, H. et al. Assessing the contribution of weather and management to the annual yield variation of summer maize using APSIM in the North China Plain. **Field Crops Research**, v. 194, p. 94–102, 2016.

TOMASELLA, J.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, p. 1085–1092, 2003.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, n. 3, p. 190–202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 327–338, 2000.

TORMENA, C. A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 2, p. 211–219, 2007.

UTSUMI, N. et al. Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 16, p. 1–5, 2011.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

- WANG, G. C. et al. Soil carbon sequestration potential as affected by management practices in northern China: A simulation study. **Pedosphere**, v. 24, n. 4, p. 529–543, 2014.
- WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V.; ZWIERS, F. W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. **Journal of Climate**, v. 26, n. 11, p. 3904–3918, 2013.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.
- WONG, M. T. F.; ASSENG, S. Determining the causes of spatial and temporal variability of wheat yields at sub-field scale using a new method of upscaling a crop model. **Plant and Soil**, v. 283, n. 1–2, p. 203–215, 2006.
- ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence Soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1447–1454, 2016.
- ZARO, G. C. et al. Inter-annual analysis of soybean and corn yield in relation to water deficit in a transitional zone between subtropical and tropical climate. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 4, p. 511–518, 2018.
- ZHANG, Q. et al. Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. **Global and Planetary Change**, v. 152, p. 1–11, 2017.
- ZHAO, G.; BRYAN, B. A.; SONG, X. Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: Interactions between cultivar, environmental, and management parameters. **Ecological Modelling**, v. 279, p. 1–11, 2014.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da chuva em uma área de produção de soja, no estado do Mato Grosso, acompanhado da análise de dados regionais, realizada ao longo de apenas uma estação chuvosa, portanto de um curto período de tempo, evidenciou a presença de variabilidade espaço-temporal. Sugere-se estudos que contemplem maior área e período de tempo a fim de melhorar o entendimento da meteorologia local.

Após o processo de calibração, o modelo APSIM-Soybean não foi assertivo na estimativa da biomassa e produtividade atingível, porém foi capaz de prever as diferentes fases fenológicas da soja. Recomenda-se a utilização de um banco maior de dados da cultura, solo e clima de cultivo.