

Caracterización de Variables de Fertilización Precisa de Suelos y Praderas para el Diseño de un Software de Recomendación Inteligente¹

Characterization of Accurate Soil and Grassland Fertilization Variables for the Design of Intelligent Recommendation Software

J. E. Giraldo, L. F. Londoño, C.A. Perez y E. Y. Alvarez

Recibido: marzo 07 de 2022 – Aceptado: diciembre 30 de 2022

Resumen— Este artículo presenta la caracterización de variables relacionada con la fertilización precisa de suelos y praderas de ganadería de leche, para la construcción de un sistema inteligente de recomendación de planes de fertilización. La caracterización se realizó mediante un estudio de campo que consideró análisis de suelo y determinación de niveles óptimos de macronutrientes en cinco fincas del norte de Antioquia-Colombia. Como principal resultado se logró establecer los conjuntos difusos de entrada y salida, junto con las reglas de producción, que posteriormente se llevaron a un prototipo funcional. A partir de lo anterior, se concluye que el uso de técnicas de inteligencia artificial tiene gran potencial para su integración con software que apoyen las labores relacionadas con la fertilización.

Palabras clave— Fertilización Precisa de Suelos, Caracterización de Variables, Ganadería de Leche, Análisis Especializado de Datos, Software de Recomendación.

Abstract— This article presents the characterization of variables related to the precise fertilization of soils and dairy cattle pastures, for the construction of an intelligent system for the recommendation of fertilization plans. The characterization was carried out through a field study that considered soil analysis and determination of optimum levels of macronutrients in five farms in the north of Antioquia-Colombia. The main result was the establishment of the input and output fuzzy sets, together with the production rules, which were later taken to a functional prototype. From the above, it is concluded that the use of artificial intelligence techniques has great potential for integration with software to support fertilization-related tasks.

Keywords— Accurate Soil Fertilization, Characterization of Variables, Dairy Cattle, Specialized Analysis of Collected Data, Recommendation Software.

I. INTRODUCCIÓN

EN la actualidad la producción lechera atraviesa múltiples transformaciones producto de la constante reconfiguración cultural y demanda que permiten pensar en la mejora continua de espacios, procesos y dinámicas internas que contribuyen directamente a la toma de decisiones [1]. Esto conlleva a la definición de prácticas basadas en tecnologías emergentes poco instauradas dentro de las dinámicas actuales de la producción lechera y que, además se conviertan en espacios de socialización y culturización, no solo para las personas que intervienen directamente con la producción de la leche sino para la comunidad en general en todo el campo lechero.

Esta investigación se realizó en la zona norte de Antioquia, la cual es considerada un escenario productivo y privilegiado para el comercio lechero. Así mismo, se reconoce la necesidad implícita de vincular sistemas informáticos en dichas zonas mediante software de recomendación propios para este contexto, como por ejemplo lo plantean Rodas, J. L., Olivares, J., Galindo, J. A. y Benavides [2].

Son varias las aproximaciones que se han realizado en torno a la aplicación de técnicas de inteligencia artificial y el dominio de la fertilización. Tal es el caso de [3] donde se lleva a cabo un análisis de aplicaciones difusas en cadenas de suministro agrícola, así como también en [4], donde se diseña

¹Producto derivado del proyecto de investigación “Construcción de un prototipo de software inteligente para la recomendación técnica en sistemas de fertilización precisa de suelos y praderas en ganadería de leche”, financiado por el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín Colombia.

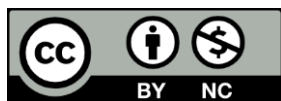
J.E. Giraldo, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia, email: jegiraldo@elpoli.edu.co.

L.F. Londoño, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia, email: lflondono@elpoli.edu.co.

C.A. Pérez, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia, email: carlosperez@elpoli.edu.co.

E.Y. Álvarez, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia, email: eddie_alvarez86103@elpoli.edu.co.

Como citar este artículo: J. E. Giraldo, L. F. Londoño, C. A. Pérez, E. Y. Álvarez. Caracterización de Variables de la Fertilización Precisa de Suelos y Praderas para el Diseño de un Software de Recomendación Inteligente, Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 16, no. 32, pp. 35-41, julio-diciembre 2022. DOI: <https://doi.org/10.31908/19098367.2766>.



un robot de asistencia para los agricultores. Otro proyecto relacionado es [5], en este se genera un modelo de simulación mediante un sistema difuso para la fertilización basada en nitrógeno.

Continuando con proyecto que abordan la lógica difusa, en [6] se presenta el diseño de un sistema de información geográfico difuso, el cual permite trabajar con el grado de incertidumbre en los terrenos, de acuerdo con los fertilizantes empleados. En ese mismo orden de ideas, en [7] se diseñó un sistema difuso para valorar los efectos causados por el uso de fertilizante y las dosis de ellos, el sistema recomienda el número de aplicaciones del fertilizante, dependiendo del fertilizante y el terreno.

Sabiendo que los sistemas software pueden integrarse con sistemas físicos, como lo son los sistemas IoT, en [8] se presenta un sistema de irrigación y monitoreo de terrenos para el aseguramiento de los resultados de la aplicación de los nutrientes. Un proyecto similar es la propuesta en [9], donde se modela un sistema de irrigación sobre cultivos de Papa, basado en un sistema difuso, que permite analizar los efectos del uso de fertilizantes.

Para el presente estudio se obtuvieron datos relacionados con la ubicación geográfica, el área, aforo y el uso de los terrenos. Las fincas vistas se describen a continuación.

- Finca 1 (M1): La Pilarica, ubicada en el municipio de Bello a una altura de 2563 msnm.
- Finca 2 (M2): La Sierra, ubicada en el municipio de San Pedro de Los Milagros a una altura de 2669 msnm.
- Finca 3 (M3): los Molinos, ubicada en el municipio de Santa Rosa de Osos a una altura de 2723 msnm.
- Finca 4 (M4): La Florida, ubicada en el municipio de Entreríos a una altura de 2473 msnm.
- Finca 5 (M5): El Anhelito, ubicada en el municipio de Entreríos a una altura de 2436 msnm.

Estos terrenos se caracterizan por formar parte de la zona del altiplano de Antioquia, la cual cuenta con una gran riqueza hídrica, además de ser privilegiada por su gran afluente económico y un clima frío a templado que oscila entre 8° y 16° lo que facilita la obtención y el comercio de diversos productos, bienes y servicios que aportan a la economía. Dentro de estas zonas el sector pecuario sobresale por la producción lechera que la hace una de las regiones más productoras del país.

El resto del documento se estructura así: en la sección II se presenta la metodología de trabajo, en la cual se evidencia cada una de las etapas del proyecto llevadas a cabo, a su vez se vincula una descripción de las visitas, se caracterizan y correlacionan algunas de las principales variables obtenidas a partir del análisis de campo llevado a cabo en las cinco fincas visitadas. En la sección III se describe el diseño del sistema difuso para la fertilización precisa de suelos, así como también se presenta una validación del este. Seguido en la sección V se presentan los principales resultados y conclusiones. Por último, se muestran las referencias bibliográficas.

El objetivo de este artículo es la presentación de los resultados del estudio de campo realizado en cinco fincas del norte de Antioquia, en donde se levantó información referente a sus macro y micronutrientes.

II. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo consistió en las fases que se describen a continuación.

Fase 1 - Realización de las visitas: se realizaron de manera aleatoria las visitas a cada una de las fincas seleccionadas, en estas se visualizaron los modos de proceder en producción, en estructura, distribución de terrenos y mediante una reunión con el administrador de la finca, se tomaron registros escritos en función de su cotidianidad y preguntas básicas sobre sus procesos productivos.

Fase 2 - Caracterización de variables: se establecieron variables externas e internas acorde a su alta influencia en los procesos de producción y estabilidad del terreno. Las variables externas hacen alusión a cambios frecuentes externos al terreno pero que también tienen influencia dentro de la producción y las variables internas están relacionadas con los cambios que afectan directamente las praderas. Cabe resaltar que ambas variables si bien son de tipo cualitativo nominal en relación con su nominación, dentro del proyecto se cuantificaron para obtener de los mismos indicadores comparables y por tanto se considerarán como variables cuantitativas continuas.

Fase 3 - Análisis y correlación: en esta fase se procedió a construir inferencias a partir de las visitas sobre las variables que presentaron baja, media y alta correlación. Además de articular incidencias directas de algunas de las variables en mayor o menor cantidad en los suelos, de esta manera se correlacionaron internamente las variables, indagando a profundidad la afectación de estas variables sobre cantidad y calidad de la leche, así como también por la afectación/intoxicación por parte de los fertilizantes en los suelos y en las vacas.

Fase 4 - Diseño de sistema difuso: en esta última fase se retomaron las variables correlacionadas y su alta incidencia y se define la estructura del sistema difuso que permita establecer criterios sólidos en función de calidad, cantidad, producto y estructura para la aplicación de estos y que contribuyan a mejorar la calidad y cantidad en la producción lechera. El software de recomendación diseñado está articulado a la prueba de análisis de suelo: Muestra de suelo, tipo de suelo, cultivo antecesor y rendimiento objetivo, necesidad de fertilización, producto y cantidad sugerida.

La Fig. 1, presenta un resumen de la metodología expuesta.

En cada una de las fincas seleccionadas se visualiza su estructura y distribución de terrenos. Mediante una reunión con el administrador de la finca se tomaron registros escritos en función de su cotidianidad, en este diálogo se realizaron preguntas básicas en relación con sus procedimientos habituales, manejo, rotaciones, productos y sistemas que emplean para el cuidado de los terrenos. Se tomaron muestras en zonas particulares en las que se perciben cambios de fase

de una pradera a otra acorde a las delimitaciones que en las mismas se observaron.

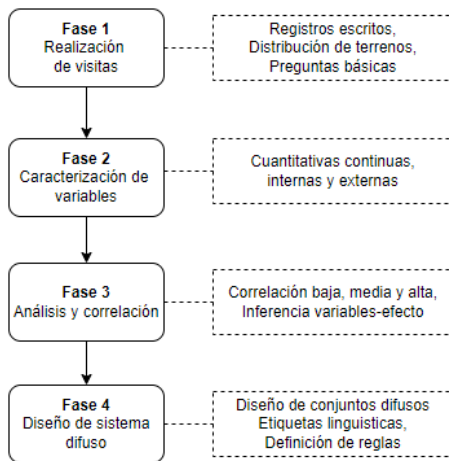


Fig. 1. Metodología de trabajo para la construcción de un software de recomendación precisa de fertilizantes para el campo lechero.

Se encontró que, las principales proporciones de pasto que componen las fincas están ocupadas por pradera Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y pasto Rye grass (*Lolium sp*). 80% de las fincas utiliza praderas de pasto Kikuyo y 20% Rye grass.

En la Tabla I, se presentan los principales tipos de nutrientes obtenidos de las pruebas, así mismo, en la Tabla II se presentan las propiedades del suelo y las características observadas.

TABLA I.
NUTRIENTES INTERNOS AL SUELO EN LAS FINCAS.

Tipo de nutriente	Elemento químico
Macronutrientes	Nitrógeno, Fósforo, Potasio
Micronutrientes	Azufre, Magnesio, Calcio, Boro, Cobre, Hierro, Manganeseo.

TABLA II. PROPIEDADES EN EL ANÁLISIS DE SUELO.

Propiedades	Característica observada
Física	Textura, Densidad y Porosidad, Estructura
Biológicas	Macro - organismos y Micro - organismos presentes.
Química	Reacciones Químicas internas

A través del diálogo y de sensores básicos se tomaron datos de orden climatológico, de producción, de pastoreo y de fertilización, de concentrado y de ración de sal, lo cual permitió categorizarlos de la siguiente manera:

Datos climatológicos: posición geográfica y metros sobre el nivel del mar (msnm), por medio de GPS. Además, se obtuvieron datos de temperatura anual promedio, humedad relativa (HR) y precipitación pluvial anual promedio.

Datos de producción del hato: Vacas en producción (VP), Vacas secas (VS), Vacas horras (VH), Novillas (N), Litros/día y Producción: vaca/día.

Datos de pastoreo y fertilización: Hectáreas totales, número de potreros, área promedio de potreros, rotación, tipo de pasto, aforo y el área de aforo. Para la fertilización se tomaron datos

de fertilizantes, tóxicos y abonos con su respectivo nombre y frecuencia de aplicación.

Concentrado y ración de sal: Bultos quincenales y marca del concentrado. Para la sal, cantidad, marca y sus respectivos costos.

Las variables que se presentan a continuación son de tipo externo e interno, esto es: las variables externas hacen alusión a cambios frecuentes externos al terreno, pero que también tienen influencia dentro de la producción y las variables internas hacen referencia a aquellos cambios que afectan directamente el suelo y las praderas. Las variables asociadas a características externas se describen a continuación.

Tipo de leche: Hay 2 tipos de leche asociados directamente a la raza, estos son: Jersey y Holstein. Entre los dos tipos de leche que se producen en estas fincas, se identifica que la leche Holstein (con mayor textura y de color blanco-negro) presenta una mayor cantidad de volumen en las producciones pese a su poca proporción en nutrientes o sólidos totales. Por otra parte, la leche Jersey (menor textura y de color amarillo claro) presenta una mayor calidad en sentido nutricional más no en volumen o cantidad.

La Tabla III, presenta una descomposición interna (Promedio) de los diferentes tipos de leche encontrados.

TABLA III.
COMPOSICIÓN DE LECHE.

Raza	Materia Seca %	Grasa %	Proteína %	Lactosa %	Minerales %
Holstein	12,32	3,45	3,30	4,89	0,86
Jersey	14,86	5,37	3,79	5,00	0,70

FUENTE: COLANTA, 2019.

Con relación a estas dos proporciones, se identifica que los propietarios a la hora de comercializar estos dos tipos de leche los combinan para garantizar buen volumen y buena proporción o calidad de nutrientes por litro.

Porcentaje Alimenticio: la dieta está conformada por 70% con pasto (Kikuyo y Ryegrass) y 30% en concentrado. Adicionalmente, se suministra un suplemento de sal mineralizada (Calcio, fósforo y magnesio) en un 1.9%. Esta variable se obtuvo a partir del diálogo con los productores con relación a las raciones alimenticias.

Tipos de praderas: existe una tendencia a combinar de praderas de pasto Kikuyo y Rye grass. El análisis registra que este tipo variable es necesario, más aún al comparar las propiedades y características propias de cada pasto.

Así, por ejemplo, en lo que respecta al pasto kikuyo se encuentra que este presenta mayor resistencia a cambios climáticos, a las sequías y tiene alta capacidad de reproducción, aunque no tolera altas humedades, su rebrote tiene un periodo de 38 días y lo que se busca es que la ocupación de los terrenos permita una rotación diaria y visitas de los animales para el consumo total en 1 día.

Cabe resaltar que a diferencia del Rye grass el pasto kikuyo presenta un problema importante con relación al acolchonamiento (forraje muerto por debajo), presentando pérdidas en su capacidad nutricional-producción con el

tiempo y es factible que la vaca no consuma el pasto muerto que está por debajo, en este caso se deben hacer colectas y poda a nivel más profundo para garantizar mejor calidad nutricional de este tipo de pasto.

Rotación del ganado: Períodos de ocupación y periodos de descanso de las pasturas. Esta variable incide directamente en la distribución equitativa de las praderas, su control y periodos de rotación. Se evidencia la necesidad de distribuir el ganado, de tal manera que puedan consumir en un día por visita todo el pasto y posteriormente, se brinden 38 días de descanso del suelo y pradera para un nuevo rebrote (fertilización, riego, disminución de acolchonamiento). Las variables asociadas a características externas se describen a continuación.

Componente interno A: Proteína bruta y Nitrógeno no proteico. Estas variables presentan alta incidencia en la calidad y cantidad nutricional del pasto. Del análisis llevado a cabo, se identifica que aproximadamente en suelos no fertilizados se puede producir 40 kg de materia seca por hectárea (Prueba de aforo), con un porcentaje balanceado de esta variable, pero en suelos fertilizados se puede llegar a producciones aproximadamente 80 kg por hectárea.

Respecto a esta variable, se encuentra que el nitrógeno es necesario y debe estar bien equilibrado ya que como nitrato en alta cantidad se convierte en nitrato y en altas concentraciones puede intoxicar a las vacas. El análisis efectuado permitió evidenciar que en las diferentes fincas abordadas la pastura está bien balanceada.

Los resultados evidencian que el Nitrógeno como materia orgánica [N*] (después de la prueba de secado) sería ideal, que esté en niveles entre el 2% al 4%.

Componente interno B: Digestibilidad del suelo. Esta variable se posiciona como un alto indicador de si hay necesidad de fertilización o no. La digestibilidad de los pastos debe estar en niveles entre el 70% y el 80%.

Una buena digestibilidad (como lo presentaron 4 de las 5 fincas visitadas), es un indicador que las pasturas - praderas no están viejas y por tanto, no hay que hacerles procesos de renovación, con lo cual pueden sostenerse 1 o 2 años más.

La digestibilidad indica en buena medida que en las praderas se están llevando a cabo buenos protocolos de fertilización de los suelos.

Lo anterior va de la mano con los resultados obtenidos en función de la fibra en detergente neutro y fibra detergente ácido lo que garantiza que existe en las fincas buena absorción y volumen en las pasturas.

Respecto a esto último, la Tabla IV presenta un resumen del análisis de laboratorio para la prueba de Aforo aplicado, a partir del mismo, se establece que estos suelos están balanceados en nutrientes, acidez y digestibilidad.

Componente interno C: Fósforo [P] y Potasio [K**]. Esta variable también presenta alta influencia al formar parte de los macronutrientes que elevan la calidad y cantidad de la leche. El Fósforo [P] y el Potasio [K**] se establecen como ideal si en el análisis de suelos se encuentran en niveles entre el 6 mg/kg al 9 mg/kg y entre 1 cmol (+)/kg al 1,6 cmol (+)/kg respectivamente.

TABLA IV.
ANÁLISIS DE PRADERAS (PRUEBA DE AFORO).

Cultivo	Código Laboratorio	Extra	Proteí	FDA	FDN	Mate	Lig-	FDA
		cto	na	(Insolu-	(Insolu-	ria	nin	Dige
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Pasto Kikuyo M1, Bello	NA21-0305	2,61	26,48	29,59	50,99	90,92	2,22	74,69
Pasto kikuyo M2, San Pedro	NA21-0306	2,64	24,51	33,91	52,47	90,87	2,21	70,00
Pasto Kikuyo M3, Santa Rosa de Osos	NA21-0307	3,31	26,16	31,33	49,60	99,96	2,56	72,16
Pasto Ryegrass M4, Entrerrios	NA21-0308	3,15	21,29	30,67	46,22	93,98	1,82	72,08
Pasto Kikuyo M5, Entrerrios	NA21-0309	2,9	25,78	32,51	52,63	97,98	2,51	69,70
Pasto Kikuyo M6, Entrerrios	NA21-0310	2,72	22,88	33,96	53,97	88,73	2,28	70,02

La Tabla V presenta los resultados ideales para esta variable en relación con su producción de biomasa baja, media y alta.

TABLA V.
DATOS DE EXTRACCIÓN DE MACRONUTRIENTES EN KIKUYO T/HA/AÑO.

Producción T/HA/AÑO	N	P	K	Ca	Mg	k
Baja 4,5	125	27	133	3 mg/Kg	1,5 mg/Kg	0,2 mg/Kg
Media 7,5	208	45	222	3 y 6 mg/Kg	1,5 y 2,5 mg/Kg	0,2 y 0,4 mg/
Alta 14	389	83	415	> 6	>2,5	>0,4

Correlaciones Altas: Se encuentra una alta correlación entre algunas de las variables no mencionadas previamente, entre estas toman importancia los niveles de fósforo, potasio, calcio y magnesio. Estas variables alusivas a las propiedades químicas vinculan aspectos esenciales para disminuir el acolchonamiento, en particular la propiedad física de compactación (Resistencia a la penetración).

El Nitrógeno por su parte, si bien es un elemento muy importante no será una variable influyente para el software de recomendación debido a su alta variabilidad en todos los resultados presentados.

La calidad y la cantidad de producción de biomasa de los

pastos o forrajes tiene una alta correlación con las decisiones que se toman en la fertilización de suelo y se establecen como un alto indicador de productividad y eficiencia en el software que se lleva a cabo.

Correlaciones medias: Se establece que en el software de recomendación se pueden brindar sugerencias para las rotaciones y visitas programadas, si bien hay una correlación media entre los días de descanso, rebrote y nuevos consumos por parte de los animales, se establece para la primera parte del proyecto darle mayor importancia a los resultados propios del análisis bromatológico y aforo, que de por sí brinda mayores alcances, como lo es medir la cantidad de biomasa y las propiedades alimenticias y la distribución por potrero que se está recomendando.

Cuando se estima la cantidad de fertilizante a aplicar por ciclo, se debe considerar la relación directa que esto presenta con la cantidad que se debe aplicar en tiempo y por ciclo, de allí que se debe considerar los ciclos de rotación dentro del software. Como ciclo promedio se establecen de 32 a 35 días.

Correlaciones bajas: Los elementos como el Manganeseo, Hierro, Boro y Zinc presentaron baja influencia y correlación con los análisis de suelos obtenidos, en particular su baja presencia y estimación en partes por millón, sugieren una baja afectación a nivel nutricional y por tanto no se tendrán en cuenta como variables influyentes para el software de recomendación.

Por otra parte, existe una variable de correlación baja pero que en fondo tiene alta importancia y es la relación que se desprende entre los elementos base calcio-magnesio, es así como su cociente presenta una unidad de medida importante: en el cociente de Calcio/Magnesio, lo ideal es que esté acotado entre 2 y 4, si está por debajo de 2, hay deficiencia de calcio y si está por encima de 4, existe deficiencia de magnesio.

Esta correlación baja sugiere la necesidad de evidenciar en el suelo un equilibrio de las bases y este se puede presentar a partir de los cocientes entre las bases (Fósforo, Potasio, Calcio y Magnesio).

En ámbito lechero, se visualiza todo un sistema de tradición cultural en aspectos teóricos y empíricos, donde se hace evidente que pocas personas son las idóneas para llevar a cabo decisiones cruciales y propias de la ganadería lechera, en particular, en lo que respecta al tratamiento de los suelos y praderas muchas veces se queda limitado a las condiciones geográficas y climatológicas [10,11].

La Tabla VI presenta una propuesta de cómo podría ser este tipo de recomendaciones partiendo de un análisis de suelo, hasta llegar a sugerir algunas posibles acciones en relación con la fertilización y/o abonos necesarios como apoyo directo al campo de producción lechera.

Si bien el análisis previo evidencia tres componentes de alta importancia para el suelo (Potasio, Nitrógeno y Fósforo), el análisis de correlaciones presenta la necesidad de articular el Magnesio y el Calcio como dos variables de alta influencia, debido a su atribución en el acolchonamiento [12] de los suelos.

Acorde a lo anterior y a partir del análisis de suelo efectuado en las fincas, se establecieron correlaciones

empleando el lenguaje de programación de Python obteniendo la correlación presentada en la Fig. 2.

TABLA VI.
CARACTERIZACIÓN DE LAS RECOMENDACIONES.

<i>Recomendación Tipo 1</i>	<i>Recomendación Tipo 2</i>
Muestra de suelos, tipo de suelo, cultivo antecesor y rendimiento objetivo.	Deficiencias y Excesos
Plan de fertilización de suelos, cantidades y productos sugerido.	

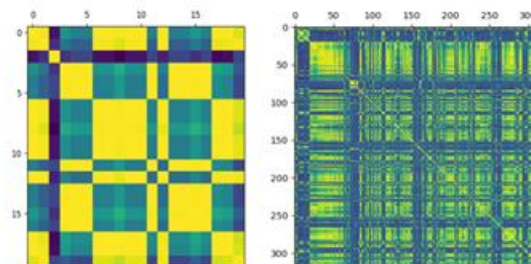


Fig. 2 Correlaciones a partir del análisis de suelo en las fincas visitadas.

Después de evaluar los datos y efectuar varias iteraciones, se establece que no es posible generar una recomendación, sin establecer el grupo de datos conocidos como ratings de una forma no sintética, es decir, datos que se más acordes a los reales y no a derivados de suposiciones construidas.

Debido a lo anterior, se procedió a realizar la construcción de un sistema difuso que permita definir la recomendación mediante variables de reales. Acorde a un conjunto de reglas determinar los valores equivalentes fuzificados, y posteriormente obtener un proceso de desfuzificación que determine datos de salida y brinde las correctas recomendaciones para la fertilización de suelos y praderas.

Para el software difuso, se establece que los valores de entrada son los macronutrientes: Calcio, Magnesio y Potasio y de salida se determina (según los rangos) los niveles de la recomendación de un tipo de fertilizante con nutrientes que suplan la deficiencia expuesta en el estudio previo de suelos y praderas.

III. DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DIFUSO

Los sistemas difusos son útiles debido a que no requieren de un modelo matemático, pero pese a esto son altamente aplicables en sistemas de control, por su adaptabilidad a sistemas de variabilidad compleja y para la toma de decisiones con criterios sólidos de inferencia [13]. Si bien, en los sistemas difusos se controlan las variables de salida, todo el control del sistema se maneja mediante funciones de membresía y variables lingüísticas con sus respectivos rangos, lo cual permite una inferencia y determinación importante en función de la variable de salida.

En la Tabla VII se presentan algunas de las variables lingüísticas, sus respectivos rangos, etiquetas y funciones de pertenencia. Como conjuntos de entrada se tiene al Calcio, Magnesio y Potasio y como conjunto de salida se define a la cantidad de Abono necesaria para la fertilización precisa.

TABLA VII.
DEFINICIÓN DE VARIABLES Y RANGOS.

Variable y rango	Etiqueta y rango	Función
Calcio [0,6] (Entrada)	Bajo [0,3]	Trapezoidal
	Medio [2,7]	Trapezoidal
	Alto [> 6]	Trapezoidal
Magnesio [0,2,5] (Entrada)	Bajo [0, 1.5]	Trapezoidal
	Medio [1, 3]	Trapezoidal
	Alto [> 2]	Trapezoidal
Potasio [0, 0.4] (Entrada)	Bajo [0, 0.2]	Trapezoidal
	Medio [0.1, 0.4]	Trapezoidal
	Alto [> 0.3]	Trapezoidal
Abono [0, 1.0] (Salida)	Poco [0, 0.4]	Triangular
	Normal [0.2, 0.9]	Triangular
	Abundante [> 1.0]	Triangular

La Fig. 3, presenta el conjunto de entrada de Calcio, el cual tiene 3 etiquetas así: Bajo, Medio y Alto.

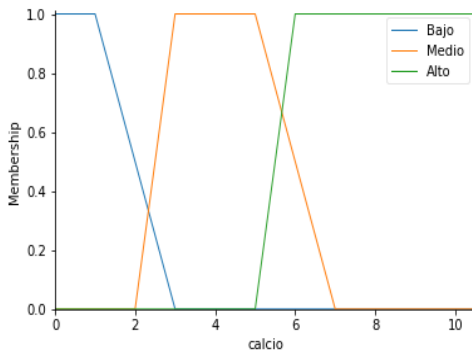


Fig. 3 Conjunto difuso de entrada – Calcio.

En la Fig. 4, se presenta el conjunto de entrada de Potasio y se compone de 3 etiquetas así: Bajo, Medio y Alto.

Por su parte, en la Fig. 5, se presenta la gráfica del conjunto de entrada de Potasio. Tiene 3 etiquetas así: Bajo, Medio y Alto.

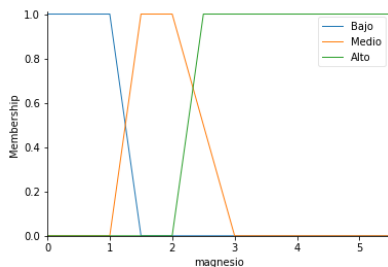


Fig. 4 Conjunto difuso de entrada – Magnesio.

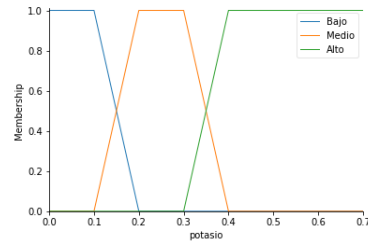


Fig. 5 Conjunto difuso de entrada – Potasio.

Por último, se definió el conjunto de salida: Abono o fertilizante, el cual se interpreta como la cantidad de Abono a aplicar de acuerdo con los niveles de los macronutrientes necesarios a partir del análisis de suelo realizado. La Fig. 6, presenta el conjunto de salida.

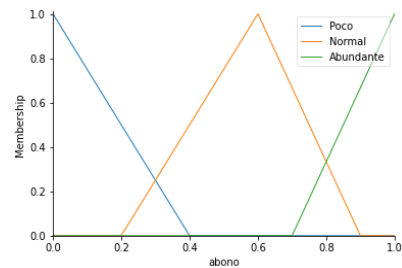


Fig. 6 Conjunto difuso de salida – Abono.

Posteriormente, se definieron un total de 84 reglas difusas, las cuales permiten definir con precisión la cantidad de abono a aplicar de acuerdo con lo identificado. A continuación de presentan 3 de ellas.

- Regla 1: $C(\text{Bajo}) \wedge Mg(\text{Bajo}) \wedge K(\text{Bajo}) \rightarrow Ab(\text{Abundante})$.
- Regla 2: $C(\text{Medio}) \wedge Mg(\text{Medio}) \wedge K(\text{Medio}) \rightarrow Ab(\text{Normal})$.
- Regla 3: $C(\text{Alto}) \wedge Mg(\text{Alto}) \wedge K(\text{Alto}) \rightarrow Ab(\text{Poco})$.

La implementación del sistema difuso se realizó a modo de prototipo en Python, mediante la plataforma Google-Colab. También se hizo uso de la librería de Python scikit-fuzzy.

Para la validación del sistema de recomendación se definieron casos de estudio dentro de las fincas visitadas y teniendo en cuenta los valores ideales descritos en la Tabla 2. Con base en las pruebas realizadas al sistema de recomendación se obtuvo una precisión del 95% de acuerdo con la opinión de un experto (Productor-Administrador).

IV. CONCLUSIONES

Entre las variables que se deben considerar para sugerir o no una fertilización de precisión inmediata de los suelos se encuentra la digestibilidad y acorde a los resultados obtenidos y las investigaciones realizadas debe estar en niveles del 70% y el 80% ni más por encima, ni valores inferiores, ya que en ambos casos se puede tener una influencia negativa en relación con la sostenibilidad de los suelos y praderas.

Si bien el análisis previo evidenció tres componentes

importantes para el suelo (Potasio, Nitrógeno y Fósforo), el análisis de correlaciones presenta la necesidad de articular el Magnesio y el Calcio como dos variables más y de suma importancia debido a su influencia en el acolchonamiento de los suelos.

El prototipo definido presenta fortalezas y oportunidades que deben ser aprovechadas. No obstante, la propuesta carece de algunas características y funciones que pueden ser desarrolladas en trabajo futuro, como por ejemplo el diseño de una herramienta de software móvil y portátil que puede ser empleada directamente en el campo.

Los sistemas difusos tienen varias aplicaciones en el área de la agronomía y poder ser potenciados con tecnologías de la industria 4.0, vislumbran grandes oportunidades para el trabajo en temas abiertos de investigación.

Las entradas para el software de recomendación deben ser las características de los terrenos, así como también vincular las variables internas y externas establecidas previamente. Un posible software de recomendación debe tener almacenado los valores de las características del suelo a partir de un análisis previo y a partir de estos, se establecen las sugerencias para ofrecer una fertilización óptima y de mayor precisión con relación al mismo.

Como trabajo futuro se pretende considerar las variables externas (Variables climatológicas, rotación de base) que permitan la extensión del sistema hacia una aplicación de técnicas de aprendizaje con inteligencia artificial que garanticen una mayor precisión en la recomendación.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por el apoyo brindado en el desarrollo del proyecto de investigación “Construcción de un prototipo de software inteligente para la recomendación técnica en sistemas de fertilización precisa de suelos y praderas en ganadería de leche” presentado en la convocatoria interna del año 2020.

REFERENCIAS

- [1] Torres Roza, J. S. Protocolo sobre la atención del puerperio en el ganado bovino del complejo agroindustrial de Tizayuca en su estado actual, Hidalgo, México (Doctoral dissertation, Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ciencias de la Salud, Medicina Veterinaria y Zootecnia, Bucaramanga). 2020.
- [2] Rodas, J. L., Olivares, J., Galindo, J. A., & Benavides, D. Hacia el uso de sistemas de recomendación en sistemas de alta variabilidad. XXI Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos, 219, 65. 2020.
- [3] De, A., & Singh, S. P. (2021). Analysis of fuzzy applications in the agri-supply chain: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124577.
- [4] Vakilian, K. A., & Massah, J. (2017). A farmer-assistant robot for nitrogen fertilizing management of greenhouse crops. *Computers and electronics in agriculture*, 139, 153-163.
- [5] Heiß, A., Paraforos, D. S., Sharipov, G. M., & Griepentrog, H. W. (2020). Modelling and Simulation of a Fuzzy System for Site-Specific Nitrogen Fertilization. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 15790-15795.
- [6] Ashraf, A., Akram, M., & Sarwar, M. (2014). Fuzzy decision support system for fertilizer. *Neural Computing and Applications*, 25(6), 1495-1505.

- [7] Godinho, E. Z., de Lima Caneppele, F., & Gasparotto, H. V. (2022). Use of fuzzy logic to optimize fertilizer application on radish. *Trends in Horticulture*, 5(2).
- [8] Pezol, N. S., Adnan, R., & Tajjudin, M. (2020, June). Design of an internet of things (iot) based smart irrigation and fertilization system using fuzzy logic for chili plant. In *2020 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)* (pp. 69-73). IEEE.
- [9] Wang, H., Cheng, M., Zhang, S., Fan, J., Feng, H., Zhang, F., ... & Xiang, Y. (2021). Optimization of irrigation amount and fertilization rate of drip-fertigated potato based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation methods. *Agricultural Water Management*, 256, 107130.
- [10] Jaimes Cruz, L. J., & Correa Cardona, H. J. Balance de nitrógeno, fósforo y potasio en vacas Holstein pastando praderas de kikuyo (*Cenchrus clandestinus*) en el norte de Antioquia. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 11(2), 18-41. 2016.
- [11] Bagnato. Ejercitación en Python, aprendiendo machine learning. 2020. [Online] Available: <https://www.aprendemachinlearning.com/sistemas-de-recomendacion/>
- [12] Calvo Hernández, O.M. Estimación del costo de producción de un kilogramo de leche y sus variables más influyentes, *Rev. e-Agronegocios*, 7(2), p. 44 – 62. 2021. Doi: <https://doi.org/10.18845/ea.v7i2.5682>
- [13] Echeverri J., Aristizabal M., Moreno F. y Bedoya Alejandra (2012). Diseño de un sistema difuso para valoración de aportes en sistemas colaborativos. *Rev. ing. univ. Medellín* 11(20).



Jorge Eliecer Giraldo Plaza. Doctor en Ingeniería-Sistemas e Informática, Universidad Nacional de Colombia, Medellín 2019. Docente de tiempo completo Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1090-3070>.

Luis Fernando Londoño Franco. Doctor en Medicina- Salud Animal y Producción, Universidad de León-España, Universidad Nacional de Colombia. Docente de tiempo completo Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

Carlos Andrés Pérez Buelvas. Zootecnista y Magister en Gestión de la Producción Animal. Docente de cátedra Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

Eddie Yacir Álvarez Albanés. Ingeniero agropecuario. Docente de cátedra Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.