

ANÁLISIS FUZZY DE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE SOMETIDA A LÁMINAS DE RIEGO Y DOSIS DE FERTILIZANTES

Maria Eduarda Fernandes Correa¹, Thiago Melo Queiroz², Ulcilea Alves Severino Leal³, Josué Ferreira Silva Junior⁴, Ilca Puertas de Freitas e Silva⁵, Agnaldo José Freitas Leal⁶

RESUMEN: Las matemáticas trabajan con incertidumbres en el proceso de generación de información, a diferencia de la lógica tradicional (clásica) en la que las proposiciones son solo verdaderas (1) o falsas (0). En la lógica *fuzzy*, las proposiciones pueden tener valores intermedios entre 0 y 1, lo que hace que el análisis sea más cercano a la realidad. El objetivo del proyecto fue analizar los efectos de la productividad de forrajes en función de las láminas de riego y las dosis de nitrógeno y potasio utilizando la lógica *fuzzy*. Para determinar el sistema basado en reglas *fuzzy*, se definió un procesador de entrada (fuzzificador) y un procesador de salida (defuzzificador), generando un número real como resultado. Las variables de entrada fueron 100, 300, 500 y 700 kg para dosis combinadas de nitrógeno y potasio, con una relación de uno de nitrógeno por ocho de potasio, y las láminas de riego 0%, 18%, 45%, 77%, 100% y 120% de la evapotranspiración de referencia. La variable de salida fue la productividad de materia seca de dos forrajes (*Panicum maximum* cultivar Tanzania y *Urochloa brizantha* cultivar Xaraés). Para las funciones de pertenencia de las variables de entrada, las dosis de fertilizantes presentaron un grado de pertenencia igual a uno a los conjuntos *fuzzy* B, MB, MA y A, respectivamente. Los mismos procedimientos se adoptaron para las láminas de riego, que también presentaron un grado de pertenencia uno a los conjuntos B1, B2, M1, M2, A1 y A2, respectivamente. El método de inferencia *fuzzy* utilizado fue

¹ Graduanda em agronomia, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Iturama, Minas Gerais, d202210795@uftm.edu.br

² Agrônomo, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Iturama, Minas Gerais, d201910263@uftm.edu.com

³ Prof. Doutora em Matemática Aplicada, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Iturama, Minas Gerais, ulcilea.leal@uftm.edu.br

⁴ Prof. Doutor em Irrigação e Drenagem, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Iturama, Minas Gerais, josue.junior@uftm.edu.br

⁵ Prof. Doutora em Agricultura, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Iturama, Minas Gerais, ilca.silva@uftm.edu.br

⁶ Prof. Doutor em Produção Vegetal, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Iturama, Minas Gerais, aguinaldo.leal@uftm.edu.br

el método de Mamdani y el centro de gravedad como método de defuzzificación. Para la manipulación de los datos se utilizaron hojas de cálculo y el proceso de modelado fuzzy se implementó en la función *fuzzy* del *toolboxfuzzylogic* de Matlab. Al utilizar la lógica *fuzzy*, fue posible detallar los efectos de las láminas de riego y las dosis de fertilizantes influyendo directamente en la productividad de los forrajes.

PALABRAS CLAVE: fuzzificación, pasto, evapotranspiración.

FUZZY ANALYSIS OF FORAGE PRODUCTION SUBJECTED TO IRRIGATION DEPTHS AND FERTILIZER DOSES

ABSTRACT: Mathematics deals with uncertainties in the information generation process, unlike traditional (classical) logic where propositions are only true (1) or false (0). In fuzzy logic, propositions can have intermediate values between 0 and 1, making the analysis closer to reality. The objective of the project was to analyze the effects of forage productivity as a function of irrigation depths and nitrogen and potassium doses using fuzzy logic. To determine the rule-based fuzzy system, an input processor (fuzzifier) and an output processor (defuzzifier) were defined, generating a real number as a result. The input variables were 100, 300, 500, and 700 kg for combined doses of nitrogen and potassium, with a ratio of one part nitrogen to eight parts potassium, and irrigation depths of 0%, 18%, 45%, 77%, 100%, and 120% of the reference evapotranspiration. The output variable was the dry matter productivity of two forage species (*Panicum maximum* cultivar Tanzania and *Urochloa brizantha* cultivar Xaraés). For the membership functions of the input variables, the fertilizer doses had a membership degree of one to the fuzzy sets B, MB, MA, and A, respectively. The same procedures were adopted for the irrigation depths, which also had a membership degree of one to the sets B1, B2, M1, M2, A1, and A2, respectively. The fuzzy inference method used was the Mamdani method, and the center of gravity was used as the defuzzification method. Spreadsheets were used for data manipulation, and the fuzzy modeling process was implemented using the fuzzy function in the fuzzy logic toolbox of Matlab. By using fuzzy logic, it was possible to detail the effects of irrigation depths and fertilizer doses directly influencing forage productivity.

KEYWORDS: fuzzification, pasture, evapotranspiration.

INTRODUCCIÓN

La región del Pontal do Triângulo Mineiro desempeña un papel significativo en las actividades económicas del estado de Minas Gerais, destacándose, especialmente, por la bovinocultura. La selección de forrajes adecuados, que presenten fácil manejo, elevado rendimiento de materia verde y materia seca es esencial para la maximización de la productividad. Entre los factores determinantes para el desempeño de los pastizales, el riego y la fertilización ejercen una influencia directa en la calidad de la alimentación animal. Ante esto, se vuelve imprescindible la aplicación de técnicas analíticas que permitan describir, de forma precisa y eficiente, los procesos involucrados. Aunque los métodos estadísticos tradicionales son ampliamente empleados en estos análisis, enfoques matemáticos más recientes, como la lógica *fuzzy*, ofrecen alternativas robustas para el tratamiento de los datos. La lógica *fuzzy* se distingue por considerar la totalidad del conjunto de datos disponibles, en contraste con la estadística clásica, que se limita a la evaluación de las dosis específicas probadas en el experimento. Este diferencial permite una interpretación más amplia y detallada de los resultados, contribuyendo a decisiones más asertivas en el manejo de los pastizales.

El presente estudio tuvo como objetivo analizar los efectos de la productividad de los forrajes *Panicum maximum* cv. Tanzania y *Urochloa brizantha* cv. Xaraés en función de las dosis de nitrógeno (N) y potasio (K_2O), bajo distintos regímenes de riego, utilizando la lógica *fuzzy* como herramienta analítica. Este enfoque permitió una evaluación más amplia de los datos experimentales, considerando las matices y variabilidades inherentes al sistema productivo, proporcionando, así, una interpretación más precisa de los impactos de los factores estudiados sobre el desempeño de los pastizales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizó un levantamiento teórico exhaustivo sobre la producción de forrajes, considerando diferentes regímenes de riego y/o dosis de fertilizantes nitrogenados y potásicos, alineado al alcance del presente proyecto. Este fundamento teórico proporcionó una comprensión profunda de los factores que influyen en la productividad de los pastizales y fundamentó la selección de un estudio de caso adecuado para la

aplicación del modelado *fuzzy*. En este contexto, se eligió el artículo científico de Oliveira (2007), el cual ofreció subsidios metodológicos pertinentes para la implementación de la lógica *fuzzy* en el análisis de los datos experimentales.

Para la construcción del Sistema Basado en Reglas *Fuzzy* (SBRF), se definieron los principales componentes necesarios para el procesamiento de los datos: un procesador de entrada (fuzzificador), responsable de la conversión de los datos numéricos en variables lingüísticas; un conjunto de reglas lingüísticas que componen el método de inferencia *fuzzy*; y un procesador de salida (defuzzificador), que convierte el resultado del sistema en un valor numérico real.

En esta etapa inicial, el problema fue cuidadosamente analizado, permitiendo la transformación de los datos de entrada en variables lingüísticas adecuadas al contexto del estudio. Paralelamente, se determinaron las funciones de pertenencia correspondientes, fundamentales para la interpretación y el procesamiento de los datos dentro del entorno *fuzzy*, garantizando un modelado más flexible y cercano a la realidad observada.

El número de reglas que componen la base de reglas del sistema se determinó mediante la combinación entre los conjuntos *fuzzy* asociados a las variables de entrada, siguiendo la metodología propuesta por Gabriel (2008), Putti (2015) y Filho et al. (2012).

Así, como los datos obtenidos en la literatura, se aplicó el método de inferencia *fuzzy*, en el que las variables de entrada del SBRF fueron 100, 300, 500 y 700 kg ha⁻¹, para dosis combinadas de Nitrógeno y Potasio, en la relación 1 N : 0,8 K₂O, y los regímenes hídricos se basaron en la evapotranspiración del cultivo (ETc), siendo la reposición de agua equivalente a 0, 18, 45, 77, 100 y 120% ETc. Para la variable de salida, se definió la productividad de materia seca, en t ha⁻¹, del *Panicum maximum* cv. Tanzania y de la *Uroclhoabrizantha* cv. Xaraés.

La definición de las funciones de pertenencia para las variables de entrada se basó en los valores 100, 300, 500 y 700 kg ha⁻¹, que presentan un grado de pertenencia igual a 1 a los conjuntos *fuzzy* bajo (B), medio bajo (MB), medio alto (MA) y alto (A), respectivamente. El mismo procedimiento se adoptó para los regímenes hídricos (0, 18, 45, 77, 100 y 120% de la ETc), que también presentaron un grado de pertenencia igual a 1 a los conjuntos bajo 1 (B1), bajo 2 (B2), medio 1 (M1), medio 2 (M2), alto 1 (A1) y alto (A2), respectivamente (Tabla 1).

Tabla 1. Definición de las funciones de pertenencia para las dosis combinadas de Nitrógeno y Potasio, en la relación 1 N : 0,8 K₂O, y régimen hídrico

Conjunto <i>fuzzy</i> (Dosis)	Tipo	Delimitadores
B	Triangular	[99, 100, 300]
MB	Triangular	[100, 300, 500]
MA	Triangular	[300, 500, 700]
A	Triangular	[500, 700, 701]
Conjunto <i>fuzzy</i> (Régimen Hídrico)	Tipo	Delimitadores
B1	Triangular	[-1, 0, 18]
B2	Triangular	[0, 18, 45]
M1	Triangular	[18, 45, 77]
M2	Triangular	[45, 77, 100]
A1	Triangular	[77, 100, 120]
A2	Triangular	[100, 120, 121]
Delimitadores: 24 e K (%): 4,35		

Para el cálculo de los delimitadores se definieron 24 conjuntos, resultantes de la multiplicación de los conjuntos *fuzzy* de las variables de entrada (4 dosis de fertilización x 6 regímenes hídricos), posteriormente se definieron como percentiles, correspondiendo a 4,35% y la amplitud, para las dos forrajeras, se obtuvo mediante la resta entre el mayor y el menor valor de la productividad (Tabla 1), siendo, respectivamente, 11,076 y 6,583 t ha⁻¹ para *Panicum maximum* cv. Tanzania y *Urochloa brizantha* cv. Xaraés.

El método de inferencia *fuzzy* adoptado en este estudio fue el método de Mamdani, ampliamente utilizado en sistemas de control debido a su capacidad para manejar información imprecisa y subjetiva. Este método se basa en la regla de composición máximo-mínimo, resultando en un subconjunto *fuzzy* como salida del sistema. Para la conversión de esta salida en un valor numérico preciso (*crisp*), se aplicó el método del centro de gravedad (o *centroid*), técnica reconocida por su eficacia en generar resultados representativos del comportamiento del sistema.

La manipulación de los datos experimentales se realizó mediante hojas de cálculo, proporcionando organización y facilidad en el tratamiento de la información. El proceso de modelado *fuzzy* se implementó utilizando la función *fuzzy* de la *FuzzyLogicToolbox* del software *Matlab*® (*MathWorks*®), herramienta que ofrece un

entorno robusto para el desarrollo y análisis de sistemas basados en lógica *fuzzy*, permitiendo la creación de modelos eficientes y ajustados a los datos experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de la lógica *fuzzy* permitió obtener resultados consistentes y comparables a los obtenidos mediante los análisis tradicionales realizados por Oliveira (2007). Sin embargo, se destacó por proporcionar un mayor refinamiento en los resultados, ampliando la capacidad de interpretación de los datos experimentales. Esta mejora se debe a que, en el contexto del modelado *fuzzy*, no solo se consideran los valores puntuales muestreados, sino todo el intervalo de variación de las variables involucradas en el experimento.

Los análisis realizados evidenciaron que tanto el *Panicum maximum* cv. Tanzania como el *Urochloa brizantha* cv. Xaraés presentaron un aumento en la productividad de materia seca cuando se sometieron a láminas de agua fijas y con variación en las dosis de nitrógeno (N) y potasio (K_2O), en la proporción de 1 N : 0,8 K_2O . Se observó, además, que al mantener las dosis de N y K_2O constantes, la productividad de materia seca presentó un incremento proporcional al aumento de las láminas de agua aplicadas. Además, los mayores índices de productividad se obtuvieron bajo la combinación de mayores dosis de N y K_2O asociadas a las mayores láminas de agua, evidenciando la sinergia entre la fertilización y el riego en el potencial productivo de las forrajeras evaluadas. Estos resultados resaltan la importancia del manejo adecuado de los recursos hídricos y nutricionales para la maximización del rendimiento de los pastizales.

Como se evidencia en las Figuras 1 y 2, el *Urochloa brizantha* cv. Xaraés presentó un incremento lineal en la productividad de materia seca en función del aumento de las láminas de agua aplicadas. En contraste, el *Panicum maximum* cv. Tanzania demostró un comportamiento parabólico, caracterizado por una mayor amplitud de variación de la productividad en respuesta a los cambios en las láminas de agua, especialmente cuando se sometió a las dosis máximas de nitrógeno (N) y potasio (K_2O).

La interacción entre las dosis de fertilización y los regímenes de riego sobre la productividad se exploró mediante representaciones gráficas tridimensionales y mapas de contorno de las variables de salida del sistema. Estas herramientas permitieron una visualización detallada de los efectos combinados de los factores estudiados, facilitando la identificación de patrones y tendencias en los datos. Además, estas representaciones

permitieron el desarrollo de modelos matemáticos capaces de ajustar con precisión los resultados experimentales, ofreciendo soporte para la toma de decisiones estratégicas en el manejo de pastizales.

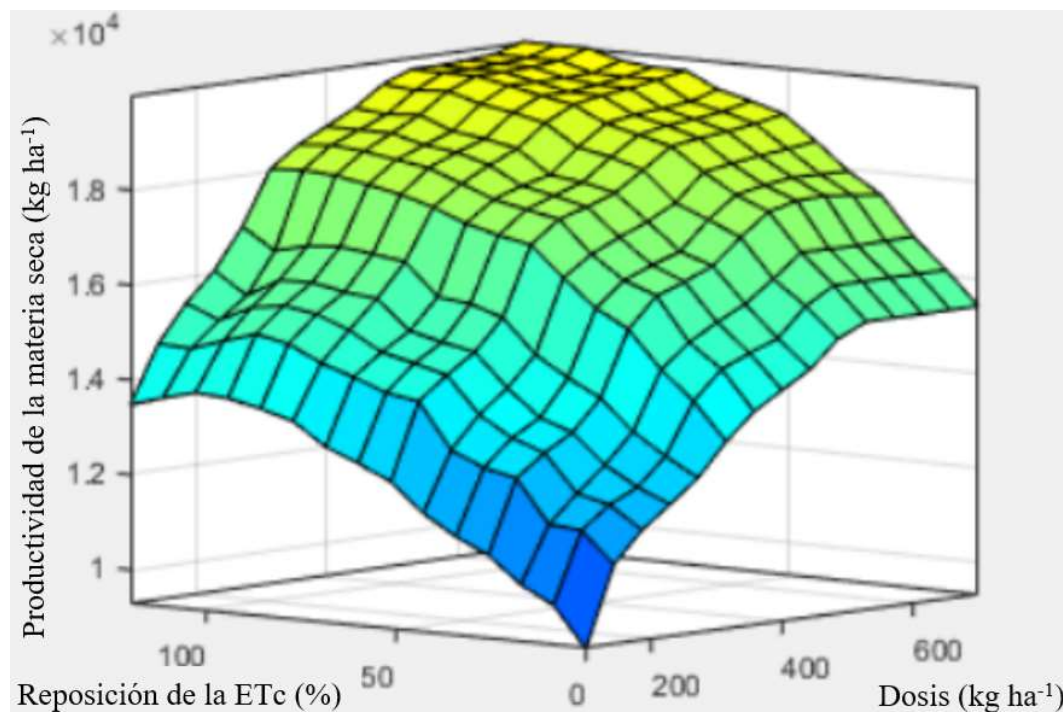


Figura 1. Productividad de materia seca, en kg ha⁻¹, para *Panicum maximum* cv. Tanzania en función de diferentes dosis de fertilización y diferentes regímenes hídricos

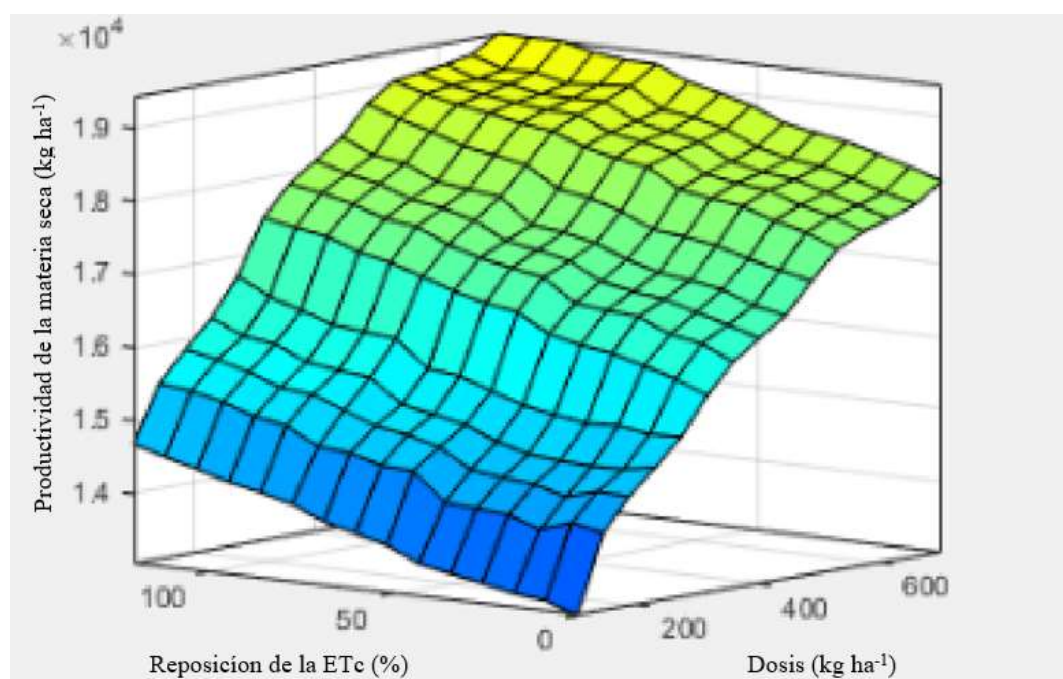


Figura 2. Productividad de materia seca, en kg ha⁻¹, para *Urochloa brizantha* cv. Xaraés en función de diferentes dosis de fertilización y diferentes regímenes hídricos

CONCLUSIONES

La aplicación de la lógica fuzzy permitió un análisis no convencional de la productividad de las forrajeras, proporcionando un enfoque más amplio y flexible en comparación con los métodos tradicionales. Esta metodología evidenció que las dosis de nitrógeno (N) y potasio (K₂O), así como las láminas de riego, ejercen una influencia directa en la productividad de materia seca tanto del *Panicum maximum* cv. Tanzania como del *Urochloa brizantha* cv. Xaraés.

A diferencia de los análisis clásicos, que se limitan a los valores puntuales obtenidos en los experimentos, la lógica fuzzy considera todo el intervalo de variación de las variables involucradas, permitiendo un refinamiento en los resultados y una interpretación más detallada de los efectos de los factores estudiados. Esta característica amplía la comprensión de los patrones de respuesta de las forrajeras a las diferentes condiciones de manejo, ofreciendo bases más sólidas para estrategias de optimización de la productividad en sistemas de producción agropecuaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FILHO, L. R. A. G. et al. Aplicação da lógica fuzzy para avaliação da eficiência e racionalidade de usinas sucroalcooleiras. TC, v. 92, p. 0, 2012.
- GABRIEL, C. P. C. Aplicação da lógica fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2008.
- MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International journal of man-machine studies, Elsevier, v. 7, n. 1, p. 1–13, 1975.
- OLIVEIRA FILHO, J. da C. Produção de duas gramíneas tropicais submetidas a diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio e potássio no estado do Tocantins. 2007.
- PUTTI, F. F. Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (*lactuca sativa* L.) irrigada com água tratada magneticamente utilizando modelagem fuzzy. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015.