REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

MODELAGEM DA PRECIPITAÇÃO PROVÁVEL PARA A IRRIGAÇÃO DA SOJA NO CERRADO MINEIRO UTILIZANDO DISTRIBUIÇÃO GAMA

MODELING PROBABLE PRECIPITATION FOR SOYBEAN IRRIGATION IN THE CERRADO OF MINAS GERAIS USING THE GAMMA DISTRIBUTION

MODELIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN PROBABLE PARA EL RIEGO DE SOJA EN EL CERRADO DE MINAS GERAIS UTILIZANDO LA DISTRIBUCIÓN GAMMA

Alisson Macendo Amaral
Doutor em Ciências Agrárias - Agronomia, IFNMG – Campus Arinos, Brasil
E-mail: alisson.amaral@ifnmg.edu.br

Maria Ângela Cruz Macêdo dos Santos
Doutora em Engenharia Agrícola - Agronomia, IMA – ESEC Buritis, Brasil
E-mail: angela_macedo.08@hotmail.com

Maria Josiane Martins
Doutora em Produção Vegetal no Semiárido, IFNMG – Campus Arinos, Brasil
E-mail: maria.martins@ifnmg.edu.br

Sandra Bessa Pereira
Graduanda em Bacharelado em Agronomia, IFNMG – Campus Arinos, Brasil
E-mail: sbp3@aluno.ifnmg.edu.br

Laura Rodrigues Anorato
Graduanda em Bacharelado em Agronomia, IFNMG – Campus Arinos, Brasil
Bolsista de Iniciação Científica CNPq
E-mail: lado8@aluno.ifnmg.edu.br

Resumo

A variabilidade intraestacional da precipitação no Cerrado impõe incertezas ao planejamento da irrigação suplementar da soja. Este estudo teve como objetivo modelar a precipitação provável mensal para o município de Arinos–MG e estimar a necessidade de irrigação com base em análise probabilística e balanço hídrico climatológico. Foram utilizados dados de precipitação e temperatura média mensal da estação INMET (1991–2019). A precipitação foi modelada pela distribuição Gama, com parâmetros estimados por máxima verossimilhança, e os quantis foram definidos com base na probabilidade de excedência. A evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Thornthwaite e a evapotranspiração da cultura (ETc) calculada a partir de coeficientes culturais recomendados pela FAO. O balanço hídrico climatológico foi conduzido segundo Thornthwaite e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

Mather, adotando-se capacidade de água disponível de 100 mm. No cenário de precipitação provável com garantia de 75% (P75), verificou-se ocorrência de deficiência hídrica ao longo do período analisado, com maiores déficits nos meses de outubro, fevereiro e abril. A lâmina acumulada de irrigação suplementar estimada para o período outubro–abril foi de aproximadamente 142 mm. Os resultados demonstram que a precipitação provável isoladamente não atende integralmente à demanda hídrica da soja, sendo necessária suplementação estratégica mesmo em cenários probabilisticamente favoráveis. A integração entre modelagem probabilística da precipitação e balanço hídrico climatológico mostrou-se abordagem consistente para o planejamento da irrigação em regiões de clima sazonal, contribuindo para redução do risco climático e maior previsibilidade no manejo hídrico agrícola.
Palavras-chave: Distribuição Gama; *Glycine max*; Cerrado Mineiro; Irrigação suplementar.

Abstract

Intra-seasonal rainfall variability in the Brazilian Cerrado introduces uncertainty into supplemental irrigation planning for soybean cultivation. This study aimed to model monthly probable precipitation for Arinos, Minas Gerais, Brazil, and to estimate irrigation requirements based on probabilistic analysis and climatological water balance. Monthly precipitation and mean temperature data from the INMET station (1991–2019) were used. Precipitation was modeled using the Gamma distribution, with parameters estimated by maximum likelihood, and quantiles were defined based on exceedance probability. Potential evapotranspiration was estimated using the Thornthwaite method, and crop evapotranspiration (ETc) was calculated using FAO-recommended crop coefficients. The climatological water balance was performed according to Thornthwaite and Mather, adopting a soil water holding capacity of 100 mm. Under the probable precipitation scenario with 75% exceedance probability (P75), water deficits occurred throughout the analyzed period, with higher deficits in October, February, and April. The cumulative supplemental irrigation depth estimated for the October–April period was approximately 142 mm. Results indicate that probable precipitation alone does not fully meet soybean water demand throughout the growing cycle, requiring strategic supplementation even under probabilistically favorable conditions. The integration of probabilistic rainfall modeling and climatological water balance proved to be a consistent approach for irrigation planning in seasonal climates, contributing to reduced climatic risk and improved water management predictability in agricultural systems.
Keywords: Gamma distribution; *Glycine max*; Cerrado Mineiro; Supplemental irrigation.

Resumen

La variabilidad intraestacional de la precipitación en el Cerrado brasileño genera incertidumbre en la planificación del riego suplementario del cultivo de soja. Este estudio tuvo como objetivo modelar la precipitación probable mensual para el municipio de Arinos, Minas Gerais, Brasil, y estimar la

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

necesidad de riego con base en análisis probabilístico y balance hídrico climatológico. Se utilizaron datos mensuales de precipitación y temperatura media de la estación INMET (1991–2019). La precipitación fue modelada mediante la distribución Gamma, con parámetros estimados por máxima verosimilitud, y los cuantiles fueron definidos según la probabilidad de excedencia. La evapotranspiración potencial se estimó mediante el método de Thornthwaite y la evapotranspiración del cultivo (ETc) se calculó utilizando coeficientes de cultivo recomendados por la FAO. El balance hídrico climatológico se realizó conforme a Thornthwaite y Mather, adoptando una capacidad de almacenamiento de agua en el suelo de 100 mm. En el escenario de precipitación probable con 75% de probabilidad de excedencia (P75), se observaron déficits hídricos a lo largo del período analizado, con mayores déficits en octubre, febrero y abril. La lámina acumulada de riego suplementario estimada para el período octubre–abril fue de aproximadamente 142 mm. Los resultados indican que la precipitación probable no satisface completamente la demanda hídrica de la soja durante todo el ciclo productivo, requiriéndose suplementación estratégica incluso bajo condiciones probabilísticamente favorables. La integración entre modelación probabilística de la precipitación y balance hídrico climatológico constituye un enfoque consistente para la planificación del riego en climas estacionales.

Palabras clave: Distribución Gamma; *Glycine max*; Cerrado Mineiro; Riego suplementario.

1. Introdução

A agricultura irrigada é um elemento essencial na garantia da segurança alimentar global, especialmente em regiões que enfrentam variações climáticas expressivas. A previsão da precipitação provável representa um recurso estratégico para a gestão hídrica, possibilitando a aplicação eficiente da água na irrigação e mitigando os impactos da escassez hídrica sobre a produção agrícola (Silva & Jardim, 2025).

A precipitação provável, calculada com base na análise estatística de séries históricas pluviométricas, fornece estimativas sobre a frequência e intensidade das chuvas dentro de um determinado período (Fernandes et al., 2009; Chavan, 2015; Neto et al., 2022). Essa ferramenta permite um planejamento agrícola mais preciso, possibilitando ajustes na irrigação conforme as previsões climáticas. Pesquisas demonstram que a utilização de previsões pluviométricas pode reduzir o desperdício de água e otimizar a eficiência do uso hídrico, contribuindo para a sustentabilidade da agricultura (Gomide & Albuquerque, 2008; Collins et al.,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

2024).

Estudos conduzidos no Brasil e no exterior demonstram a importância da distribuição da precipitação na tomada de decisões para o setor agrícola. No estado do Pará, por exemplo, análises identificaram padrões pluviométricos essenciais para o aperfeiçoamento da gestão hídrica (Filho et al., 2020). No Paraná, a correlação entre evapotranspiração e precipitação foi investigada para aprimorar práticas de irrigação (Rodrigues, 2020; Ferrarini, 2022; Andrade et al., 2021). No Norte e Noroeste de Minas Gerais, pesquisas destacam a elevada variabilidade climática, evidenciando a necessidade de modelos preditivos mais robustos para um planejamento agrícola eficiente (Silva et al., 2025; Moura, 2021).

O Noroeste de Minas Gerais possui um clima tropical de savana, caracterizado por períodos secos prolongados que representam desafios à agricultura irrigada. Os municípios de Buritis, Unaí e Paracatu são destaques na produção de culturas como feijão, soja, milho e sorgo, sendo fundamentais para o abastecimento interno e as exportações agrícolas (Minas Gerais, 2025), já o município de Arinos está expandindo sua área de produção dessas culturas e integrando expressivamente a produção regional.

Nessas áreas, o sistema de irrigação predominante é o pivô central, que cobre cerca de 75% das áreas irrigadas devido à sua eficiência na distribuição hídrica (Ferreira et al., 2024; Barbosa et al., 2024; Ferreira et al., 2025). Entretanto, esse sistema demanda até 30% mais energia em comparação com métodos localizados, como a irrigação por gotejamento. Assim, a adoção de estratégias de manejo baseadas na precipitação provável torna-se essencial para reduzir desperdícios e otimizar a utilização dos recursos hídricos (Wang et al., 2024; Soussi et al., 2024). Outro fator determinante na gestão hídrica é a estimativa da precipitação efetiva, ou seja, o volume de chuva que realmente contribui para o suprimento hídrico das culturas (ANA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019). Pesquisas realizadas em Lavras (Sul de Minas Gerais), ressaltam a necessidade de calibração de modelos de previsão conforme as condições climáticas e edáficas regionais, aumentando a precisão das estimativas e aprimorando as

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

práticas de irrigação (Santos et al., 2023; Pizetta et al., 2017). A implementação dessas técnicas no Noroeste Mineiro pode favorecer um gerenciamento mais eficiente da água e contribuir para uma agricultura mais sustentável.

A ampliação dos estudos sobre a precipitação provável é fundamental para reduzir incertezas relacionadas ao regime de chuvas e fortalecer a resiliência da agricultura irrigada (Wang et al., 2024). Além disso, a melhoria na calibração dos métodos de estimativa da precipitação efetiva pode facilitar a adoção de técnicas agrícolas mais eficazes (Ferreira, 2025).

Portanto, o aprofundamento das pesquisas sobre precipitação provável no Noroeste de Minas Gerais é essencial para garantir a estabilidade da produção agrícola em um contexto de mudanças climáticas e demanda crescente por alimentos. A incorporação de tecnologias preditivas avançadas e a implementação de práticas adaptativas podem contribuir significativamente para a sustentabilidade do setor agrícola, reduzindo os impactos das variações climáticas sobre a produtividade e o uso dos recursos hídricos.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar a precipitação provável no Noroeste de Minas Gerais, município de Arinos, considerando o período compreendido entre 1991 a 2019 e sua aplicação no planejamento da irrigação suplementar para a cultura da soja, visando subsidiar o planejamento das safras 2026 e posteriores.

2. Revisão da Literatura

A agricultura irrigada desempenha um papel fundamental na manutenção da produtividade em regiões sujeitas à variabilidade climática. A estimativa da precipitação provável permite a gestão eficiente dos recursos hídricos, otimizando a irrigação e reduzindo os impactos da escassez de água sobre as culturas agrícolas (Assis et al., 2021; Kuroki et al., 2022).

A modelagem da precipitação baseada na análise estatística de séries históricas de dados pluviométricos possibilita a identificação de padrões climáticos

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

regionais. Dentre diversos métodos estatísticos existentes, a distribuição gama é amplamente utilizada para representar dados assimétricos e compreender variações na precipitação, contribuindo para a detecção de veranicos - períodos secos que comprometem a produtividade agrícola
- e demandam estratégias eficientes de irrigação (Mancini & Victória, 2023; Santos, 2015; Sobrinho et al., 2014; Blain et al., 2025).

A aplicação da distribuição gama na previsão da precipitação favorece a gestão hídrica, fornecendo estimativas mais precisas para o uso da água. Essa modelagem permite calcular a precipitação provável em diferentes níveis de ocorrência, como 60% a 80%, muito utilizados em estudos sobre projetos de irrigação e gestão hídrica (manejo), o que auxilia a tomada de decisão sobre a necessidade de irrigação suplementar durante e após a estação chuvosa, minimizando os impactos da variabilidade climática sobre as culturas (Borges et al., 2025; Oliveira et al., 2021).

A avaliação da precipitação efetiva, isto é, a fração da chuva realmente aproveitada pelas culturas, é essencial para o planejamento agrícola. Estudos indicam que a modelagem baseada na distribuição gama aprimora a precisão das estimativas hídricas, favorecendo estratégias agrícolas mais adaptativas. No Noroeste mineiro, essa abordagem pode tornar a irrigação mais eficiente, assegurando a produtividade e permitindo ajustes estratégicos conforme a disponibilidade hídrica ao longo do ciclo das culturas. O uso da irrigação suplementar, aplicado nos estágios críticos do desenvolvimento das plantas, otimiza o aproveitamento da água natural e reduz os riscos de estresse hídrico (Sampaio et al., 2000; Rodrigues et al., 2003; Bezerra, 2024).

O aprofundamento dos estudos sobre precipitação provável e irrigação suplementar pode aprimorar a resiliência da agricultura irrigada em regiões com padrões climáticos instáveis, como no caso de Arinos-MG. A incorporação da distribuição gama em modelos preditivos contribui para uma gestão hídrica mais eficiente e fomenta práticas agrícolas sustentáveis. Em locais sujeitos a veranicos recorrentes, a irrigação suplementar desempenha um papel essencial na mitigação dos efeitos da escassez hídrica temporária, assegurando que as

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

culturas se desenvolvam de forma adequada durante períodos críticos do ciclo produtivo. Métodos preditivos permitem ajustar a frequência e a intensidade da irrigação, reduzindo o consumo excessivo de água e otimizando os recursos disponíveis para manter a viabilidade econômica da produção agrícola (Santos et al., 2023; Santos et al., 2011).

Investir na previsão da precipitação no Noroeste de Minas Gerais é indispensável para garantir a continuidade da produção agrícola na região. A adoção de tecnologias avançadas de modelagem climática e manejo hídrico eficiente pode fortalecer a sustentabilidade do setor, reduzindo vulnerabilidades e otimizando a utilização da água. O planejamento da irrigação suplementar, fundamentado em análises probabilísticas, possibilita maior previsibilidade e estabilidade produtiva para os agricultores locais, minimizando os impactos da variabilidade climática sobre a produção agrícola (Collins et al., 2024).

3. Metodologia

3.1 Dados meteorológicos

Os dados de precipitação mensal (P) e temperatura média mensal (T) foram obtidos da estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), código 83384, localizada no município de Arinos–MG (latitude 15°55'S, longitude 46°06'W, altitude aproximada de 520 m), no período de 1991 a 2019.

As falhas identificadas na série histórica foram preenchidas por regressão linear com estações vizinhas, procedimento amplamente utilizado em estudos climatológicos. A consistência dos dados foi verificada por meio de análise estatística descritiva e inspeção gráfica das séries temporais.

3.2 Estimativa da evapotranspiração potencial

A evapotranspiração potencial mensal (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948), utilizando a temperatura média mensal e correção pelo

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

fotoperíodo, conforme procedimento descrito por Thornthwaite e Mather (1955). A ETP mensal foi calculada pela Eq. 1.

$$ETP = 16\left(\frac{10T}{I}\right)^{\alpha}\frac{N}{12}\frac{d}{30} \quad (1)$$

Em que: T = temperatura média mensal (°C); I = índice térmico anual; a = coeficiente empírico função de I; N = duração média do dia (horas); d = número de dias do mês.

3.3 Balanço hídrico climatológico

O balanço hídrico climatológico (BHC) foi realizado segundo o método sequencial proposto por Thornthwaite e Mather (1955), adotando-se capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, valor compatível com Latossolos predominantes na região do Cerrado e utilizado em estudos prévios para o município de Arinos–MG (Oliveira & Oliveira, 2018).

O procedimento incluiu as seguintes etapas mensais: a) Cálculo do armazenamento de água no solo (ARM); b) Determinação da evapotranspiração real (ETR); c) Identificação da deficiência hídrica (DEF); d) Determinação do excedente hídrico (EXC).

A precipitação efetiva (Pe) foi considerada como a parcela da precipitação mensal efetivamente convertida em evapotranspiração real e reposição do armazenamento do solo até o limite da CAD, conforme o método clássico do BHC (Thornthwaite & Mather, 1955).

3.4 Modelagem da precipitação provável

A precipitação mensal foi modelada pela distribuição Gama de dois parâmetros, amplamente utilizada para representar variáveis hidrológicas contínuas e assimétricas (Thom, 1958). A função densidade de probabilidade é

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

definida pela Eq. 2.

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^{\alpha}} x^{\alpha-1}\varepsilon^{-x/\beta} \quad (2)$$

Em que: α = parâmetro de forma; β = parâmetro de escala.

3.5 Demanda hídrica da cultura

A demanda hídrica da soja foi estimada pela evapotranspiração da cultura (ETc), conforme a Eq. 3, onde ETo foi aproximada pela ETP estimada pelo método de Thornthwaite, e Kc corresponde aos coeficientes de cultura da soja para os diferentes estágios fenológicos, conforme recomendado por Allen et al. (1998).

$$Etc = ETo\ x\ Kc \quad (3)$$

Em que: ETc = evapotranspiração da cultura (mm); ETo = evapotranspiração de referência (mm); Kc = coeficiente de cultura (adimensional), que varia conforme o estádio fenológico da cultura.

Para aprimorar a compreensão dos resultados, foram construídos gráficos, tabelas e figuras representando as análises estatísticas e a variabilidade da precipitação com o software Microsoft Excel versão 2016.

4. Resultados e Discussão

4.1 Ajuste da distribuição Gama e precipitação provável

Os parâmetros estimados da distribuição Gama (α e β) e os quantis associados às probabilidades de excedência (P60, P70, P75, P80 e P90) estão apresentados na Tabela 1.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

Tabela 1 – Parâmetros da distribuição Gama (α e β) e precipitação provável mensal associada às probabilidades de excedência (P60, P70, P75, P80 e P90) para Arinos - MG (1991 - 2019).

Mês	Alpha (α)	Beta (β)	P60 (mm)	P70 (mm)	P75 (mm)	P80 (mm)	P90 (mm)
Out	1,075	62,344	33,336	22,985	18,288	13,84	5,486
Nov	5,83	34,839	171,76	152,108	141,916	131,131	105,481
Dez	3,7	63,761	186,953	159,795	145,992	131,623	98,594
Jan	1,811	100,837	121,828	95,724	83,109	70,514	44,026
Fev	2,32	60,564	100,81	81,978	72,684	63,24	42,617
Mar	1,959	89,146	119,433	94,937	83,015	71,039	45,527
Abr	1,109	54,591	28,516	19,105	14,797	10,682	2,725

α corresponde ao parâmetro de forma (shape) da distribuição Gama (adimensional); β corresponde ao parâmetro de escala (scale) da distribuição Gama (mm); P60, P70, P75, P80 e P90 representam os quantis de precipitação mensal (mm) associados às probabilidades de excedência de 60%, 70%, 75%, 80% e 90%, respectivamente.

Os valores obtidos evidenciam elevada variabilidade pluviométrica intraestacional, com maior magnitude de precipitação provável entre novembro e janeiro e redução progressiva nos meses de transição (outubro e abril). Esse padrão é consistente com a sazonalidade climática do Cerrado, caracterizada por estação chuvosa concentrada no verão e período seco bem definido no inverno, conforme descrito para Arinos–MG por Oliveira e Oliveira (2018).

A distribuição Gama apresentou comportamento coerente com a natureza assimétrica da precipitação mensal. Seu emprego é amplamente consolidado em estudos hidrológicos e climatológicos, conforme fundamentado por Thom (1958), que demonstrou sua aplicabilidade para variáveis hidrometeorológicas positivas e assimétricas. Trabalhos recentes reforçam a adequação da Gama para modelagem de frequência de precipitação e análise de extremos em escalas mensais (Stagge et al., 2015).

O ajuste mensal da distribuição Gama foi verificado por teste de Kolmogorov–Smirnov (KS), apresentando valores de p indicativos de aderência para os meses analisados.

No cenário de garantia de 75% (P75), o comportamento mensal da

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

precipitação provável é apresentado na Figura 1.

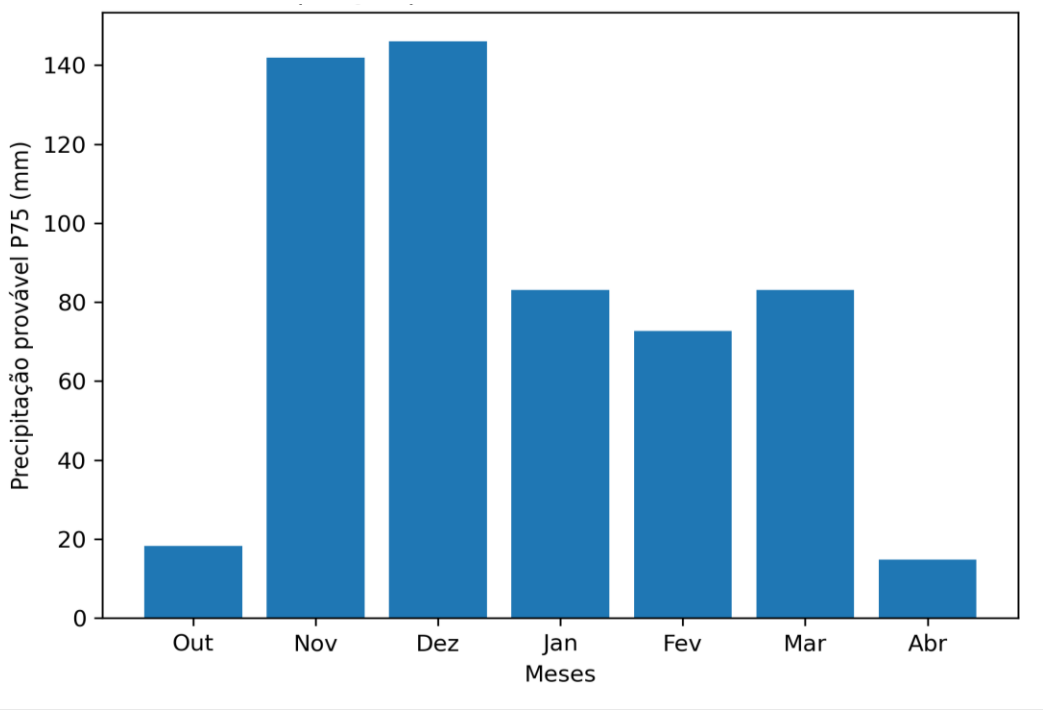

Figura 1 – Precipitação provável mensal (P75) com garantia de 75% para o município de Arinos–MG (1991–2019).

Observa-se que dezembro e janeiro concentram as maiores lâminas prováveis, enquanto outubro e abril apresentam os menores valores, indicando maior vulnerabilidade hídrica nos períodos de transição. A utilização de probabilidade de excedência permite interpretar os valores como precipitação com garantia, conceito amplamente empregado no planejamento de sistemas de irrigação (Doorenbos & Kassam, 1979).

4.2 Evapotranspiração potencial e demanda hídrica da soja

A evapotranspiração potencial (ETP), estimada pelo método de Thornthwaite (1948), apresentou variação sazonal compatível com o regime térmico regional. A evapotranspiração da cultura (ETc), calculada pela relação ETc = ETo × Kc, conforme recomendação da FAO (Allen et al., 1998), apresentou maiores valores

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

nos meses correspondentes às fases reprodutivas da soja. O comportamento mensal da ETc está apresentado na Figura 2.

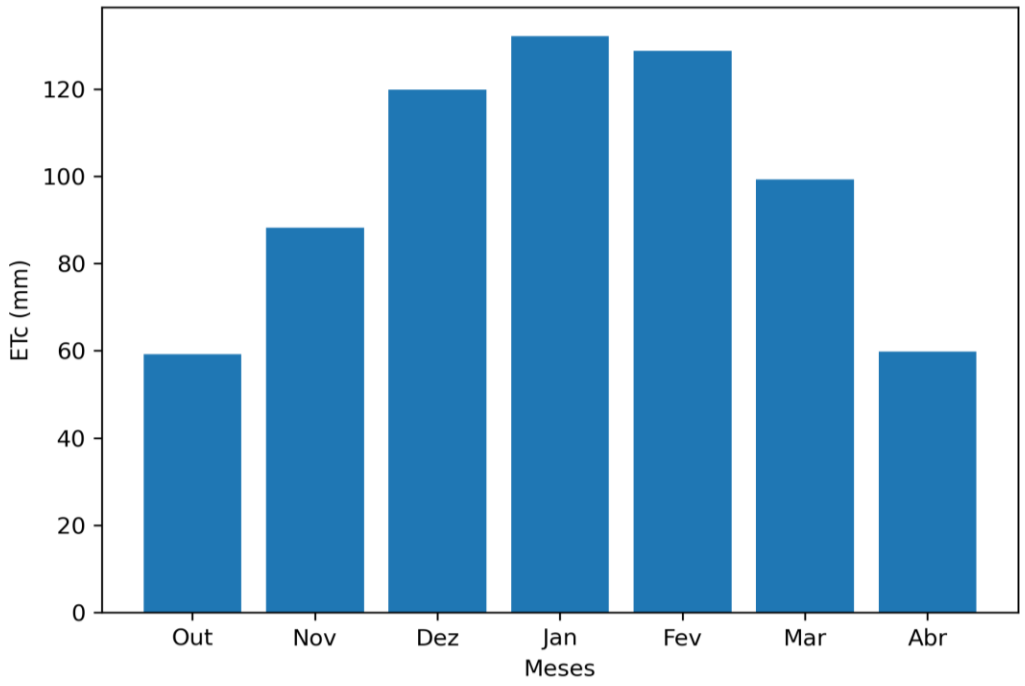

Figura 2 – Evapotranspiração da cultura da soja (ETc) no período outubro–abril em Arinos–MG.

Os resultados indicam maior demanda hídrica nos meses centrais do ciclo produtivo, coincidindo com as fases de florescimento e enchimento de grãos, consideradas críticas para a definição do rendimento (Allen et al., 1998). Em regiões de clima sazonal, a variabilidade intraestacional da precipitação pode gerar déficits mesmo em anos com totais anuais elevados, conforme discutido por Blöschl et al. (2017) e pelo IPCC (2021), o que reforça a importância da abordagem probabilística adotada neste estudo.

4.3 Balanço hídrico climatológico

O balanço hídrico climatológico foi conduzido segundo o método sequencial de Thornthwaite e Mather (1955), adotando-se CAD de 100 mm, conforme

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

aplicação regional para Arinos–MG (Oliveira; Oliveira, 2018). Para fins de planejamento da irrigação suplementar da soja, a demanda atmosférica foi representada pela evapotranspiração da cultura (ETc), calculada conforme a FAO-56 (Allen et al., 1998), de modo que a deficiência hídrica (DEF) refletisse diretamente o déficit hídrico relevante ao manejo.

Os resultados completos do balanço hídrico no cenário de precipitação provável P75 (garantia de 75%) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Balanço hídrico climatológico (Thornthwaite–Mather) no cenário de precipitação provável P75 (CAD = 100 mm) para Arinos - MG.

Mês	P75 (mm)	ETc (mm)	P - ETc (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Out	18,29	59,24	-40,95	0,33	-0,17	18,46	40,78	0,00
Nov	141,92	88,2	53,72	54,05	53,72	88,2	0,00	0,00
Dez	145,99	119,8	26,19	80,24	26,19	119,8	0,00	0,00
Jan	83,11	132,14	-49,03	49,14	-31,09	114,2	17,93	0,00
Fev	72,68	128,8	-56,12	28,04	-21,1	93,79	35,01	0,00
Mar	83,02	99,28	-16,26	23,83	-4,21	87,22	12,06	0,00
Abr	14,8	59,8	-45	15,19	-8,64	23,43	36,37	0,00

P75 corresponde à precipitação provável mensal associada à probabilidade de excedência de 75% (mm); P − ETc representa o saldo hídrico mensal considerando a demanda da cultura; ARM é o armazenamento de água no solo (mm), limitado à capacidade de água disponível (CAD = 100 mm); ALT corresponde à variação mensal do armazenamento de água no solo (mm); ETR é a evapotranspiração real (mm); DEF é a deficiência hídrica mensal (mm); EXC é o excedente hídrico mensal (mm).

A Tabela 2 evidencia redução do armazenamento de água no solo (ARM) e ocorrência de deficiência hídrica (DEF) principalmente nos meses de transição (outubro, janeiro, fevereiro, março e abril), indicando que a distribuição intraestacional das chuvas, mesmo sob garantia de 75%, não assegura suprimento hídrico contínuo ao longo do ciclo. Esse comportamento é coerente com discussões recentes que ressaltam que a variabilidade intraestacional e a recorrência de veranicos influenciam o risco agrícola mais fortemente do que totais sazonais isolados (STAGGE et al., 2015; IPCC, 2021).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

4.4 Síntese aplicada ao planejamento da irrigação

Com base na deficiência hídrica mensal obtida no balanço hídrico, estimou-se a necessidade de irrigação suplementar como a própria DEF do cenário P75. A síntese do planejamento hídrico (P75, ETP, ETc e irrigação suplementar) está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Síntese do planejamento hídrico no cenário P75 (precipitação provável, evapotranspiração da cultura e irrigação suplementar) para Arinos - MG.

Mês	P75 (mm)	ETP (mm)	ETc (mm)	Irrigação (mm)
Outubro	18,29	148,10	59,24	40,78
Novembro	141,92	117,60	88,20	0,00
Dezembro	145,99	114,10	119,8	0,00
Janeiro	83,11	114,90	132,14	17,93
Fevereiro	72,68	112,00	128,80	35,01
Março	83,02	124,10	99,28	12,06
Abril	14,80	119,60	59,80	36,37
Total				142,15

P75 corresponde à precipitação provável mensal associada à probabilidade de excedência de 75% (mm); ETP é a evapotranspiração potencial mensal estimada pelo método de Thornthwaite (mm); ETc é a evapotranspiração da cultura da soja (mm), obtida pela relação ETc = ETo × Kc; Irrigação corresponde à lâmina mensal de irrigação suplementar estimada a partir da deficiência hídrica calculada no balanço hídrico climatológico.

A lâmina acumulada de irrigação suplementar no período outubro–abril foi de aproximadamente 142 mm, com maior contribuição nos meses de outubro, fevereiro e abril, evidenciando maior risco hídrico nas transições entre estação chuvosa e seca. A distribuição mensal da irrigação suplementar é apresentada na Figura 3.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

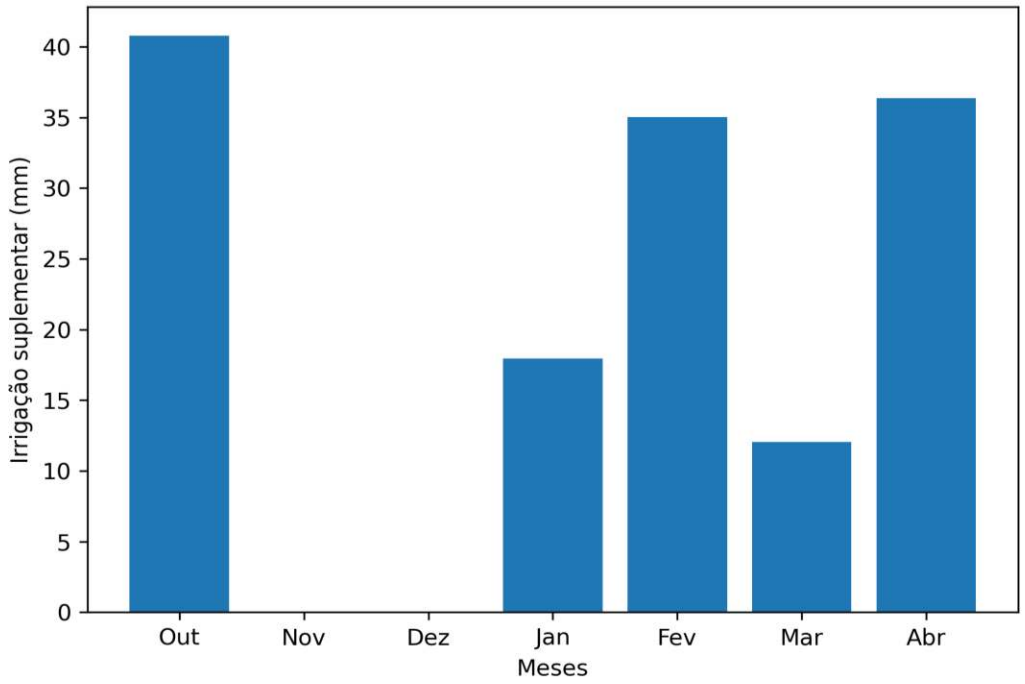

Figura 3 – Necessidade mensal de irrigação suplementar da soja no cenário de precipitação provável P75 para Arinos–MG.

Esses resultados reforçam que déficits hídricos podem ocorrer em momentos críticos do ciclo da soja e comprometer o rendimento quando não mitigados por suplementação hídrica (DOORENBOS; KASSAM, 1979; ALLEN et al., 1998). Além disso, evidências recentes apontam que alterações na distribuição temporal da precipitação e na ocorrência de extremos têm afetado padrões de risco hidrológico e agrícola, o que reforça a necessidade de abordagens probabilísticas e de gestão adaptativa no planejamento da irrigação (BLÖSCHL et al., 2017; IPCC, 2021).

5. Conclusões

A distribuição Gama mostrou-se adequada para estimar a precipitação provável mensal em Arinos–MG, permitindo a definição de cenários com base na probabilidade de excedência.

No cenário P75 (garantia de 75%), verificou-se que a precipitação provável

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

não supre integralmente a demanda hídrica da soja ao longo do ciclo produtivo. O balanço hídrico climatológico indicou ocorrência de deficiência hídrica ao longo do ciclo produtivo, com maior magnitude nos meses de outubro, fevereiro e abril, mesmo sob condição probabilisticamente favorável.

A lâmina acumulada de irrigação suplementar estimada para o período outubro–abril foi de aproximadamente 142 mm, evidenciando a necessidade de suplementação hídrica para reduzir o risco de estresse em fases críticas da cultura.

A integração entre modelagem probabilística da precipitação, balanço hídrico e estimativa da evapotranspiração da cultura constitui abordagem tecnicamente consistente para o planejamento da irrigação suplementar em regiões de clima sazonal.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio de bolsas de iniciação científica concedidas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Não houve financiamento por meio de programas específicos; no entanto, as atividades do projeto foram viabilizadas com recursos institucionais fornecidos pela instituição de origem (IFNMG).

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Coeficientes técnicos de uso da água para a agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_coeficientes_agricultura_irrigada_vf.pdf.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

ANDRADE, C. L. T. et al. **Irrigação: dos fundamentos ao manejo de sistemas**. Brasília: Embrapa, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

publicacoes/-/publicacao/1133148/irrigacao-dos-fundamentos-ao-manejo-de-sistemas

ASSIS, J. O. M.; MENEZES, A. F.; SOUZA, W. M.; SOBRAL, M. C. M. Methods to analyze spatio-temporal rainfall variability: application to the Pajeú river basin, Pernambuco. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, 2021. DOI: 10.5327/Z21769478866.

BARBOSA, A. H. V. D. S. et al. Irrigação por pivô central no Noroeste de Minas Gerais. Revista Científica Faculdade Atenas, v. 17, n. 1, 2024. Disponível em: https://www.atenas.edu.br/uniatenas/assets/files/magazines/1/IRRIGACAO_POR_PIV%C3%94_CENTRAL__vantagens_e_desvantagens_deste_sistema_no_Noroeste_de_Minas_Gerais.pdf

BEZERRA, J. P. Modelagem hidrológica distribuída e seu uso no monitoramento de secas e avaliação dos impactos das mudanças climáticas nas vazões afluentes a reservatórios. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/78941/5/2024_dis_jpbezerra.pdf

BLAIN, G. C.; SOBIERAJSKI, G. R.; MARTINS, L. L.; SPARKS, A. H. The SPIChanges R-package: improving the interpretation of the standardized precipitation index under changing climate conditions. Environmental Modelling & Software, v. 192, p. 106573, 2025. DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106573.

BLÖSCHL, Günter; HALL, Julia; VIGLIONE, Alberto; PERDIGÃO, Rui A. P.; PARASIEGLER, Dieter; MERZ, Bruno; LUN, Daniel; ARHEIMER, Berit; ATKINSON, S.; BAZILE, E.; et al. Changing climate shifts timing of European floods. Science, v. 357, n. 6351, p. 588–590, 2017. DOI: 10.1126/science.aan2506.

BORGES, A. M. et al. Precipitação provável decendial e lâminas suplementares de irrigação para Unaí-MG. 2025. In: Perspectivas futuras para as Ciências Agrárias: desafios e inovações 2. DOI: 10.22533/at.ed.1072511025.

CHAVAN, S. R.; SRINIVAS, V. V. Probable maximum precipitation estimation for catchments in Mahanadi river basin. Aquatic Procedia, v. 4, p. 892–899, 2015. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.112.

COLLINS, B. et al. Evaluating the impact of weather forecasts on productivity and environmental footprint of irrigated maize production systems. Science of the Total Environment, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176368.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33). DOI: 10.1016/B978-0-08-025675-7.50021-2

FERNANDES, D. S. et al. **Índices para a quantificação da seca**. Documentos 244. Brasília: Embrapa, 2009. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/663874

FERRARINI, A. S. F. A agricultura irrigada no Paraná: expansão de áreas e uso de recursos hídricos. Revista Paranaense de Desenvolvimento, v. 43, n. 142, p. 41-59, 2022. Disponível em: https://ipardes.emnuvens.com.br/revistaparanaense/article/view/1221/1297

FERREIRA, M. L.; ANDRADE, A. C. F.; ANDRADE, A. M. Análise dos recursos hídricos mediante a alta demanda da irrigação via pivô central no NMG, Brasil. 2025. Disponível em: https://proceedings.science/sbsr-2025/trabalhos/analise-dos-recursos-hidricos-mediante-a-alta-demanda-da-irrigacao-via-pivo-cent?lang=pt-br

FERREIRA, M. L.; TORMEN, G. P.; ANDRADE, A. M. Análise hidroclimática das variações meteorológicas regionais e a expansão da irrigação no Noroeste de Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA (CONBEA), 53., 2024. Anais... 2024. Disponível em: https://conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2024/anais-2024/geomatica-na-agricultura-geo-3/4130-analise-hidroclimatica-das-variacoes-meteorologicas-regionais-e-a-expansao-da-irrigacao-no-noroeste-de-minas-gerais-brasil/file

FERREIRA, Y. B. Variabilidade pluviométrica e do balanço hídrico no sistema agropecuário do núcleo de desertificação do Médio Jaguaribe-CE. 2025. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/83383/3/2025_tese_ybferreira.pdf

FILHO, D. F. F.; LIRA, B. R. P.; CRISPIM, D. L.; PESSOA, F. C. L.; FERNANDES, L. L. Análise pluviométrica no estado do Pará: comparação entre dados obtidos de estações pluviométricas e do satélite GPCC. Revista Brasileira de Climatologia, 2020. DOI: 10.5380/abclima.v26i0.67914.

FRANCO, C. S. et al. Distribuição de probabilidades para precipitação máxima diária na Bacia do Rio Verde, MG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

Ambiental, v. 18, n. 7, 2014. DOI: 10.1590/S1415-43662014000700010.

GOMIDE, R. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P. Agrometeorologia e otimização do uso da água na irrigação. Informe Agropecuário, v. 29, n. 246, p. 72-85, 2008. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/474146/agrometeorologia-e-otimizacao-do-uso-da-agua-na-irrigacao

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

KUROKI, L. Y.; CALADO, G. G.; SOUSA, A. R.; CALADO, B. N.; CARDOSO, A.; BRAMBILA, M. C. V. A vulnerabilidade social da região Sudeste do Brasil frente à variabilidade climática. Revista Brasileira de Climatologia, v. 31, 2022. DOI: 10.55761/abclima.v31i18.15903.

MANCINI, A. L.; VICTÓRIA, D. C. Estudo da função gama aplicada à precipitação diária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 59, Embrapa, 2023. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1163381/1/Boletim-59-.pdf

MINAS GERAIS (Estado). Balanço do agronegócio de Minas Gerais 2024. 2025. Disponível em: https://www.mg.gov.br/system/files/media/agricultura/documento_detalhado/2025/publicacoes-de-agrodados/balanco-do-agronegocio-de-minas-gerais-2024.pdf

MOURA, F. P. **Gênese e variabilidade das chuvas na região Norte-Noroeste do estado de Minas Gerais**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/items/67e69cf5-f767-49de-8ea8-e4bc68c315ff

MURTA, R. M.; TEODORO, S. M.; BONOMO, P.; CHAVES, M. A. Precipitação pluvial mensal em níveis de probabilidade pela distribuição gama. Ciência e Agrotecnologia, v. 29, n. 5, p. 988–994, 2005. DOI: 10.1590/S1413-70542005000500011.

NETO, V. L. S.; SOUZA, L. B.; VIOLA, M. R.; MORAIS, M. A. V. Equação de chuvas intensas e precipitação máxima provável para a cidade de Goiás-GO, Brasil. Revista Brasileira de Climatologia, v. 30, 2022. DOI:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.15484

OLIVEIRA, D. A. et al. Precipitação pluviométrica provável para o município de Botucatu-SP. Irriga, v. 26, n. 4, p. 853–866, 2021. DOI: 10.15809/irriga.2021v26n4p853-866.

OLIVEIRA, J. A. M.; OLIVEIRA, C. M. M. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Arinos–MG. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 12, n. 6, p. 3021–3027, 2018. DOI: 10.7127/rbai.v12n600901.

PAIVA SOBRINHO, S.; MATOS, V. A. T.; PEREIRA, A. P. M. S.; PIVETTA, F.; SEIXAS, G. B.; CAMPELO JUNIOR, J. H. Determinação dos parâmetros da distribuição gama e média pluviométrica decendial para estações do estado de Mato Grosso. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, n. 2, p. 183-196, 2014. DOI: 10.1590/S0102-77862014000200004.

PASSOS, M. L. V. et al. Estimativa da distribuição da precipitação provável em diferentes níveis de probabilidade. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 11, n. 1, p. 1106–1115, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n100498.

PIZETTA, S. C.; RODRIGUES, R. R.; PEREIRA, G. M.; DÍAZ-PACHECO, F. E.; VIOLA, M. R.; LIMA, L. A. Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. Irriga, v. 22, n. 3, p. 458-468, 2017. DOI: 10.15809/irriga.2017v22n3p458-468.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F.; SILVA, E. M. Metodologia para estimativa da precipitação efetiva em áreas agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003.

RODRIGUES, N. S. Evapotranspiração de referência no estado do Paraná. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2020. Disponível em: https://tede.unioeste.br/handle/tede/5025

SAMPAIO, S. C. et al. Estudo da precipitação efetiva para o município de Lavras, MG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, n. 2, p. 210–213, 2000. DOI: 10.1590/S1415-43662000000200013.

SANTOS, D. C. et al. Precipitation variability and atmospheric teleconnections in Northeast Brazil. Climate Dynamics, v. 61, p. 5035–5048, 2023. DOI:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

10.1007/s00382-023-06838-z.

SANTOS, F. C. V.; UCKER, F. E.; CASAROLI, D.; CORRECHEL, V.; FIGUEIREDO, R. S. Estimativa da probabilidade de ocorrência de precipitação em Goiânia, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015. 2015. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/4/PAP020342.pdf

SANTOS, R. S.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; OLIVEIRA, R. A.; JUSTINO, F. B. Avaliação da relação seca/produtividade agrícola em cenário de mudanças climáticas. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 26, n. 2, p. 313–321, 2011. DOI: 10.1590/S0102-77862011000200014.

SILVA, A. A. F.; JARDIM, C. H. Variabilidade espacial do clima no estado de Minas Gerais: uma proposta de síntese. Revista Brasileira de Climatologia, v. 36, 2025. DOI: 10.55761/abclima.v36i21.18386.

SOUSSI, A.; ZERO, E.; SACILE, R.; TRINCHERO, D.; FOSSA, M. Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review. Sensors, v. 24, p. 2647, 2024. DOI: 10.3390/s24082647.

STAGGE, J. H.; ROSSI, M. W.; STEPHENSON, D. B.; TALLAKSEN, L. M. Candidate distributions for climatological drought indices. International Journal of Climatology, v. 35, p. 4027–4040, 2015. DOI: 10.1002/joc.4267.

TEIXEIRA, M. B. et al. Balanço hídrico climatológico e gestão dos recursos hídricos do bioma Cerrado. Irriga, v. 28, n. 3, p. 545–553, 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n3p545-553.

THOM, H. C. S. A note on the gamma distribution. Monthly Weather Review, v. 86, p. 117–122, 1958.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, v. 38, p. 55–94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology, v. 8, n. 1, 1955.

WANG, M.; YAN, B.; ZHANG, Y.; ZHANG, L.; WANG, P.; HUANG, J.; SHAN, W.; LIU, H.; WANG, C.; WEN, Y. Optimizing precipitation forecasting and agricultural

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 27/02/2026
Vol: 13.01
DOI: 10.66104/5vwaq915
Pages: 1-22

water resource allocation using the Gaussian-Stacked-LSTM model. Atmosphere, v. 15, p. 1308, 2024. DOI: 10.3390/atmos15111308.

ZHANG, S.; REN, G.; ZHAN, Y. et al. Extreme precipitation changes over the Yangtze River Basin in 1901–2020. Climate Research, v. 90, p. 59-72, 2023. DOI: https://doi.org/10.3354/cr01714.

ZHANG, W.; WANG, B.; LEE, J. Y. Tropical origins of the record-breaking 2020 summer rainfall in East Asia. Scientific Reports, v. 12, p. 5468, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-09297-4.