

Productividad hídrica de *Megathyrus maximus* cv. bajo fertirriego en un suelo con pH variable en el Caribe seco colombiano

Water productivity of *Megathyrus maximus* cv. under fertigation in a soil with variable pH in the dry colombian Caribbean

Claudia M. Ipaz-Cuastumal¹  Luis F. Gómez-Ramírez¹  José L. Tauta-Muñoz¹ 

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Motilonia, km 5 vía Becerril, Agustín Codazzi. Palmira Valle, Colombia

Resumen

Los suelos del Cesar presentan altos porcentajes en degradación y una baja capacidad productiva, por lo que para su manejo se hace necesario la implementación de tecnologías como la fertirrigación, con el fin de mejorar la capacidad productiva del suelo de forma sostenible. En esta investigación se evaluó el efecto de la aplicación de fertirriego con pivote central sobre la productividad hídrica (WP) en pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera en un suelo con variaciones de pH bajo las condiciones del Caribe seco colombiano. Se fijaron cinco rangos de pH como tratamientos; cada uno con tres parcelas experimentales. Las variables evaluadas fueron: productividad hídrica (WP), producción de materia seca (MS), forraje verde (MV), porcentaje de materia seca (% MS), altura del tallo, altura de la planta y contenido de macro y microelementos del forraje. En el suelo se determinó la densidad aparente, pH, conductividad eléctrica (CE) e infiltración. La WP fue mayor a 2.83 kg/m³ y la MS superó los 0.72 kg/m² con pH del suelo inferior a 7.8 ($p < 0.05$); a un pH entre 5.5 y 7.8 la asimilación de nitrógeno, potasio y calcio fue mayor ($p < 0.1$), además de observarse un mayor desarrollo de la planta en el suelo con pH entre 5.5 y 6.9 ($p < 0.05$). En relación con las propiedades edáficas, se observó una correlación positiva entre la infiltración y el crecimiento del tallo, y una correlación negativa del crecimiento del tallo frente al pH, la CE y la asimilación de manganeso ($p < 0.1$). En conclusión, la producción de biomasa del pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera es favorable cuando el suelo presenta un pH entre 5.5 y 7.8.

Abstract

The soils of Cesar present high percentages in degradation and a low productive capacity, so for their management it is necessary to implement technologies such as fertigation, in order to improve the productive capacity of the soil in a sustainable way. In this research the effect was evaluated of the application of fertigation with central pivot on Water productivity (WP) of *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera in a soil with pH variations was evaluated under colombian dry Caribbean conditions. Five treatments corresponding to five pH ranges were determined; within each range, three experimental plots were established. The variables evaluated were dry matter production (MS), green forage (MV), dry matter percentage (% MS), stem height, plant height and macro and microelement content of the forage. Of the soil the apparent density, pH, electrical conductivity (EC) and infiltration were determined. The MS and WP were higher when soil pH was lower than 7.8 ($p < 0.05$). Water productivity (WP) was higher 2.83 kg/m³ and dry matter (MS) exceeded 0.72 kg/m² with soil pH less than 7.8; in the pH range between 5.5 and 7.8 the assimilation of nitrogen, potassium and calcium was higher ($p < 0.1$); greater plant development was observed in soil with pH between 5.5 and 6.9 ($p < 0.05$); in relation to edaphic properties, a positive correlation was observed between infiltration and stem growth and a negative correlation of stem growth versus pH, EC and manganese assimilation ($p < 0.1$); biomass production of *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera is favorable when the soil pH is between 5.5 and 7.8.

Keywords:

engineering, Nitrogen assimilation, Edaphic properties, Electric conductivity.

Palabras clave:

Ingeniería, Asimilación de nitrógeno, Propiedades edáficas, Conductividad eléctrica

Cómo citar:

Ipaz-Cuastumal, C.M., Gómez-Ramírez, L.F., Tauta-Muñoz, J.L. Productividad hídrica de *Megathyrus maximus* cv. bajo fertirriego en un suelo con pH variable en el Caribe seco colombiano Ingeniería y Competitividad.2023,25(3) e-21013019. doi: <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i3.13019>.

Recibido: 21-06-23

Aceptado 15-09-23

Correspondencia:

cipaz@agrosavia.co
lfgomez@agrosavia.co
jtauta@agrosavia.co

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses:
Ninguno declarado

OPEN  ACCESS

¿Por qué se realizó el estudio?

Se partió del estado actual de los suelos típicos productores de pasturas en el departamento del Cesar, los cuales presentan degradación y baja capacidad productiva, a causa del inadecuado manejo. Es necesario implementar tecnologías como la fertirrigación bajo un enfoque de uso sostenible de los recursos suelo y agua, para incrementar la producción de biomasa.

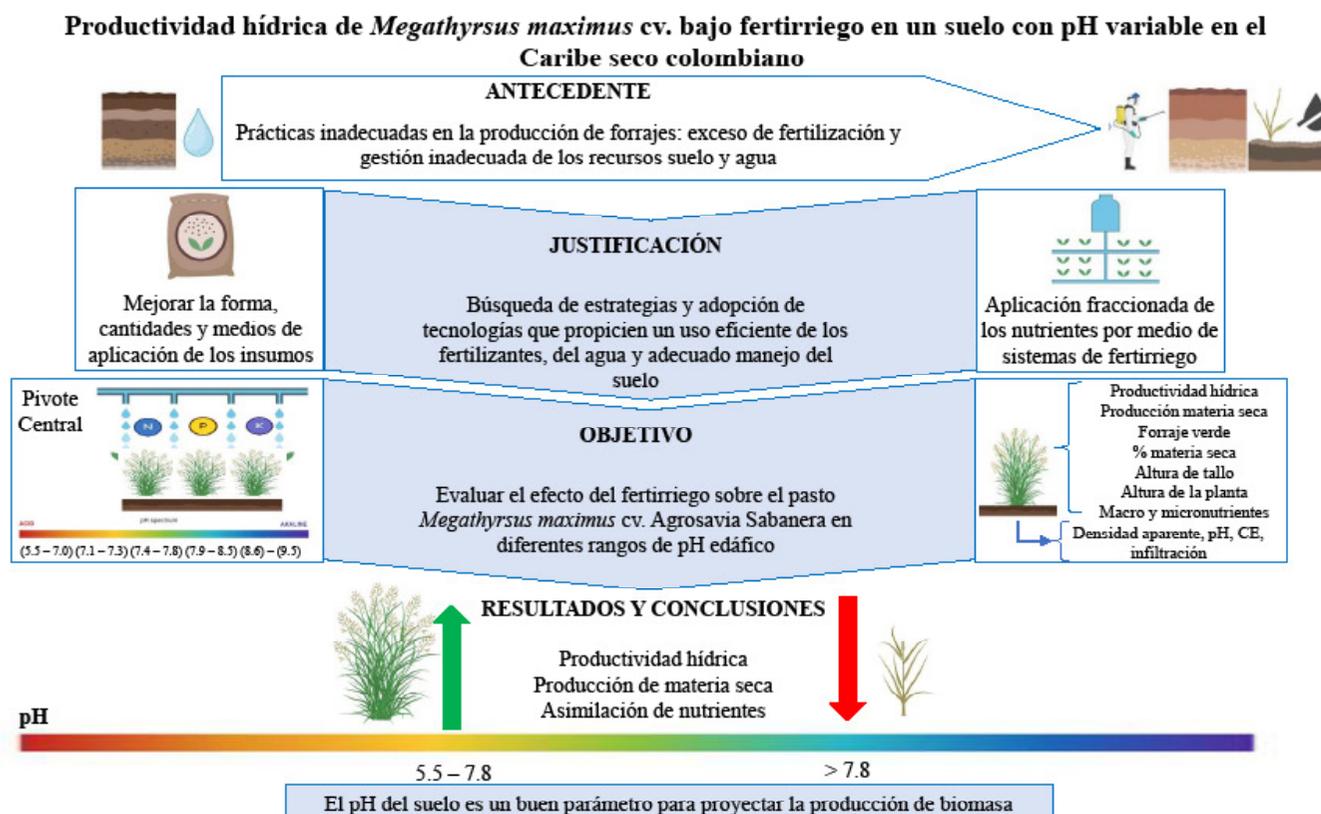
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

El cultivo de pasto *Megathyrsus maximus* cv. Agrosavia Sabanera a pH del suelo inferior a 7.8, la productividad hídrica superó los 2.83 kg/m³, la materia seca superior los 0.72 kg/m² y se presentó mayor asimilación de nitrógeno, potasio y calcio. A un pH entre 5.5 y 6.9 el desarrollo de las plantas fue superior y en suelos con pH superior a 7.8 se limitó el crecimiento.

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados obtenidos en campo demostraron que la adopción de nuevas tecnologías como la fertirrigación en combinación con un amplio conocimiento del suelo en especial el pH que interviene en la asimilación de los nutrientes del suelo favorece el desarrollo de las pasturas. Con los resultados aquí obtenidos es posible estimar producciones para distintos pH del suelo; es importante hacer énfasis en el manejo de acuerdo con la variabilidad en las propiedades del suelo.

Graphical Abstract



Introducción

Las prácticas de fertirriego de los cultivos son comúnmente utilizadas a nivel mundial porque favorecen la disponibilidad de nutrientes en el suelo y aseguran una producción agrícola aceptable (1, 2). “En 2018, el consumo de fertilizantes inorgánicos a nivel mundial fue de aproximadamente 190 millones de toneladas y se proyecta que alcance los 197 millones de toneladas en 2024” (3). En cuanto al recurso hídrico, el 72 % del agua dulce extraída se destina al sector agropecuario, siendo un recurso indispensable en la producción de alimentos (4). Adicionalmente, el consumo de agua se evalúa con indicadores de sostenibilidad como lo son la huella y la productividad hídrica, las cuales contemplan el agua verde, azul y gris (5).

A pesar de su importancia, en Colombia existe un gran desconocimiento del uso de estos recursos por parte de los agricultores y los técnicos responsables de la fertilidad y riego de los cultivos, lo que en muchos casos lleva a la implementación de malas prácticas de manejo, que derivan en el uso excesivo de fertilizantes y una gestión inadecuada del recurso hídrico. Con esto, se provocan impactos negativos a nivel ambiental y económico (6), indicando que “la degradación del suelo puede ser física, química o biológica e implica la disminución o pérdida de las funciones ecosistémicas o ambientales” (7, 8). Esta problemática es crítica en el Caribe seco colombiano, específicamente en el departamento del Cesar, donde existe un régimen climático deficitario con un acelerado proceso de desertificación generado por la salinización debido al uso insostenible del suelo, especialmente por la fertilización excesiva, la incontrolada irrigación con aguas salinas, las malas prácticas mineras, entre otros (9). Sumado a ello, esta región presenta una susceptibilidad territorial del 47.8 % a estrés hídrico por déficit o exceso (10), condiciones que generan un impacto directo sobre la producción agropecuaria como la ganadería, siendo este un sector de importancia regional.

A raíz de esta problemática y con el propósito de mejorar la forma, las cantidades y los medios de aplicación de estos insumos para que las plantas puedan aprovecharlos por medio del uso eficiente del recurso hídrico y del suelo, la búsqueda de estrategias y tecnologías que permitan una eficiencia en el uso la utilización de los fertilizantes y del agua es indispensable. (11, 12). La fertirrigación es una técnica agrícola mediante la cual se realiza la aplicación de los nutrientes que requiere la planta por medio del sistema de riego, el cual se ajusta en función de las necesidades del cultivo, la época del año, la etapa fenológica y el objetivo de producción; la técnica incrementa la eficiencia de uso de los fertilizantes y del agua, disminuyendo la aplicación de éstos e incrementando la rentabilidad (13, 14). Uno de los beneficios más importantes de la fertirrigación es el control sobre el tiempo de aplicación, el cual permite dividir el aporte de nutrientes para adaptarse mejor a los períodos o requerimientos de acuerdo con las fases fenológicas y una rápida absorción (15). Por lo tanto, al planificar la cantidad y el tiempo de fertirrigación, es importante tener en cuenta: las necesidades totales de nutrientes de los cultivos, el momento de la necesidad, la nutrición estimada proporcionada por el suelo y el potencial de lixiviación (16). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de fertirriego con pivote central sobre la producción de biomasa y productividad hídrica (WP) en pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera en un suelo con variaciones de pH, bajo condiciones del Caribe seco colombiano.

Metodología

Localización

La evaluación se desarrolló en el Centro de Investigación Motilonia de la Corporación Colombiana de investigación agropecuaria AGROSAVIA, ubicado a 10°00'6.62" N y 73°14'57.60" O, a una altitud de 100 msnm, en el municipio de Agustín Codazzi, Cesar.

Descripción y caracterización del suelo

El suelo en el área de estudio clasificado como Typic Haplustepts francoso isohipertérmico micáceo cuarcítico 0 - 1 %, fue caracterizado teniendo en cuenta sus propiedades hidrofísicas y la composición de la fase intercambiable (17). De acuerdo con las metodologías descritas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC (18), las propiedades hidrofísicas determinadas fueron: textura por el método de Bouyucos (18), infiltración básica por el método de anillos infiltrómetros (18), densidad real por el método del picnómetro (18), estabilidad de agregados por el método de Yoder (diámetro medio ponderado) (18), porosidad total y densidad aparente por cilindro de volumen conocido (18).

Clima y manejo del riego

Se estimaron las láminas brutas de riego y la precipitación con el programa Cropwat versión 8.0 (propuesto por la FAO en el año 2010). Los parámetros de entrada fueron atributos del suelo tales como textura, humedad a capacidad de campo, punto de marchitez permanente y profundidad máxima. En cuanto al cultivo, se consideró un coeficiente de cultivo K_c de 0.9 en la etapa inicial y de 0.95 en la etapa de desarrollo. En el componente clima, se tuvieron en cuenta los promedios de datos históricos de 40 años de temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento, brillo solar y precipitación, reportados por la estación climatológica del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) ubicada en el Centro de Investigación Motilonia.

Plan de fertilización y calibración del sistema de fertirriego

El plan nutricional de la pastura para el segundo corte se desarrolló teniendo en cuenta el resultado de los análisis químicos de la fase intercambiable del suelo y los requerimientos nutricionales del cultivo. De acuerdo con las características del suelo, se seleccionó el tipo de fertilizantes a utilizar teniendo en cuenta su eficiencia de asimilación y la densidad aparente del suelo, a una profundidad efectiva de 0.2 m, así como también la proyección de producción de biomasa. Para la caracterización química del suelo se tomaron dos muestras compuestas del área de estudio; sin embargo, debido a su mayor representatividad, sólo la primera muestra fue utilizada para la generación del plan de fertilización, considerando los requerimientos nutricionales para la producción de una tonelada de materia seca del cultivo de acuerdo con Borrero (19). Se proyectó una cosecha de 0.3 kg/m² de forraje seco en cada corte, por lo que se utilizaron en el fertirriego los siguientes fertilizantes comerciales: 0.0075 kg/m² de sulfato de amonio-SAM, 0.0075 kg/m² de cloruro de potasio-KCl, 0.0003 kg/m² de sulfato de hierro y 8×10^{-7} m³/m² de ácido fosfórico, fraccionados en cinco aplicaciones durante 21 días después del corte.

El fertirriego se realizó por medio de un sistema de pivote central eléctrico con tecnología brasileña marca KREBS, con un diseño hidráulico ajustado y adaptado por IRRIPLAST S.A.S., Colombia y AGROSAVIA, con un radio total de 312.55 m, un radio a última torre de 288.59 m, un área de riego de 306.90 m², una lámina de aplicación entre 2.33 y 8.72 mm/día y tiempos de riego entre 6 y 22 h, respectivamente. El sistema es alimentado por dos pozos profundos con caudal disponible de 0.032 m³/s cada uno, cuenta con tubería principal de alta presión con diámetro de 0.1524 m de calibre RDE 41, sin cañón, seis tramos de 48 m y un voladizo de 24 m, con 116 aspersores (I-WOB UP3) distribuidos en toda su longitud, con su respectivo kit de bajantes flexibles con mangueras y reguladores de 68.95 kPa. La automatización del sistema de fertirriego fue controlada por un DREAM2 16 out AC/8 In++ (TALGIL, Israel) y una unidad de control FERMASTER (TALGIL, Israel), realizando la apertura de electroválvulas con antenas RTU G4 4/0, alimentadas por un panel solar.

Efecto del pH del suelo sobre la producción de biomasa de la pastura

El experimento se desarrolló a partir del segundo corte, después del establecimiento del pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera. Teniendo en cuenta la observación en campo del desarrollo diferencial de las plantas respecto la variabilidad espacial del pH edáfico, se optó por cuantificar el efecto sobre la producción de biomasa en cinco rangos de pH identificados en el área de estudio. Los rangos de pH del suelo que se evaluaron correspondieron a: T1 = 5.5 – 7.0, T2 = 7.1 – 7.3, T3 = 7.4 – 7.8, T4 = 7.9 – 8.5 y T5 = 8.6 – 9.5. En cada rango se establecieron tres parcelas experimentales con tres puntos de muestreo bajo un diseño completamente aleatorizado. Las variables de respuesta evaluadas a los 32 días después del corte fueron: producción de biomasa en aforos de 0.5 m, forraje verde (FV), porcentaje de materia seca (MS), altura del tallo, altura de la planta y contenido de macro y microelementos del forraje determinados por digestión con ácido nítrico y peróxido de hidrogeno, y extracción asistida por microondas (20). Se estimó la productividad hídrica (WP) a partir de la relación entre la producción de materia seca y el volumen de agua aportado por la precipitación más el riego. En cada parcela se realizó una caracterización de las propiedades físicas del suelo como densidad aparente por el método del cilindro de volumen conocido (18), velocidad de infiltración por el método descrito por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - USDA (21), y de propiedades químicas como la conductividad eléctrica y el pH, siguiendo la metodología descrita por el USDA (21).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo de las variables y un análisis de varianzas (ANOVA) simple. Previo a esto, se verificó la normalidad y homocedasticidad con las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente (22). Las variables que no cumplieron con el supuesto de normalidad se transformaron con las funciones Log (y), Log10 (y), 1/y ARCOSENO (\sqrt{y}) (23). La comparación de medias se realizó mediante un procedimiento múltiple de diferencia mínima significativa (DMS) con un $p \leq 0.05$ o < 0.1 (22). Para los datos que no presentaron un comportamiento paramétrico, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis y se consideraron significativas con un $p \leq 0.05$ (24). Además, se realizó un análisis de correlación de Pearson para identificar relaciones entre las variables dependiente e independientes que cumplieron con el supuesto de normalidad (22). Finalmente, los análisis estadísticos se realizaron empleando el software estadístico R versión 4.1.2.

Resultados y discusión

Caracterización del suelo

El suelo presentó un contenido de materia orgánica de 3.06 %, conductividad eléctrica de 1.27 dS/m, capacidad de intercambio catiónica de 12.22 m_{eq}/100g y contenido de bases moderado, a excepción del sodio, que presentó valores altos (264 mg/kg). Los elementos menores se encontraron dentro de un rango normal, a excepción del fósforo que mostró valores elevados (126.96 mg/kg) (Tabla 1). El suelo fue moderadamente profundo, con una densidad aparente de entre 1520 y 1660 kg/m³ teniendo en cuenta que, aunque se presentó una textura franca arcillo arenosa, la estabilidad de agregados fue moderada y sin limitación (25), mostrando una porosidad total de 47.53 % para suelos con pH < 7.6 y de 48.87 % para suelos con pH mayor (26), y la velocidad de infiltración fue muy lenta (entre 0.16 y 0.77 mm/h) (27). Se evidenció presencia de raíces vivas de diferente espesor y una frecuente actividad de macrofauna en suelos moderadamente alcalinos y neutros, mientras que para el caso de suelos con pH superior a 7.6 solo se encontraron raíces muy finas y poca actividad de la macrofauna (27) (Tabla 1). En términos generales, el suelo presentó una fertilidad moderada, y teniendo en cuenta sus propiedades hidrofílicas como la infiltración y porosidad, fue necesario su mejora mediante una mínima labranza y aporte de materia orgánica; por otra parte, para su fertilización se contempló la aplicación de macro y microelementos y, teniendo en cuenta sus altas concentraciones de fósforo, se utilizaron fuentes de fertilizantes y enmiendas reguladoras de pH con el fin de hacerlo más fácilmente asimilable por las plantas. Se diferenciaron dos zonas, una primera definida como área de pH alcalino (pH por encima de 7.6), y una segunda área definida como de pH neutro (pH entre 5.9 a 7.6). En el área alcalina, el suelo presentó un porcentaje de sodio intercambiable del 15 % y una CE inferior a 2 dS/m, por lo que se dedujo que se trata de un suelo sódico (28), lo cual es soportado además por la pérdida de estructura y baja velocidad de infiltración en dicha área como puede observarse en la tabla 1. Comúnmente, estas características del suelo se relacionan con aguas que poseen un alto contenido salino en los sistemas de riego, una poca cobertura vegetal, unos bajos porcentajes de materia orgánica y un uso excesivo de fertilizantes (29). Las propiedades del suelo en cortos periodos no presentan cambios significativos sino que se mantienen estables, a menos que se realice una práctica de manejo inadecuada en la labranza o aplicación excesiva de insumos tal como se aprecia en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización química de la fase intercambiable del suelo y propiedades físicas del suelo en el primer horizonte.

	pH	CE	CICE	CO	MO	N total	K	Ca	Mg
		dS/m	m _{eq} /100g	%	%			mg/kg	
Media	7.22	1.27	12.22	1.78	3.06	0.15	118.40	1824.00	198.60
DS	0.47	0.40	3.31	0.73	1.26	0.06	11.87	674.63	14.99
CV	6.54	31.53	27.06	41.01	41.01	40.82	10.02	36.99	7.55
	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	B	P	S	PSI
						mg/kg			%
Media	264.00	50.04	83.66	3.62	3.94	0.62	126.96	36.42	9.65
DS	185.51	16.01	19.98	0.51	0.99	0.06	40.35	15.44	6.36
CV	70.27	31.99	23.88	14.10	25.01	8.92	31.78	42.38	65.93
pH	PPH	Da	LAA a 0.2 m	PT	Ib	DMP	Textura	Desarrollo de raíces	AM
	m	kg/m ³	m	%	mm/h				
<7.6	0-0.58	1660	0.029	47.53	0.77	1.01	F A - F	Presencia de raíces, gruesas, medianas y finas	
>7.6	0-0.68	1520	0.040	48.87	0.16	6.92	F Ar A - Ar	Presencia de raíces muy finas	Poca

Nota: a continuación se presentan las abreviaturas de la tabla 1 y su significado. DS: Desviación estándar, CV: Coeficiente de Variación, pH = potencial hidrogeno, CE: Conductividad Eléctrica, CICE: Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva, CO: Carbono Orgánico, MO: Materia Orgánica, N total = nitrógeno total, K = potasio, Ca = calcio, Mg = magnesio, Na = sodio, Fe = hierro, Mn = manganeso, Cu = cobre, Zn = zinc, Bo = boro, P = fósforo, S = azufre, PSI: Porcentaje de Sodio Intercambiable, PPH: Profundidad del primer horizonte, Da: Densidad Aparente, LAA: Lámina de Agua Aprovechable, PT: Porosidad total, Ib: Infiltración básica, DMP: Diámetro Medio Ponderado, AM: Actividad de la Macrofauna.

Efecto del pH del suelo sobre la producción de biomasa de la pastura y su productividad hídrica

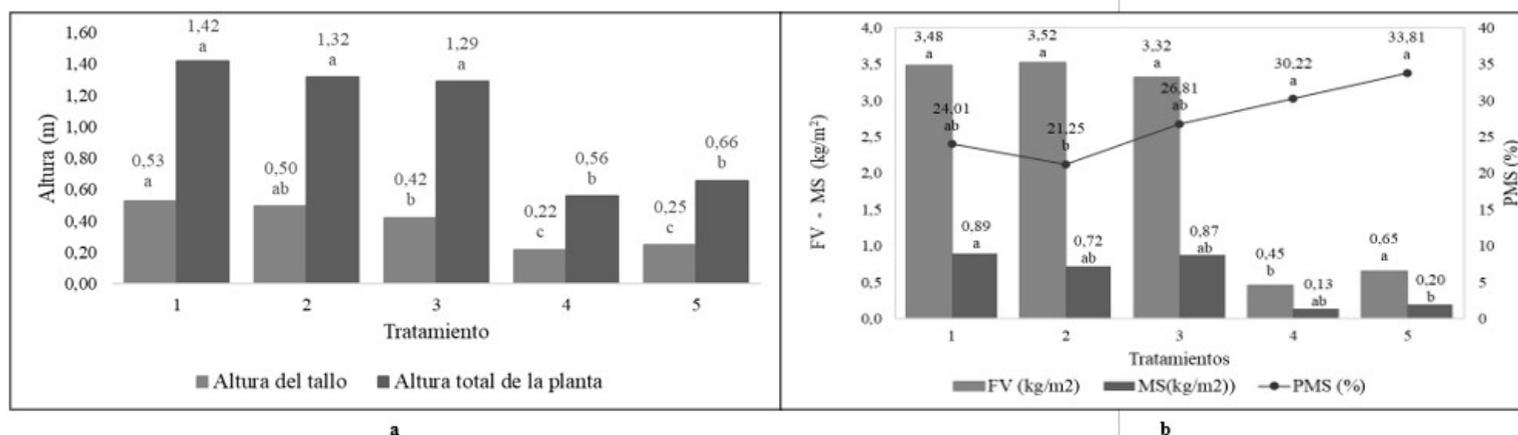
La simulación con el programa Cropwat para el ciclo del cultivo estimó una precipitación equivalente a 233 mm y una lámina bruta de 35 mm; la precipitación real correspondió a 237 mm, por lo que el riego complementario fue exclusivo para realizar cinco fertirriegos en todo el ciclo con una aplicación de 16.3 mm para un total de 253 mm como agua verde y azul, riego que se aplicó de forma homogénea en todo el cultivo. A partir de esta información y de la producción de materia seca se estimó la productividad hídrica (WP). Asimismo, y como se observa en la [tabla 2](#), se encontró que la producción de biomasa y la productividad hídrica se favorecieron a pH < 7.8 ($p < 0.05$), expresada en una mayor producción de materia seca y mayor altura del tallo, destacándose T1, seguido de T2 y T3, con la tendencia a disminuir al incrementar el pH del suelo como se muestra en la [tabla 2](#) y la [figura 1](#). La misma tendencia fue observada en la producción de forraje verde y la altura total de las plantas.

Tabla 2. Comparación de medias de las variables agronómicas y de producción de forraje.

Rango de pH	FV + (kg/m ²)	PMS + (%)	MS + (kg/m ²)	Altura del tallo (m) **	Altura de la planta + (m)	WP de MS (kg/m ³)	
T1	3.48 ± 2.39	24.0 ± 3.6	0.89 ± 0.67	0.53 ± 0.03	a	1.42 ± 0.14	3.53 ± 2.63
T2	3.52 ± 2.27	21.2 ± 2.2	0.72 ± 0.43	0.50 ± 0.07	ab	1.32 ± 0.10	2.83 ± 1.71
T3	3.32 ± 0.66	26.8 ± 4.3	0.87 ± 0.10	0.42 ± 0.05	b	1.29 ± 0.11	3.45 ± 0.40
T4	0.45 ± 0.14	30.2 ± 5.4	0.13 ± 0.01	0.22 ± 0.05	c	0.56 ± 0.11	0.52 ± 0.06
T5	0.65 ± 0.35	33.8 ± 12.6	0.20 ± 0.04	0.25 ± 0.04	c	0.66 ± 0.16	0.77 ± 0.16
Test de comparación de medias	Kruskal-Wallis	Kruskal-Wallis	Kruskal-Wallis	DMS	Kruskal-Wallis	Kruskal-Wallis	
	4 – 2	2 – 4	4 – 1		5 – 1	4 – 1	
	4 – 3	2 – 5	4 – 2		4 – 1	4 – 2	
			4 – 3		4 – 3	4 – 3	
p-valor	0.011*	0.019*	0.011*	0.00004 ***	0.019*		

Nota: a continuación se presentan las abreviaturas de la tabla 2 y su significado. pH = potencial hidrógeno, FV = Forraje verde, PMS = Porcentaje de materia seca, MS = Materia seca, DMS = Diferencia Mínima Significativa, WP = Productividad hídrica, ($p < 0.05$); +: variables no paramétricas, **: a, b y c son altamente significativas.

Figura 1. Efecto de diferentes niveles de pH sobre variables de crecimiento y rendimiento en pasto *Megathyrsus maximus* cv. Agrosavia Sabanera. Altura del tallo y de la planta (a), producción de forraje verde (FV), porcentaje de materia seca (PMS) y materia seca (b) (MS).



La productividad hídrica es mayor cuando la calidad del suelo mejora, mientras que a $\text{pH} > 7.8$ en donde se incrementa el PSI, con una baja asimilación de los nutrientes y con limitaciones del movimiento del agua en el suelo a consecuencia de la presencia del sodio como agente dispersante del suelo, la productividad hídrica es baja; Solano et al. (30) para la misma localidad reportaron para pastos de mayor porte como el king grass morado, king grass verde, elefante y maralfalfa una WP que superó los 6.1 kg/m^3 en ciclos de 70 días. En este trabajo, la WP osciló entre 0.5 y 3.5 kg/m^3 con el cultivar evaluado. La producción de forraje con fertirriego en el mes de abril de 2021 fue superior a 0.72 kg/m^2 en un suelo con pH inferior a 7.8 (T1, T2 y T3), de forma similar la productividad hídrica en dichos tratamientos superó la cifra de 2.8 kg/m^3 de agua aprovechada, superando las producciones reportadas para la época seca y la época lluviosa con fertilización edáfica, correspondientes a 0.12 y 0.41 kg/m^2 , respectivamente por Atencio-Solano et al. en su informe *Gramínea forrajera de alta producción de forraje, excelente calidad nutricional y abundante producción de semilla* (31) De igual manera, estos resultados fueron superiores a los reportados por Cedeño-Aristega et al. (32), quienes en su trabajo titulado *Producción y composición química de megathyrus máximus cultivares tanzania y mombasa bajo condiciones del subtrópico ecuatoriano* obtuvieron rendimientos en *M. maximus* cv. Mombasa de 0.05 kg/m^2 de forraje total después de 45 días de crecimiento en época seca en el subtrópico ecuatoriano en suelos con un pH de 5.8. Estos datos son congruentes con lo reportado por Milera et al. (33), quienes afirman que, aunque su desarrollo es mejor en suelos con buen drenaje, de mediana a alta fertilidad, con pH entre 5 y 8, *M. maximus* presenta un potencial de adaptación en suelos con distinta calidad. Esto a su vez demuestra que la aplicación de fertilizantes a través del sistema de riego (fertirriego) podría estar desempeñando un rol importante en la producción, toda vez que la fertilización y el riego son factores determinantes en el comportamiento de la pastura en ambientes favorables o desfavorables (33, 34, 35).

Efecto del pH sobre la asimilación de nutrientes en el pasto

La asimilación de nutrientes como N, K y Ca fue favorable a $\text{pH} < 7.8$ ($p < 0.1$) tal como se muestra en la tabla 3, lo cual es consistente con lo mencionado por USDA (20), que reporta una mayor disponibilidad de nutrientes a pH cercanos a 6.5. En cuanto al P, se observó una menor asimilación por parte de las plantas en T1 y T5, lo cual se debe a la baja solubilidad de este nutriente en el suelo cuando el pH se aleja de la neutralidad; esta insolubilidad hace que el P se asimile más lentamente y en periodos muy cortos (36, 37), por lo que es recomendable la implementación de estrategias de manejo del suelo

adecuadas para evitar degradación química y favorecer la absorción de estos nutrientes por parte de las plantas (38).

Tabla 3. Contenido de macronutrientes en tejido foliar de pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera al momento de corte.

Tratamiento	N		P		K		Ca		Mg
					%				
1	1.96 ± 0.57	a	0.35 ± 0.01	b	2.95 ± 0.83	a	0.48 ± 0.08	ab	0.27 ± 0.09
2	2.10 ± 0.29	a	0.36 ± 0.04	ab	2.97 ± 0.66	a	0.54 ± 0.07	a	1.31 ± 0.07
3	1.77 ± 0.39	a	0.37 ± 0.04	ab	2.57 ± 0.39	a	0.43 ± 0.03	ab	0.25 ± 0.04
4	0.99 ± 0.12	b	0.42 ± 0.02	ab	1.63 ± 0.19	b	0.46 ± 0.05	ab	0.23 ± 0.02
5	1.09 ± 0.25	b	0.31 ± 0.03	b	2.30 ± 0.37	ab	0.37 ± 0.07	b	0.26 ± 0.03
<i>p</i> -valor	0.006 **		0.07		0.06		0.07		0.75

Nota: los datos corresponden al promedio de tres replicas experimentales por tratamiento. N = nitrógeno, P = fósforo, K = potasio, Ca = calcio, Mg = magnesio, Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con la prueba de comparación múltiple de diferencia mínima significativa (DMS) ($p < 0.1$).

La asimilación de los microelementos se observa en la [tabla 4](#), en la que el azufre presenta mayor asimilación a $\text{pH} < 7$ (T1) mientras que el hierro se asimila mejor en un rango de pH entre 7 y 7.8 (T2 y T3); en el caso del manganeso hay una mayor asimilación al incrementar el pH ($p < 0.05$). Por último, el sodio fue extraído por la planta al encontrarse en altas concentraciones en el suelo a $\text{pH} > 7.9$ ($p < 0.05$). En conclusión, el pH de la fase soluble del suelo es un excelente indicador de la disponibilidad de nutrientes, lo cual se debe principalmente a que la presencia de iones como el aluminio H^+ y OH^- son, o determinantes de la solubilidad de nutrientes como sulfatos, molibdatos, hierro, manganeso, entre otros, o indicativos de la escasez de la disponibilidad de otros como el calcio, magnesio, potasio y sodio (39).

Tabla 4. Contenido de micronutrientes en tejido foliar de pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera al momento de corte.

Tratamiento	S	Fe	Mn	Na			
	mg/kg						
1	0.19 ± 0.045	92.43 ± 6.31	ab	44.70 ± 8.90	c	884.33 ± 403.29	b
2	0.19 ± 0.015	76.80 ± 4.36	a	43.10 ± 16.89	bc	1553.33 ± 1130.24	b
3	0.18 ± 0.018	80.67 ± 11.34	a	36.97 ± 4.98	bc	899.00 ± 353.27	b
4	0.15 ± 0.053	153.43 ± 48.01	b	63.33 ± 7.75	ab	4480.00 ± 2714.02	a
5	0.12 ± 0.010	119.83 ± 45.76	ab	79.23 ± 23.08	a	5943.33 ± 1680.49	a
Prueba de comparación de medias	Kruskal-Wallis	DMS	DMS	DMS	DMS	DMS	DMS
<i>p</i> -valor	5 - 1	0.05 *	0.02 *	0.02 *	0.003 **	0.003 **	0.003 **

Nota: los datos corresponden al promedio de tres replicas experimentales por tratamiento. S= azufre, Fe = hierro, Mn = manganeso, Na = sodio, Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con la prueba de comparación múltiple de diferencia mínima significativa (DMS) ($\alpha = 0.05$).

Se realizó un análisis de correlación de Pearson ($p < 0.1$) teniendo en cuenta las variables de crecimiento (altura del tallo), la asimilación de nutrientes y propiedades edáficas vistas en la [tabla 5](#). Igualmente, se observó una correlación negativa del crecimiento del tallo con el pH y la asimilación de manganeso, además de que el desarrollo del tallo se incrementa a mayor asimilación del potasio. En cuanto a las propiedades físicas del suelo, se observó una correlación positiva entre la infiltración del suelo y el crecimiento del tallo tal como se muestra en la [tabla 6](#). Otros estudios han reportado una correlación significativa entre atributos físicos del suelo y la producción de biomasa en *M. maximus*, resaltando la densidad aparente como uno de los más importantes, la cual está relacionada directamente con la compactación, que reduce la porosidad, la infiltración y la capacidad de retención de agua del suelo, así como también el desarrollo radical y por consiguiente la captación de nutrientes, lo que deriva en una disminución en parámetros de crecimiento de las plantas ([40](#)).

Tabla 5. Nutrientes asimilados y altura de tallo en pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera al momento de corte, y variables edáficas.

	K	Ca	Mg	Mn	Altura del Tallo	pH	CE	Da	I
	%		mg/kg		cm		dS/m	gr/cm	mm/h
Media	2.48	0.46	0.26	53.47	38.27	7.66	0.64	1.66	80.18
Desviación estándar	0.69	0.08	0.05	20.03	13.84	1	0.5	0.07	54.36
Coefficiente de variación	27.65	17.45	19.65	37.47	36.15	13.08	78.84	4.41	67.8

Nota: a continuación se presentan las abreviaturas de la tabla 5 y su significado. K = potasio, Ca = calcio, Mg = magnesio, Mn = manganeso, pH = potencial hidrogeno, CE = conductividad eléctrica, Da = densidad aparente, I =infiltración.

Tabla 6. Correlación de Pearson entre los nutrientes asimilados, altura de tallo en pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera al momento de corte y variables edáficas.

	Altura del tallo	pH	CE	Da	I	K	Ca	Mg	Mn
Altura del tallo	1	0.000	0.177	0.262	0.091	0.004	0.253	0.457	0.012
<i>p</i> -valor		0.0001	0.1769	0.2621	0.0910	0.0040	0.2535	0.4568	0.0123
pH	-0.78	1	0.31	-0.45	-0.50	-0.42	-0.55	-0.18	0.62
<i>p</i> -valor	0.0001*		0.0670	0.1676	0.0830	0.0230	0.0793	0.5739	0.0078
CE	-0.45	0.31	1	0.09	-0.57	-0.44	-0.19	-0.19	0.31
<i>p</i> -valor	0.1769	0.0670		0.7134	0.0035	0.0895	0.0428	0.6284	0.0953
Da	0.26	0.17	0.71	1	0.40	0.31	0.94	0.52	0.33
<i>p</i> -valor	0.2621	0.1676	0.7134		0.4047	0.3083	0.9396	0.5228	0.3344

I	0.59	-0.50	-0.57	0.16	1	0.25	0.42	0.10	-0.72
p-valor	0.0910	0.0830	0.0035*	0.4047		0.3544	0.1981	0.8539	0.0059
K	0.65	-0.42	-0.44	0.34	0.25	1	0.06	0.06	-0.38
p-valor	0.0040*	0.0230	0.0895	0.3083	0.3544		0.9195	0.9697	0.0351
Ca	0.25	0.08	0.04	0.94	0.20	0.92	1	0.03	0.66
p-valor	0.2535	0.0793	0.0428	0.9396	0.1981	0.9195		0.0290	0.6571
Mg	0.27	-0.18	-0.19	-0.14	0.10	0.06	0.65	1	0.07
p-valor	0.4568	0.5739	0.6284	0.5228	0.8539	0.9697	0.0290*		0.6012
Mn	-0.63	0.62	0.31	-0.12	-0.72	-0.38	-0.34	0.07	1
p-valor	0.0123*	0.0078*	0.0953	0.3344	0.0059*	0.0351	0.6571	0.6012	

Nota: a continuación se presentan las abreviaturas de la tabla 6 y su significado. pH = potencial hidrogeno, CE = conductividad eléctrica, Da = densidad aparente, I = infiltración, K = potasio, Ca = calcio, Mg = magnesio, Mn = manganeso.

Conclusiones

El pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera bajo fertirriego presentó una productividad hídrica (WP) mayor a 2.83 kg/m³ y la materia seca superó los 0.72 kg/m² con un pH del suelo inferior a 7.8, donde las propiedades hidrofísicas y químicas favorecen el movimiento del agua en el suelo y la asimilación de los nutrientes. Finalmente, la variable pH del suelo presenta una relación directa con el desarrollo del pasto *Megathyrus maximus* cv. Agrosavia Sabanera, por lo que su determinación es una buena herramienta para proyectar la producción de forraje.

Agradecimientos

La investigación se hizo en el marco del proyecto "Optimización del agua y uso eficiente del suelo para mejorar la producción agrícola en escenarios de vulnerabilidad agroclimática en el departamento del Cesar" con código BPIN: 2017000100050, financiado con el Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación - FCTeI del Sistema General de Regalías – SGR del departamento del Cesar en contrapartida con AGROSAVIA y desarrollado en el Centro de Investigación Motilonia de AGROSAVIA en el municipio de Agustín Codazzi Cesar, Colombia.

Referencias bibliográficas

- (1) Simões VJLP, de Souza ES, Martins AP, Tiecher T, Bremm C, da Silva Ramos J et al. Structural soil quality and system fertilization efficiency in integrated crop-livestock system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2023 jun; 349: 108453. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108453>
- (2) Reyes GE, Cortes JD. Intensidad en el uso de fertilizantes en América Latina y el Caribe (2006-2012). *Bioagro*. 2017 abr; 29(1): 45-52. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612017000100005&lng=es&nrm=iso

- (3) UNEP (United Nations Environment Programme) [Internet]. 2022. Efectos de plaguicidas y fertilizantes sobre el medio ambiente y la salud y formas de reducirlos - Resumen para encargados de la formulación de políticas; [citado 10 ene 2023]. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/report/environmental-and-health-impacts-pesticides-and-fertilizers-and-ways-minimizing>
- (4) The Food and Agriculture Organization of the United States (FAO) [Internet]. The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk. London: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan; 2011. 285 p. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i1688e/i1688e.pdf>
- (5) Hoekstra AY, Chapagain AK. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water resources management*. 2007 abr; 21: 35-48. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9039-x>
- (6) Bedoya-Vizcaya JE. Costos Sociedad de Agricultores de Colombia – SAC. *Revista Nacional de Agricultura*. 2021 oct; 1019. Disponible en: <https://sac.org.co/editorial-costos/>
- (7) Giraldo NV, Chará J. Efecto de los sistemas silvopastoriles intensivos en la reducción de la degradación física y biológica del suelo. *Livestock research for rural development*. 2022 mar; 34(3): 17. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd34/3/3417vicky.html>
- (8) Ahmad W, Shah Z, Jamal M, Shah KA. Recovery of organic fertility in degraded soil through fertilization and crop rotation. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2014 jun; 13(2): 92-99. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.007>
- (9) Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Alertas de la degradación de suelos por salinización. Bogotá DC: IDEAM; 2019. 68 p. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023873/SINTESISsali.pdf>
- (10) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Territorial del Departamento de Cesar UT CAEM-E3. Bogotá DC: consultoría Corporación ambiental empresarial (CAEM), Ecología, economía y ética – asesorías; 2016 dic. Disponible en: https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/aproximacion_al_territorio/Cesar_pag_ind.pdf
- (11) Sharma V, Irmak S. Economic comparisons of variable rate irrigation and fertigation with fixed (uniform) rate irrigation and fertigation and pre-plant fertilizer management for maize in three soils. *Agricultural Water Management*. 2020 oct; 240, 106307. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106307>
- (12) Wang XC, Liu R, Luo JN, Zhu PF, Wang YS, Pan XC, Shu LZ. Effects of water and NPK fertigation on watermelon yield, quality, irrigation-water, and nutrient use efficiency under alternate partial root-zone drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 2022 sep; 271, 107785. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107785>
- (13) Li H, Mei X, Wang J, Huang F, Hao W, Li B. Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional

irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China. *Agricultural Water Management*. 2021 feb; 244, 106534. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106534>

(14) Quemada M, Gabriel JL. Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously. *Global Food Security*. 2016 jun; 9: 29-35. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.05.004>

(15) Meng W, Xing J, Niu M, Zuo Q, Wu X, Shi J et al. Optimizing fertigation schemes based on root distribution. *Agricultural Water Management*. 2023 ene; 275, 107994. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107994>

(16) Tei F, De Neve S, De Haan J, Kristensen HL. Nitrogen management of vegetable crops. *Agricultural Water Management*. 2020 oct; 240, 106316. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106316>

(17) Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Claves para la taxonomía de suelos. 12ª ed. Montecillo: Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas; 2014. 399 p. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>

(18) Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6ª ed. Bogotá DC: IDEAM; 2006. 648 p.

(19) Borrero CA. Manual complementario de producción agrícola: fertilización de algunos cultivos de clima cálido. San José del Guaviare: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR); 2008 feb. Disponible en: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13495/44699_59435.pdf?sequence=1&isAllowed=y

(20) Perkin Elmer Corporations. Instruction Handbook Microwave sample preparation system. Running the Analyst 100 Atomic Absorption Spectrometer, Operating Instructions Perkin Elmer Corporations. 2009.

(21) Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Washington DC: USDA; 1999. 82 p. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20y%20Salud%20del%20Suelo.pdf>

(22) Contenido Rubio MR. Estadística con aplicaciones en R. Bogotá DC. Editorial Utadeo; 2019. 414 p. Disponible en: https://www.utadeo.edu.co/sites/tadeo/files/node/publication/field_attached_file/libro_estadistica_con_aplicaciones_en_r_def_ago_11.pdf

(23) Pelea LP. ¿Cómo proceder ante el incumplimiento de las premisas de los métodos paramétricos? o ¿cómo trabajar con variables biológicas no normales? *Revista del Jardín Botánico Nacional*. 2018; 39: 1-12. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/26600674>

(24) Quispe A, Calla KM, Yangali JS, Rodríguez JL, Pumacayo II. Estadística no paramétrica aplicada a la investigación científica con software SPSS, MINITAB Y EXCEL. Enfoque práctico. Colombia. Eidec; 2019. 80 p. Disponible en: <https://www.editorialeidec.com/wp-content/uploads/2020/01/Estad%C3%ADstica-no-param%C3%A9trica-aplicada.pdf>

(25) Lal R. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Washington DC: Soil Management Support Services US, Department of Agriculture; 1994 mar. SMSS technical monograph 21. Disponible en: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnabs982.pdf

(26) Flores Delgadillo L, Alcalá Martínez JR. Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos. Ciudad de México (CDMX): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geología; 2010. 56 p. Disponible en: <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>

(27) Instituto Geográfico Agustín Codazzi (GAC). Códigos para los levantamientos de suelos. Bogotá DC: IGAC; 2014. 88 p. Disponible en: <http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/instructivos/I40100-06-14.V1Codigos%20para%20los%20levantamientos%20de%20suelos.pdf>

(28) Pla Sentís, I. Nuevas experiencias en la evaluación y diagnóstico de procesos de salinización y sodificación de suelos en América latina. Suelos Ecuatoriales. 2014 dic; 44 (2): 125-137. Disponible en: <http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos-ecuatoriales/article/view/46/39>

(29) González Pedraza AF, Chiquillo Barrios YA, Escalante JC. Soil salinization in agricultural areas of the Caribbean region and agroecological recovery strategies - Review. INGE CUC. 2022 ene; 18(1). Disponible en: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/3612/4627>

(30) Solano Murillo J, Barros Henríquez JA, Roncallo Fandiño B, Arrieta Pico G. Requerimientos hídricos de cuatro gramíneas de corte para uso eficiente del agua en el Caribe seco colombiano. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 2014 jun; 15(1) 83-99. Disponible en: <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/399/316>

(31) Atencio Solano L, Tapia-Coronado JJ, Barragán-Hernández W, Mojica Rodríguez JE, Suárez E, Martínez A et al. Cultivar de pasto guinea (*Megathyrus maximus*): Gramínea forrajera de alta producción de forraje, excelente calidad nutricional y abundante producción de semilla. Colombia: Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA); 2018. Disponible en: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/34646/Ver_documento_34646.pdf?sequence=6&isAllowed=y

(32) Cedeño Aristega MJ, Luna Murillo RA, Espinoza Coronel AL, Romero Garaicoa DA. Producción y composición química de *megathyrus máximus* cultivares tanzania y mombasa bajo condiciones del subtrópico ecuatoriano. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar. 2021 ago; 5(4): 6427-6443. Disponible en: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/777>

(33) Milera Rodríguez M, Alonso Amaro O, Machado Martínez HC, Machado-Castro RL. *Megathyrus maximus*: Resultados científicos y potencialidades ante el cambio climático en el trópico. Avances en Investigación Agropecuaria. 2017 dic; 21(3): 41-61. Disponible en: <http://ww.ucol.mx/revaia/portal/pdf/2017/sept/4.pdf>

- (34) Holland EP, Thomas V, Soti P. Low soil nitrogen and moisture limit the expansion of the invasive grass, *Megathyrsus maximus* (Guinea grass) in semi-arid soils. *Journal of Arid Environments*. 2022 sep; 204, 104788. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104788>
- (35) Schnellmann LP, Verdoljak JJ, Bernardis A, Martínez González JC, Castillo Rodríguez SP. La frecuencia y altura de corte en *Panicum máximum* cv Gattón Panic. *Agronomía Mesoamericana*. 2019; 30(2): 553-562. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/34216>
- (36) Hansen V, Müller Stöver D, Gómez-Muñoz B, Oberson A, Magid J. Differences in cover crop contributions to phosphorus uptake by ryegrass in two soils with low and moderate P status. *Geoderma*. 2022 nov; 426, 116075. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116075>
- (37) Heredia Mendoza JD, Fernández Romay Y, Vivas Arturo WF, Andrade Díaz CA, Alcívar Acosta EH, Macías Pro MA, Jesús Peña MJ. Características morfológicas en el pasto *Megathyrsus maximus* cv. Mombaza, en el cantón Chone provincia Manabí. *Polo del Conocimiento*. 2022 may; 7(5), 1410-1425. Disponible en: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/download/4036/9428>
- (38) Rodríguez I, Crespo G, Herrera M, Medina Y. Comportamiento del pH, P asimilable y Ca y Mg cambiables en un suelo Ferralítico ocupado por un sistema silvopastoril de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) Gray y gramíneas asociadas. *Livestock Research for Rural Development*. 2018 sep; 30(9). Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd30/9/irod30153.html>
- (39) Osorio NW. pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y Nutrición vegetal*. 2012; 1(4): 1-4. Disponible en: <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>
- (40) Ocampo Quijano LE, Osorio Vega WN, Martínez Atencia J, Cabrera Torres KR. La densidad aparente y el tamaño de agregados del suelo controlan el crecimiento radical de *Megathyrsus maximus*. *Acta Agronómica*. 2022 may; 70(4): 353-362. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.88785>