

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**SISTEMA DE DOSIS VARIABLE DE FERTILIZANTE PARA AGRICULTURA DE
PRECISIÓN**

Tesis

Que presenta **VLADIMIR MEJÍA HOLGUÍN**

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México, noviembre de 2023

SISTEMA DE DOSIS VARIABLE DE FERTILIZANTE PARA AGRICULTURA DE
PRECISIÓN

Tesis

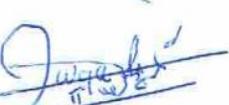
Elaborada por VLADIMIR MEJÍA HOLGUÍN como requisito para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas de Producción con la supervisión y
aprobación del comité de asesoría.



Dr. Martín Cadena Zapata
Director de Tesis



Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor



M.C. Juan Antonio López López
Asesor



M.C. Andrés Cadena Díaz
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila, México. noviembre de 2023

Dedicatoria

A mis padres Jaime Mejía Farías y María del Socorro Holguín Barraza por su apoyo y motivación en todos los proyectos que he realizado a través de los años, es un honor y una bendición ser su hijo, les agradezco de forma especial la educación que me dieron siempre dándome lecciones de vida que me han ayudado a crecer como persona y a luchar por alcanzar mis metas. Valoro mucho estar con ustedes compartiendo cada anécdota, emoción y experiencia, cada día somos más unidos, muchas gracias por todo su amor

A mis hijas Kelly Rachel Mejía Téllez y Allison Mejía Téllez, por llenar mi vida de amor y felicidad, me han enseñado a ser una mejor persona, valoro todos los recuerdos que tengo desde el día que nacieron. Ahora se encuentran en una etapa de su vida en la que los desafíos las esperan y las pruebas van llegar, recuerden que siempre podrán contar conmigo. Las quiero mucho y estoy agradecido de que sean mis hijas.

A mis hermanas y hermano Yadhira Mejía Holguín, Tania Mejía Holguín y Ulises Mejía Holguín, por el apoyo que me han dado en cada etapa de mi vida, gracias a ustedes nuestra infancia fue maravillosa, y ahora que somos adultos, es una bendición reunirnos para compartir lo que hacemos.

A mis profesores de maestría Dr. Martin Cadena Zapata, Dr. Alejandro Zermeño González, MC Juan Antonio López López y MC Andrés Cadena Díaz, gracias por sus enseñanzas y paciencia, todo lo que aprendí con ustedes ha hecho que me convierta en una mejor persona, mi educación no habría sido la misma sin ustedes.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres Jaime y María del Socorro para ustedes solo tengo palabras de agradecimiento pues lo dieron todo por mí. Estuvieron en los momentos más importantes y me han dado su apoyo incondicional.

Agradezco a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad de estudiar nuevamente después de tantos años de haber terminado la carrera, fue una experiencia de vida excelente volver a ser un alumno, lo cual tomó algunas semanas para acostumbrarme nuevamente.

Agradezco a mis maestros por todo lo que me han enseñado, me han hecho que me convierta en una mejor persona, les agradezco por ser compartir su experiencia, por instruirme y brindar sus conocimientos, así como su valiosa aportación para orientar este proyecto por buen camino.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por impulsar los estudios a nivel superior de los alumnos que tienen el interés de seguir estudiando, en particular el apoyo a estudios de posgrado con la beca otorgada con número 1147661 para la realización de este proyecto en la Maestría en Sistemas de Producción, perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, bajo la codirección del Doctor Martín Cadena Zapata director del departamento de Maquinaria Agrícola y el Doctor Alejandro Zermeño González, Jefe del programa.

Índice General

Dedicatoria	3
Agradecimientos.....	4
Indice General	5
Indice de Figuras	6
Indice de Cuadros	7
Resumen	8
Abstract	10
1. Introducción.....	12
1.1. Objetivo General	14
1.2. Objetivos específicos	14
1.3. Hipótesis.....	14
2. Revision de Literatura	15
3. Materiales y Metodos	22
4. Resultados y Discusión	35
5. Conclusiones	;Error! Marcador no definido.
6. Bibliografía.....	;Error! Marcador no definido. 39
7. Anexos.....	;Error! Marcador no definido. 42

Índice De Figuras

Figura 1	Ciclo de agricultura de precisión.....	16
Figura 2	Ubicación del taller de Maquinaria Agrícola.....	19
Figura 3	Mapa de prescripción	20
Figura 4	Green Star Rate Controller Dry	21
Figura 5	GPS StarFire™ Receiver	21
Figura 6	Interface GreenStar™ 2630	22
Figura 7	Interruptor de piso	22
Figura 8	Portal en línea myjohndeere.com	24
Figura 9	Pantalla principal Green Star Rate Controller Dry.....	26
Figura 10	Diagrama del equipo de tasa variable de fertilizante.....	27
Figura 11	Diseño experimental.....	29
Figura 12	Porcentajes de fertilizante faltante o en exceso entregado.....	34
Figura 13	Velocidad de respuesta del dosificador.....	34
Figura 14	Interacción entre los factores principales.....	35
Figura 15	Efecto de la combinación de tres velocidades de operación del tractor y cuatro dosis de aplicación del fertilizante	35
Figura 16	Error de aplicación del dosificador en tres velocidades de operación del tractor y cuatro de aplicación del fertilizante.....	36
Figura 17	Interacción entre los factores principales (velocidad de operación del tractor y la dosis de aplicación) en el error de aplicación del dosificador.....	36

Figura 18	Efecto de la combinación de tres velocidades de operación del tractor y cuatro dosis de aplicación del fertilizante.....	37
Figura 19	Creación de prescripciones.....	43
Figura 20	Nueva prescripción de zona.....	44
Figura 21	Creación de zonas.....	45
Figura 22	Enlazar zonas seleccionadas.....	45
Figura 23	Adición de fertilizante.....	46
Figura 24	Pantalla de inicio GreenStar™ 2630.....	46
Figura 25	Pantalla de documentación.....	47
Figura 26	Pantalla de manejo de transferencia de archivos.....	47
Figura 27	Pantalla de la aplicación de datos.....	48
Figura 28	Pantalla de documentación.....	48
Figura 29	Pantalla de documentación.....	49
Figura 30	Pantalla de prescripción.....	49
Figura 31	Pantalla de Conversión del Shapefile.....	50
Figura 32	Conversión del Shapefile.....	50
Figura 33	Conversión del Shapefile.....	51
Figura 34	Límite del área de trabajo y prescripción.....	52

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Tratamientos aplicados con el control de tasa variable de fertilizante ...	28
Cuadro 2. Resultados de las evaluaciones en lab en el sistema de dosificación ...	32

RESUMEN

SISTEMA DE DOSIS VARIABLE DE FERTILIZANTE PARA AGRICULTURA DE
PRECISIÓN

POR

VLADIMIR MEJÍA HOLGUÍN

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. MARTÍN CADENA ZAPATA - ASESOR

SALTILLO, COAHUILA NOVIEMBRE DEL 2023

Las aplicaciones tecnológicas son necesarias para producir alimentos, como la siembra de semillas, control de plagas, aplicación de fertilizantes, transportación, labranza, irrigación, cosecha, conservación y almacenaje

El implemento para realizar trabajos de fertilización y siembra está diseñado para trabajar con ciertos valores de dosificación que dependen del tipo de fertilizante que será utilizado, esto demanda una calibración diferente por cada aplicación. Se llevó a cabo una evaluación en el laboratorio de un sistema automático para dosis variable de fertilizante.

El sistema consta de una válvula de control EFC12 15 12, motor hidráulico, componente de GPS Star Fire™ 6000 Receiver, pantalla de interface GreenStar™ 2630, interruptor de piso, caja flexible de controlador de dosis GreenStar, arnés de conexiones, grupo de cables de cabina GreenStar y un interruptor maestro. El software para operar el sistema utiliza un mapa de prescripción de aplicación de fertilizante, que se elabora de acuerdo a las necesidades de sitio específico del terreno seleccionado. Se hizo una calibración del Sistema para dosificaciones de 141, 182, 221 y 228 kg/ha, el tipo de fertilizante fue triple 17 sólido marca Fertidel, el cual contiene una mezcla física de fertilizante (azufre al 18 % + magnesio 2 al %). La configuración del controlador de dosis se hace en el siguiente orden: Configuración de la sembradora 1. Configuración del apero, 2. Configuración del Sistema, 3. Configuración de alarmas. Configuración de productos del esparcidor 1. Configuración del producto, 2. Configuración de tolva para productos, 3. Revisión de resumen de productos. Calibración de la sembradora 1. Carga de tolva para calibración, 2. Prueba de calibración de tolva, 3. Calibración de límites de PWM. Funcionamiento del controlador de dosis seca Green StarTM – Sembradora. 1. Verificación de valores definidos por el usuario, 2. Funcionamiento de la tolva, 3. Activación y desactivación del Sistema, 4. Control de rendimiento del Sistema, 5. Limpieza de la tolva.

La calibración permite ajustar con precisión el funcionamiento del equipo de taza variable. Las pruebas realizadas dieron resultados del 0% a 10%, con una media de 3.3%. Las diferencias entre la cantidad establecida y la cantidad entregada fueron desde 0 hasta un valor máximo de -0.7 kg.

El sistema de control de dosis variable implementado en la sembradora, dio buenos resultados, el sistema permitió realizar una calibración precisa para fertilizante sólido. La sembradora mostró diferencias de dosificación al variar la velocidad del tractor durante las pruebas; en la mayoría de los casos los valores entregados fueron inferiores a los valores establecidos durante la calibración experimental.

Las pruebas realizadas en el equipo instalado en la sembradora, dieron como resultado un rango de datos significativos para la aplicación de fertilizante, el sistema mostró tener flexibilidad en un número de variables que están muy cercanas al rendimiento real en campo.

Las diferencias de dosificación se debieron principalmente a la variación de la velocidad del tractor. La velocidad de operación de 15 km/h del factor A, tuvo el tiempo de respuesta más corto de 3.4 segundos, comparado con los 6.7 segundos de la velocidad de operación de 5 km/h. La dosis de 228 kg/ha fue la que mejor desempeño tuvo con el tiempo de reacción más corto de 4.3 segundos, comparado con los 6.2 segundos de la dosis de 141 kg/ha.

Los resultados obtenidos en esta investigación abren la puerta para continuar estudiando el sistema de tasa variable, ya que esta tecnología tiene muchas aplicaciones prácticas y el campo de estudio es muy amplio. Los beneficios que da el aplicar diferentes cantidades de fertilizante en un mismo campo son muchos.

Se sigue avanzando en los conocimientos agronómicos, en el uso de datos georreferenciados, en el desarrollo de nuevas herramientas, ahora se trabaja en desarrollar la precisión y facilidad de uso, reduciendo así los costos de producción para el beneficio de los productores.

Palabras clave: entrega de fertilizante, calibración del esparcidor, configuración, mapa de prescripción de fertilizante.

Abstract

VARIABLE DOSES OF FERTILIZATION APPLICATION SYSTEM FOR
PRECISION AGRICULTURE

BY

VLADIMIR MEJÍA HOLGUÍN

MASTER OF SCIENCE IN PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING.

ANTONIO NARRO AGRARIAN AUTONOMOUS UNIVERSITY

DR. MARTIN CADENA ZAPATA – SENIOR ADVISOR

SALTILLO, COAHUILA NOVEMBER 2023

Technological applications are necessary to produce food, such as seed planting, pest control, fertilizer application, transportation, tillage, irrigation, harvesting, preservation, and storage

The machinery to carry out fertilization and planting work is designed to work with certain dosage values that depend on the type of fertilizer that will be used, this demands a different calibration for each application. An evaluation was done in the laboratory of an automatic system for variable doses of fertilizer.

The system consists of an EFC12 15 12 control valve, hydraulic motor, Star Fire™ Receiver GPS component, GreenStar™ 2630 interface display, floor switch, implement height switch, GreenStar flexible dose controller box, connection harness, GreenStar cabin cable group and a master switch.

The software to operate the system uses a fertilizer application prescription map, which is prepared according to the specific site needs of the selected terrain.

A calibration of the System was made for dosages of 141, 182, 221 and 228 kg/ha, the type of fertilizer was a triple 17 solid Fertidel brand, which contains a physical mixture of fertilizer (sulfur 18%, magnesium 2 to %). The configuration of the dry dose controller is done in the following order:

Seeder configuration 1. Implement settings, 2. System Configuration, 3. Alarm configuration. Configuring spreader products 1. Product configuration, 2. Hopper configuration for products, 3. Product summary review.

Seeder calibration 1. Hopper load for calibration, 2. Hopper calibration test, 3. Calibration of PWM limits. Operation of the Green Star™ dry dose controller – seeder. 1. Verification of user-defined values, 2. Hopper operation, 3. Enabling and deactivating the System, 4. System Performance Control, 5. Cleaning the hopper. Calibration allows a fine adjustment the operation of the variable dose equipment.

The tests performed gave results from 0% to 10%, with an average of 3.3%. The differences between the set quantity and the delivered quantity ranged from 0 to a maximum value of -0.7 kg. The variable rate control system implemented in the planter gave good results, the system allowed an accurate calibration for solid fertilizer. The

planter showed dosage differences when the tractor speed varied during the tests; In most cases, the values delivered were lower than the values established during the experimental calibration.

The tests carried out on the equipment installed in the planter resulted in a range of significant data for the application of fertilizer, the system showed flexibility in a number of variables that are very close to the actual performance in the field. The dosage differences were mainly due to the variation in tractor speed. The A-factor's 15 km/h speed had the shortest response time at 3.4 seconds. The dose of 228 kg/ha was the best performing with the shortest reaction time of 4.3 seconds.

The results obtained in this research open the door to continue studying the variable rate system, since this technology has many practical applications and the field of study is very broad. The benefits of applying different amounts of fertilizer to the same field are many. Progress continues to be made in agronomic knowledge, in the use of georeferenced data, in the development of new tools, now work is being done to develop precision and ease of use, thus reducing production costs for the benefit of producers.

Keywords: fertilizer dispensing, calibration, configuration.

Introducción

La aplicación de fertilizantes a tasa variable permite utilizar diferentes dosis de un producto en las distintas partes del campo de cultivo. La distribución del fertilizante dependerá del rendimiento planificado, de la fertilidad del suelo y de los factores que influyen en el cultivo.

Varias aplicaciones tecnológicas son necesarias para producir alimentos, como la siembra de semillas, control de plagas, aplicación de fertilizantes, transportación, labranza, irrigación, cosecha, conservación y almacenaje (Šarauskis *et al.*, 2020). La aplicación de nutrientes a tasa variable incrementa la eficiencia de la actividad agrícola comparada con la aplicación de tasas uniformes de fertilización, provee beneficios financieros y ambientales en el sistema de producción (Nawar *et al.* 2017). En condiciones en las que el terreno no es homogéneo, es de vital importancia la planeación de los trabajos a realizar en el campo para optimizar las operaciones y reducir los costos de producción entre estos la aplicación de nutrientes (Yezekyan *et al.*, 2021). La eficiencia de uso de nitrógeno se incrementó en 10 % al realizar un adecuado diagnóstico y aplicación de tasa variable del insumo (Argento *et al.*, 2021).

Las tecnologías de información ayudan a tomar decisiones adecuadas, que maximicen la producción, la economía y reduzcan el impacto ambiental. El terreno se maneja de acuerdo a las características del sitio específico, en lugar de considerar que todo el campo de cultivo es homogéneo, con ésta información se utilizan varias tecnologías para la adquisición de datos y se aplican los insumos de acuerdo a las necesidades de cada área del campo de cultivo (Paxton *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2017)

La Agricultura de Precisión (AP) tiene beneficios como reducir los costos aplicando los fertilizantes en cantidades y lugares requeridos, usando información de muestras de suelo y análisis del rendimiento, o gestionar los recursos hidráulicos, mejorando el rendimiento con recolecciones automatizadas (Mintert *et al.*, 2016). Al utilizar las tecnologías de la Información en la agricultura de precisión se obtiene información del campo de cultivo, permitiendo a los agricultores observar las variaciones temporales y espaciales en los terrenos agrícolas, simplificando la implementación de los tratamientos con una precisión mayor (Aubert *et al.*, 2012)

En el sitio específico, la AP es una herramienta ideal para trabajar en los cultivos, haciendo rentable la aplicación de insumos como semillas, fertilizantes, control de plagas y malezas trabajando con la información recabada en el terreno de cultivo (Xiao *et al.*, 2018).

En relación a los resultados del desempeño de tecnologías de aplicación a de tasa variable de fertilizantes, (Song *et al.*, 2021) cuantificaron una diferencia de 6.05% entre la descarga de fertilizante granulado y la cantidad establecida como objetivo en una aplicación de tasa fija aplicando desde un dron. Cuando la aplicación fue a tasa variable, las diferencias entre lo establecido (configurado) en el sistema y lo realmente aplicado fueron en un rango entre 4.5 % a 6.64%. Jafari *et al.*, (2010) midieron tiempos de respuesta para las transiciones de cambios de dosis en sembradoras fertilizadoras estos fueron de tasas menores a tasas mayores de 7.4 s y de tasas mayores a menores el tiempo de respuesta fue de 5.2 s. Por otra parte, Mirzakhaninafchi *et al.*, (2021), midieron un tiempo de respuesta de 3.49 a 4.90 s entre la detección de nitrógeno necesario y la descarga del fertilizante.

La tasa variable de fertilizante nos ayuda a trabajar en un sitio específico del cultivo optimizando la aplicación de fertilizantes, semillas, control de plagas y malezas. Una pregunta que nos podemos plantear es si el sistema de aplicación de tasa variable de fertilizante, trabaja en rangos aceptables de velocidad de operación y dosis recomendada. El objetivo general de este trabajo fue evaluar el desempeño bajo condiciones de laboratorio de un sistema de tasa variable de fertilizante para agricultura de precisión, a ser operado en base a mapas de prescripción.

La demanda de insumos en un sitio específico varía de acuerdo a las características heterogéneas del terreno. Existe poca información y desarrollo de tecnologías de tasa variable. En el presente trabajo se hizo una evaluación del desempeño bajo condiciones de laboratorio del sistema de tasa variable de fertilizante, para ser operado en base a mapas de prescripción. Como resultado se obtuvieron valores parecidos en ambos estudios para el coeficiente de variación.

Objetivos

General

Evaluar el desempeño bajo condiciones de laboratorio de un sistema de tasa variable de fertilizante para agricultura de precisión, a ser operado en base a mapas de prescripción.

Específicos

- Evaluar el desempeño del sistema de aplicación de tasa variable de fertilizante en el tiempo de respuesta a diferentes velocidades de operación y dosis de fertilizante
- Evaluar el desempeño del sistema de aplicación de tasa variable de fertilizante en el error de la aplicación de la dosificación de fertilizante a diferentes velocidades de operación y dosis recomendadas.

Hipótesis

El tiempo de respuesta del sistema de aplicación de tasa variable de fertilizante es menor a mayor velocidad de operación del tractor y mayor dosis de aplicación.

El error del sistema de aplicación de tasa variable de fertilización aumenta con la dosis de aplicación y la velocidad de operación del tractor.

Revisión De Literatura

Agricultura de precisión

Los alimentos tienen mayor demanda cada día, esto propicia la necesidad de aumentar el rendimiento en la producción agrícola, esto se puede lograr con el desarrollo de nuevas tecnologías que abarca agroquímicos con mayor eficiencia, variedades mejoradas, los cuales, con un manejo más adecuado, optimizan esta eficiencia. (Naresh *et al.*, 2012; Temizel *et al.*, 2012; Oliver *et al.*, 2013; Say *et al.*, 2018).

La agricultura de precisión es un concepto de gestión agrícola que utiliza técnicas digitales para monitorear y optimizar los procesos de producción agrícola. Tiene como objetivo optimizar la gestión de la producción agrícola teniendo en cuenta la variabilidad del suelo y del cultivo, mediante el uso de tecnologías que permiten ajustar las actividades agrícolas de acuerdo con los requisitos específicos del suelo y la planta. (Rodríguez *et al.*, 2022).

A finales de la década de los ‘80 y principios de los ‘90, cuando se dejó de restringir el Sistema de Posicionamiento Global por Satélite (GPS) para uso civil, se logró el desarrollo de equipos inteligentes que lograron el control localizado de los trabajos agrícolas.

Al conjunto de procesos y sistemas realizados se les llama Agricultura de Precisión (AP), sin embargo, ésta además de medir las variaciones en el suelo, también estudia la implementación de trabajos administrativos y tecnológicos que se hacen en función de la variabilidad del suelo. Así se define la Agricultura de Precisión como una forma integrada del manejo de la información en los campos agrícolas, que se basa en la variación en el espacio y tiempo de la unidad mínima del trabajo en la agricultura tradicional. (Bonilla *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2017; Bucci *et al.*, 2018).

En el presente, en muchos países, incluso en países en vías de desarrollo, estas tecnologías se identifican como industria 4.0, el desarrollo va con rumbo a la automatización de los procesos productivos incluyendo empaque, transporte y procesamiento. Algunas tecnologías sobresalen y otras se van agrandando y ganan presencia en la cadena productiva, como las nanotecnologías, que han reducido mucho los dispositivos electromecánicos, el big data, que facilita el análisis de información retroalimentada por

enormes bases de datos, otra tecnología es el aumento de la velocidad y ampliación del alcance de las ondas de radiofrecuencia con la tecnología 5G. Aparte de la agricultura estas tecnologías se están aplicando a muchos sectores económicos. (Foladori, G. 2022).

Sin embargo, los beneficios económicos que resultan de aplicar la AP solo se han demostrado a grandes escalas. En las granjas que generan altos ingresos, debido al costo de las tecnologías y al tiempo que tarda en recuperarse la inversión, lo cual ha limitado su implementación en granjas con producción mediana y pequeña.

Otra dificultad ha sido la mentalidad de algunos granjeros que se oponen a los cambios y dificultades que provoca el tener que adaptarse al uso de nuevas tecnologías (Quevedo *et al.*, 2006; Cullen *et al.*, 2013; Paustian *et al.*, 2017; Barnes *et al.*, 2019).



Figura 1. Ciclo de agricultura de precisión

Variabilidad del suelo

La tasa variable es un proceso en el que se optimiza el manejo agrícola en base a las propiedades del terreno que se va a cultivar. Con este manejo de suelo, se quiere acomodar la variabilidad de los trabajos agrícolas a la heterogeneidad de los recursos del suelo.

Los datos georreferenciados se obtienen mediante satélites que permiten observar la variabilidad espacial y temporal de los campos de cultivo, esto permite una mejora enorme en la aplicación de insumos al terreno de cultivo.

Los datos georreferenciados de las áreas de cultivo muestran diferentes tipos de variabilidad: topográficos, características del suelo, tipos de manejo, etc. Las diferencias de potenciales de rendimiento del lugar de cultivo, hacen factible la aplicación variable de los insumos (semillas, agroquímicos, fertilizantes, etc.). ésta aplicación variable de los recursos es una de las principales herramientas de la AP. (Bongiovanni *et al.*, 2006)

Mapas de diagnóstico y prescripción para determinar la necesidad de aplicación variable de fertilizantes.

El mapa de rendimiento es la representación gráfica de una serie de datos geo posicionados de rendimiento y humedad de granos obtenidos mediante una cosechadora equipada con un monitor de rendimiento y un receptor de sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) (Galán-Martín, 2011), produce información específica del rendimiento del cultivo y proporciona información para hacer el diagnóstico y poder hacer las correcciones para evitar bajo rendimiento en diferentes lugares del terreno. El sistema de monitoreo de rendimiento registra al mismo tiempo datos de rendimiento, humedad de los granos y posición, los datos esenciales necesarios para producir mapas de rendimiento.

Antes de tomar decisiones acerca del cultivo, es necesario tener las cartas de uso suelos precisas y actualizadas, este es un elemento muy importante para la buena planeación de los cultivos y los insumos que se van a aplicar.

La integración de herramientas del sistema de información geográfica (SIG), ortomosaicos digitales, mapas de base, y recorridos en los campos, se pueden señalar y contar las áreas con usos agropecuarios, la exactitud y confiabilidad de los resultados, son parte de un estudio que depende de la calidad de los recursos, métodos y herramientas de trabajo que se utilicen (Paredes *et al.*, 2011)

La agricultura de precision (AP) es una alternativa para optimizar la planeación y aplicación de insumos, utilizando herramientas que facilitan el análisis de datos georreferenciados y su obtención, de esta forma se hace un mejor diagnóstico y se aumenta la eficiencia al aplicar los insumos al cultivo. La aplicación de esta tecnología necesita un tiempo previo en el que se diagnostica cual va a ser el rendimiento, basándose en muestras obtenidas en el lugar de trabajo para conocer las variables limitantes de los cultivos. También se requiere la ubicación exacta de estas limitantes para poder obtener las prescripciones necesarias en el sitio específico (Salas, 2013)

Evaluaciones de sistemas de aplicación de tasa variable de fertilizantes.

A continuación, se citan varias investigaciones publicadas recientemente, en las que se aprecian resultados similares a los obtenidos en nuestro trabajo de investigación.

Alameen *et al.* (2019) evaluaron un sistema de aplicación de tasa variable de fertilizante granulado, los resultados fueron que la diferencia entre la tasa de aplicación deseada y la tasa realmente aplicada fue de más menos 2.6%

Tola *et al.* (2008), midieron una diferencia de más menos 5% en la tasa de fertilizante aplicado utilizando un sistema de aplicación variable en el tiempo de respuesta para los cambios de dosis fueron de 0.95 s a 1.90 s.

Song *et al.* (2021) cuantificaron una diferencia de 6.05% entre la descarga de fertilizante granulado y la cantidad establecida como objetivo en una aplicación de tasa fija aplicando desde un dron. Cuando la aplicación fue a tasa variable, las diferencias entre lo establecido

(configurado) en el sistema y lo realmente aplicado fueron en un rango entre 4.5 % a 6.64%

Khalid *et al* (2023) señalan que, dependiendo del tipo de actuador y mecanismo de dosificación, de fertilizantes sólidos, los sistemas de tasa aplicación de tasa variable, pueden tener una exactitud entre lo establecido y lo aplicado entre 94% a 98%

Mirzakhaninafchi *et al*, (2021), midieron un tiempo de respuesta de 3.49 a 4.90 s entre la detección de nitrógeno necesario y la descarga del fertilizante

Jafari *et al*, (2010) midieron tiempos de respuesta para las transiciones de cambios de dosis en sembradoras fertilizadoras estos fueron de tasas menores a tasas mayores de 7.4 s y de tasas mayores a menores el tiempo de respuesta fue de 5.2 s

Reyes *et al*, (2015), encontraron un error de 5.6% en la aplicación de fertilizante sólido basado en urea con un dosificador de tasa variable; el error disminuyó a 1.06% con otro tipo de fertilizante basado en producto de lenta liberación.

Yu *et al*, (2019), evaluaron un sistema dosificador de fertilizante a tasas acumuladas obteniendo un error en la aplicación de 4.88% mientras que en tasas de aplicación dinámicas el error bajo a 3.15%

Mirzakhaninafchi *et al*, (2022), evaluaron un sistema de aplicación de tasa variable de fertilizantes basado en sensores. El tiempo de respuesta del sistema fue en un rango de 3.53s a 4.93 s. El rango de error entre la cantidad objetivo de fertilizante y la tasa aplicada estuvo en un rango de 0.83% a 4.93%

Materiales Y Métodos

Ubicación y características del sitio del proyecto

El proyecto se llevó a cabo en los laboratorios y talleres del Departamento de Maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Las coordenadas geográficas son: 100°59'61" de longitud oeste, 25°23'39" de latitud Norte a una altitud de 1740 metros sobre el nivel del mar (msnm). El clima en el área es seco-árido, templado con temporadas de verano fresco, lluvias en verano y una precipitación media anual de 435 mm, el clima es extremoso con una temperatura media anual de 16.9°C.



Figura 2. Ubicación del taller de Maquinaria Agrícola.

Mapa de prescripción

Según Moltoni *et al.* (2015) el mapa de prescripción es el mapa del lote que nos indica donde no debemos aplicar el agroquímico y en qué dosis debemos hacerlo. El monitor de rendimiento es un sistema que colecta información que proviene de los sensores y mediante el software determina el rendimiento de un campo de cultivo en espacio y tiempo, utiliza la información de ubicación de cada campo que da el sistema de

localización satelital GPS. Los resultados obtenidos se muestran en un mapa gráfico (Evandro *et al.*, 2017)

Se trabajó con el software Agrian de John Deere en el sitio en línea www.myjohndeere.com, este software permite la gestión de datos antes de que el productor acuda al campo y después de la finalización de cada tarea. Se debe accesar la información en el sistema GreenStar™ para poder obtener datos del mismo.

Antes del trabajo en el campo, un productor puede configurar la información operativa en el centro de operaciones Agrian y guardar los datos en una memoria USB. Al insertar la memoria USB en la pantalla GreenStar, todos los menús asociados se rellenan automáticamente. Lo cual permite disminuir el tiempo de inactividad en el campo que hubiera tomado en introducir toda la información necesaria para el trabajo.

Al termino de las operaciones, el operador puede descargar la información de campo en el centro de operaciones AGRIAN. Al descargarse los datos, se pueden generar planos e informes, de modo que se puede visualizar fácilmente el impacto en la producción de las decisiones de gestión previas y las areas de mejora. El software ofrece la capacidad para analizar y mantener los datos de trabajos actuales e históricos.



Figura 3. Mapa de prescripción

Los pasos para la realización del mapa de prescripción se muestran de manera completa en el **ANEXO 1**.

Sistema Green Star Rate Controller Dry

El sistema Green Star Rate Controller Dry controla la aplicación de producto en sembradoras autopropulsadas y de tiro, así como los carros neumáticos (Spreader) (Deere & Company 2015). Está diseñado para trabajar con la información del implemento utilizando los límites, cobertura y sistemas de posicionamiento global GPS. El sistema controla el fluido hidráulico y motor hidráulico, basándose en la configuración de la pantalla Green Star™ 2360, velocidad del tractor, interruptor maestro, señales de velocidad de los sensores y el estado de los interruptores en la caja de control de interruptores. El interruptor maestro permite al operador apagar los contenedores o tanques en el sistema.



Figura 4. Green Star Rate Controller Dry

GPS StarFire™ Receiver modelo PCS161B877660

Este receptor utiliza satélites de navegación con corrección satelital StarFire™ para determinar la ubicación y dirección de trabajo de la maquinaria. Un módulo de compensación integrado al terreno (MCT) ajusta la posición de la maquinaria para

compensar el terreno disparojo. La activación de la señal de StarFire™ es necesaria para operar con el autopiloto, (Auto Trac™)



Figura 5. GPS StarFire™ Receiver

Pantalla de interface GreenStar™ 2630 Display modelo PCGU2UH589450

Esta pantalla es una interface que el operador utiliza para:

- Configurar y calibrar los componentes del sistema
- Monitorear el desempeño del sistema
- Hacer ajustes al sistema
- Programar el software (ver **ANEXO 2** para conversión del archivo Shapefile)
- Visualizar pruebas de diagnóstico



Figura 6. Interface GreenStar™ 2630

Interruptor de piso

Se utiliza para activar y desactivar el interruptor maestro



Figura 7. Interruptor de piso

Motor hidráulico modelo CMM100 - 4HP

El motor hidráulico es un elemento mecánico que transforma la presión hidráulica y flujo hidráulico en un par de torsión haciendo un desplazamiento en rotación. El funcionamiento es al contrario de las bombas hidráulicas.

Válvula de control modelo EFC12 15 12

Esta válvula permitió el control del fluido hidráulico hacia el motor, se compara con un agujero de área continuamente variable, que cambia la pérdida de carga, de acuerdo con la señal del control de tasa variable. Esto permitió el control del caudal y por lo tanto el control de las variables del proceso por ejemplo: presión, nivel y temperatura

Tractor John Deere, 6403

De 96 HP, con una potencia nominal de 90 Hp, flujo hidráulico de 50 l/min (13,2 gal) presión de salida del sistema hidráulico de 190 bar.

Sembradora-fertilizadora

La sembradora es marca John Deere MaxPlanter Plus 1030 de 4 hileras. La sembradora tiene un eje que se conecta por transmisión mecánica a los engranes que mueven los dosificadores de fertilizante. Tiene dos tanques de almacenamiento de fertilizante de polietileno de alta densidad de 150 L cada uno, cada tanque tiene un dosificador sifón para granulado seco con 2 tomas de bajada de fertilizante cada uno; la separación entre líneas es de 15.8 cm, el ancho de trabajo es de 3.25 m y el ancho de aplicación de 2.37 m. El mando para el sistema de vacío, se genera con una bomba hidráulica conectada a la toma de fuerza del tractor.

Fertilizante Triple 17

Fertilizante marca FertiDel 17–17–17, Azufre 18%, Magnesio 2%, elaborado por Agro formuladora Delta S.A. de C.V.

La recomendación proporcionada por el laboratorio Fertilab fue de cuatro dosis de fertilizante sólido triple 17 de nitrógeno; estas dosis fueron:

- 141 kg/ha
- 182 kg/ha
- 221 kg/ha
- 228 kg/ha

Antena JDLink™

Es un sistema telemático de John Deere, se diseñó para aumentar la eficiencia y productividad de los equipos, trabajando en la oficina. Se puede supervisar el funcionamiento en tiempo real sin estar en campo con los equipos. Con JDLink™, el productor y los administradores pueden incrementar la productividad y el tiempo de

operación, así como reducir los costos. Se accede a JDLink™ desde una laptop o dispositivo móvil.

Las conexiones de JDLink™ hacen una transmisión automática de datos de campo y maquinarias, a la aplicación John Deere Operations Center™, lo que hace que estén visibles y sean de utilidad al usuario. Con la conexión JDLink™ se estuvo conectado en todo momento con el trabajo que se realizó, pudiendo hacer ajustes si se requerían.

JDLink™ permite la conexión con:

El concesionario: se puede contar con la asistencia remota con concesionario que ayuda a la monitorización remota del estado de las maquinarias, con servicio de reparación, capacitación y datos útiles.

Los equipos: se obtiene información del estado y la productividad de sus equipos. Gracias al acceso a la monitorización de las maquinarias desde cualquier lugar, se puede evitar o minimizar las interrupciones en el trabajo, resolver problemas y permitir que el flujo continuo de las operaciones en campo.

Las operaciones: se puede confiar en la información que se obtiene en la cuenta de John Deere Operations Center™. Al recolectar información con las operaciones, se obtiene acceso a datos sobre el rendimiento anterior, el progreso actual y los planes a futuro.

Los asesores: se puede intercambiar información con asesores que ayudarán a tomar buenas decisiones.

Software en línea myjohndeere.com

En la figura 2 se observa el portal en línea myjohndeere.com que permite gestionar, ver, analizar, archivar y compartir información agronómica de los campos de cultivo. El portal incluye acceso remoto al monitor y transferencia inalámbrica de datos.

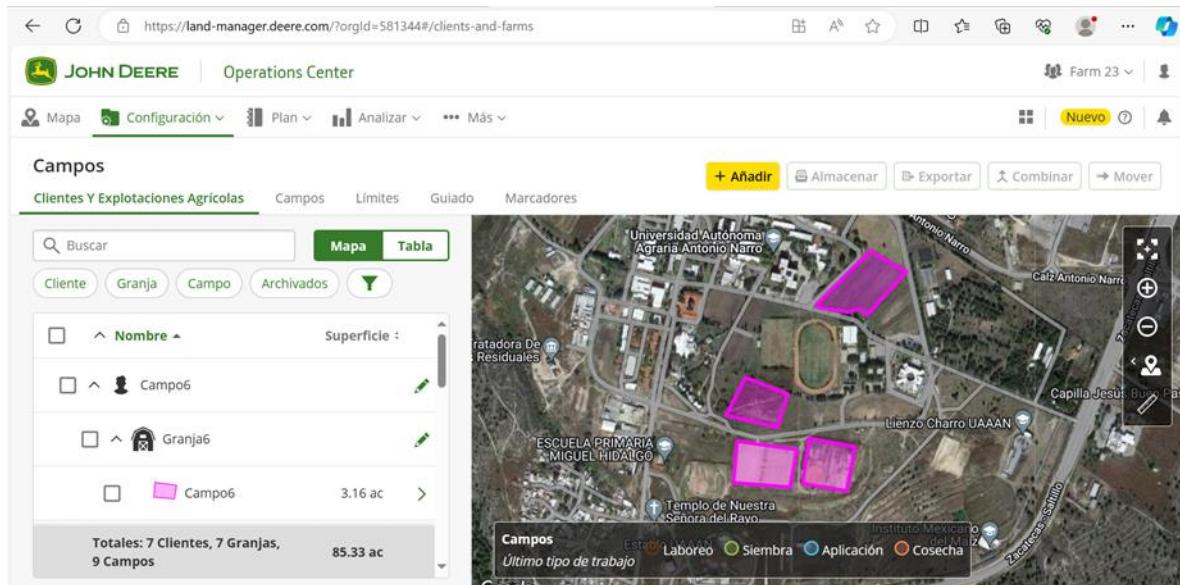


Figura 8. Portal en línea myjohndeere.com

Teoría de la operación

El controlador de velocidad GreenStar™ Dry trabaja con la pantalla GreenStar™ 2630 para integrar y controlar los esparcidores de dosis seca autopropulsados y de tipo pull. El controlador elimina la necesidad de un control separado para operar el equipo de dosis seca. El controlador se configura como una sola sección del implemento, que abarca el ancho de trabajo completo del implemento. El esparcidor utiliza la anchura y velocidad de la máquina para determinar la cantidad de terreno cubierto.

El controlador se puede configurar para esparcir semillas o productos fertilizantes. Cada producto se define en la memoria del controlador mediante un nombre, unidades de aplicación, densidad, ancho de extensión, velocidad de giro, y marco giratorio. En seguida se le asigna un producto específico que aplica el instrumento.

El controlador regula la válvula de cierre rápido y la PWM. Ambos tipos de válvulas controlan el flujo de aceite o un motor eléctrico que se utiliza para impulsar el fertilizante. Los sistemas de medición y entrega de productos están configurados para los tipos de válvulas específicos. La calibración de la válvula de control, el número en cada válvula se puede ajustar para un producto adecuado.

Durante la operación, los dos tipos de válvulas se pueden accionar con el sistema de dosificación del producto. Ambos tipos de válvulas se cierran para detener la medición del producto cuando el controlador ordena a la dosificación que se detenga.

Los contenedores de productos son configurados para su capacidad, funcionalidad del commutador de nivel de contenedor, capacidad de contenedor de micronutrientes y configuración del sensor de velocidad. La capacidad del contenedor se calcula utilizando una capacidad de contenedor a tope, que es el volumen máximo de producto que el deposito puede contener cuando se carga.

Pantalla principal Control de Tasa Variable

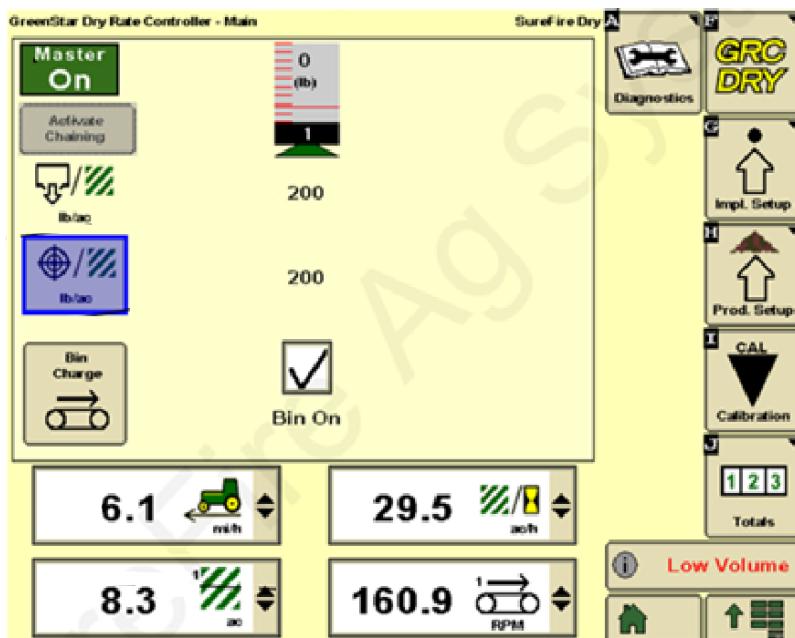


Figura 9. Pantalla principal Green Star Rate Controller Dry

La pantalla GreenStar™ 2630 se instaló en la cabina del tractor, el sensor GPS se instaló en el techo del tractor, esta pantalla calibra y configura los componentes del Sistema, monitorea el desempeño, hace ajustes, programa el software y realiza pruebas. El arnés de

conexiones, se instaló en la sembradora, este se utilizó para conectar los controles del implemento John Deere™ GreenStar™, como el Rate Controller Dry y el GPS StarFire™, a un sistema integrado. Esta instalación permitió la flexibilidad basado en el tipo de implemento, el sensor de rotación se conectó al eje de los depósitos de fertilizante.

Se usó el software de la compañía John Deere, en el portal www.myjohndeere.com se hicieron las prescripciones, compatible con el microcomputador y los distintos formatos de archivos de sistemas de información geográfica (SIG). Se delimitó el campo experimental para realizar el experimento, se configuró el fertilizante utilizado, fertilizante sólido triple 17, se dividió el terreno en 12 secciones y se asignó una dosis a cada zona, con esta información se generó el mapa de prescripción de dosis variable para fertilización, y se generó un archivo Rx para exportar mediante una memoria a la pantalla instalada en el tractor.

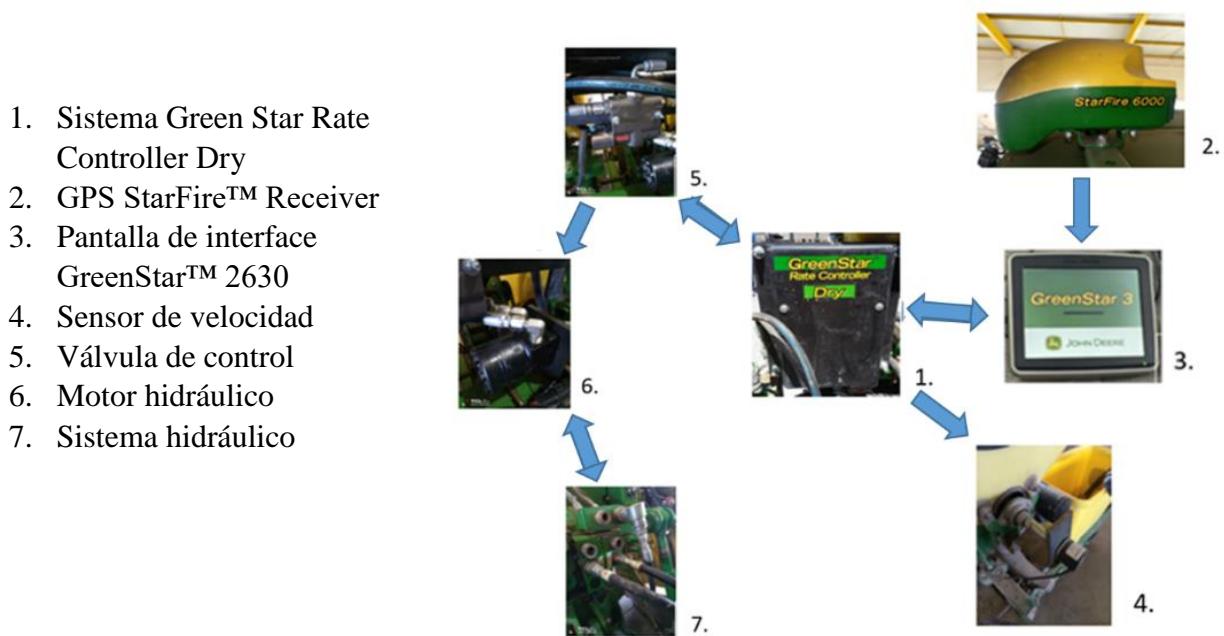


Figura 10. Diagrama esquemático del equipo de tasa variable de fertilizante

Sistema tractor-fertilizadora

La sembradora tiene un eje que se conecta por transmisión mecánica a los engranes que mueven los dosificadores de fertilizante. Tiene dos tanques de almacenamiento de fertilizante de polietileno de alta densidad de 150 L cada uno, cada tanque tiene un dosificador sinfín para granulado seco con 2 tomas de bajada de fertilizante cada uno; la separación entre líneas es de 15.8 cm, el ancho de trabajo es de 3.25 m y el ancho de aplicación de 2.37 m. El mando para el sistema de vacío, se genera con una bomba hidráulica conectada a la toma de fuerza del tractor.

La sembradora está diseñada para una regulación de dosis de fertilizante mediante combinación de piñones entre eje motriz, eje solidario y eje dosificador, permitiendo una regulación entre 50 a 947 kg ha^{-1} de fertilizante según la combinación empleada. Al realizar las evaluaciones, el GPS dio la posición y velocidad del tractor a la pantalla 2630, al mismo tiempo el sensor de velocidad de rotación del eje de la tolva indicó la velocidad de giro del eje dosificador; con esta información el microcomputador produjo la dosis instantánea con el mapa de prescripción, así se realizó el control automático de la velocidad del motor hidráulico conectado al eje dosificador.

Diseño experimental

En la sección de pruebas se realizó el experimento; se realizaron 12 tratamientos con 3 repeticiones cada uno para un total de 36 unidades experimentales. El cuadro 1 hace referencia al diseño experimental.

Para el análisis estadístico se utilizó un diseño completamente al azar en parcelas divididas, la parcela mayor consistió en 3 velocidades del tractor; 5, 10 y 15 km/h, la parcela menor fue el fertilizante deseado: 141, 182, 221 y 228 kg/ha.

Las variables fueron: Tiempo de reacción, cantidad de fertilizante real (kg/ha), y diferencia entre el fertilizante establecido y el fertilizante aplicado.

Estas pruebas se realizaron en laboratorio, con los resultados se realizó el análisis estadístico, se obtuvo la desviación estándar, error estándar, varianza, media, valores mínimos, valores máximos y coeficiente de variación, para las pruebas realizadas

Se utilizó el sistema Statistical Analysis System (SAS) y el software estadístico R. Los resultados se compararon en la prueba de medias de Tukey (≤ 0.05). En el cuadro 1 se observan los tratamientos aplicados con el control de tasa variable de fertilizante sólido en campo, el factor A es la velocidad del tractor y el factor B es la cantidad de fertilizante establecido

Cuadro 1. Tratamientos aplicados con el control de tasa variable de fertilizante sólido en campo.

Número de Tratamiento	Factor A Velocidad del tractor (km/h)	Factor B Cantidad de fert establecido (kg/ha)
1	5	141
2	5	182
3	5	221
4	5	228
5	10	141
6	10	182
7	10	221
8	10	228
9	15	141
10	15	182
11	15	221
12	15	228

La figura 11 muestra un diagrama esquemático el diseño experimental en el campo, se realizaron 12 tratamientos con 3 repeticiones por cada tratamiento, lo cual dio un total de 36 unidades experimentales.

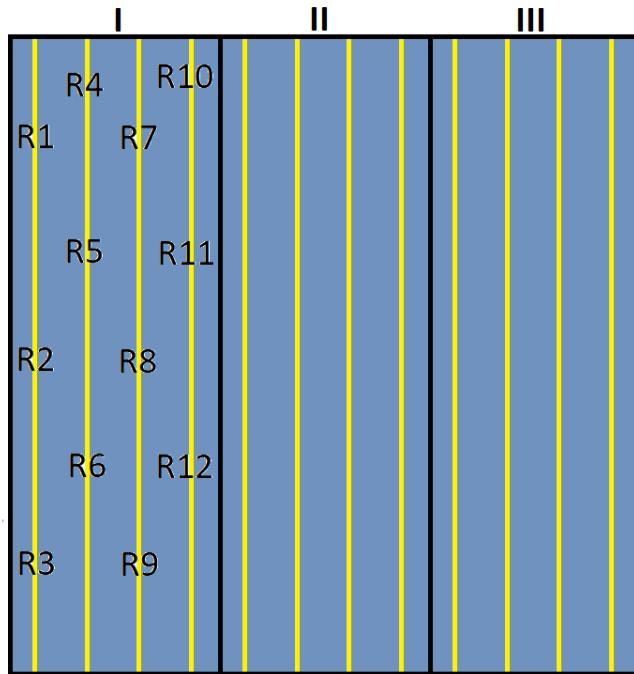


Figura 11. Diseño experimental

Calibración manual

Se realizaron pruebas de laboratorio para determinar la dosificación real del sistema, se usaron recipientes de plástico para colectar el fertilizante dispensado situados en las cuatro bajadas de fertilizante eligiendo una combinación de piñones indicada por el fabricante, las cantidades de fertilizante triple 17 deseadas fueron de 141, 182, 221 y 228 kg ha^{-1} , con una velocidad de siembra en laboratorio de 5, 10 y 15 km hr^{-1} . Se realizaron 12 tratamientos con 3 repeticiones cada uno para obtener la diferencia del fertilizante deseado y el fertilizante real obtenido. El contenido de los botes de plástico se pesó y se restó del peso de cada bote, se usó una balanza Soehnle (0.2 g precisión).

Configuración del controlador de dosis seca

Configuración de la sembradora: en la configuración del apero se determinó el implemento con el que se trabajó, en este caso la esparcidora remolcada, el nombre del apero es Sembradora y el número de tolvas es 1.

Configuración del Sistema: primero se configuró el sistema del depósito, se seleccionó el tipo de válvula de control del dosificador, la válvula de pulsos PWM, la calibración de la válvula de control de dosificador fue de 5023, para la calibración del sensor la velocidad del dosificador el valor se dividió en 4 cuadrantes, con valores de 360, 180, 90 y 0, mediante prueba y error se determinó que el valor que mejor controla la velocidad del sistema es 90, la capacidad del depósito es de 0.2 m³ y se seleccionó el interruptor de nivel del depósito.

Configuración de alarmas: enseguida la sección de alarmas permitió definir las alertas para el índice de aplicación y nivel bajo de tolva. Para este trabajo, se fijaron en 20% para el índice de aplicación.

Configuración de aplanamiento (Display smoothing) (Deere & Company 2015) de dosis: por último, se configuró el aplanamiento de la dosis, los porcentajes de aplanamiento varían de 3 a 15%, un valor inferior implica mayor sensibilidad y valores mayores implican menos sensibilidad, en nuestro caso trabajamos con el 3%.

Configuración de productos del esparcidor: en la pestaña de información del producto se agregó el nombre de fertilizante, las unidades fueron kg, la densidad del producto se determinó con la fórmula de la densidad del fertilizante (1), el cual dio 1243 kg/m³, el modo de dosis fue manual, la velocidad deseada del ventilador se obtuvo del manual del operador, se fijó en 900 rpm, el incremento de dosis manual fue 0.

$$d = m/V \quad (1)$$

Donde:

d = densidad del fertilizante

m = masa

V = volumen

Configuración del depósito del producto: para configurar el depósito, se agregó el nombre del producto, la apertura de la compuerta de distribución fue de 5 cm, el valor del CFR (es la cantidad de producto aplicado en una revolución de la tolva, en cubic feet / revolution) se determinó con la calibración del mismo.

Resumen del producto: en esta pestaña se encontró un resumen con la información del producto, se habilitó el depósito, se configuró el nombre del producto, la densidad del producto, el CFR y el modo de la dosis.

Calibración del esparcidor: aquí se cargó la tolva para calibración, los dos tanques del depósito se llenaron con 4 bultos de fertilizante triple 17 cada uno, se calibraron los límites de la válvula de pulsos PWM, se activó el interruptor maestro y se presionó el botón de inicio, el límite inferior se fijó en 20 rev/min y el límite superior se fijó en 180 rev/min.

Funcionamiento del controlador de dosis seca: se verificaron los niveles de los dos tanques del depósito en la pantalla y el nivel real en las tolvas para obtener la prescripción. Se verificaron las dosis deseadas y se verificó que los depósitos estuvieran habilitados.

Control de dosis: se seleccionó el modo de control de dosis basado en mapas. Así se visualizó la prescripción (Rx) en la casilla de verificación de la tolva.

Carga de tolva: se pulsó el botón carga de tolva para visualizar la ventana. Se mantuvo pulsado el botón carga de tolva en la ventana emergente para poner el transportador en marcha y llevar producto al rotor. Se activaron el rotor y la tolva para que entregaran el producto seleccionado en las casillas de verificación.

Informes y totales: se seleccionó la tecla programable de informes y totales para mostrar los totales almacenados en el controlador. La pestaña de corriente mostró los totales de superficie cubierta, el total de fertilizante aplicado y las unidades usadas por el apero que se seleccionó.

Resumen de trabajos: esta página mostró un registro de los totales de los trabajos realizados. Los valores del resumen de trabajo realizado fueron aumentando a medida que se realizó el trabajo. El resumen de trabajo se guardó en el controlador. El controlador

puede guardar hasta 6 trabajos diferentes para cada configuración. Los trabajos que no se necesitaron se borraron.

Vida útil: la pestaña de vida útil lleva un registro de todos los totales a través de la vida útil del apero seleccionado. En esta pestaña se determinaron las unidades.

Diagnóstico del esparcidor: las funciones de diagnóstico se dividen en dos secciones: indicaciones y pruebas. La opción de indicaciones nos dio la opción de ver los números de partes y series de hardware y software del equipo.

Indicaciones del sistema de entrega: el ciclo de trabajo de la válvula de pulsos PWM es un número que representó la posición de la válvula de control de cierre por PWM en la que se trabajó. Mientras estuvo funcionando, el número se encontró entre los valores de los límites superior e inferior actuales.

Indicaciones de voltajes del sistema: en esta sección se encontró la alimentación de la ECU (unidad de control eléctrico), de los sensores y de las válvulas. Cuando la alimentación de las válvulas no se conectó, el parámetro de la válvula indicó “ninguna”.

Indicaciones de parámetros de trabajo: aquí se mostró la anchura de trabajo y la velocidad.

Indicaciones de interruptores/estados. Se encontró un menú desplegable de selección de indicaciones, el estado del interruptor principal y el estado del interruptor de nivel de la tolva

Limpieza de tolvas: para realizar la limpieza de tolvas, se procedió de la siguiente manera: se desactivó el rotor y se dejó que la velocidad bajara hasta cero, se seleccionaron las tolvas que se limpiaron, se activó el interruptor maestro, se pulsó el botón iniciar, se activaron y desactivaron las tolvas por medio de las casillas de verificación.

Prueba de válvula de control: esta fue una prueba visual para verificar si las válvulas de control para las correas del transportador y los rotores funcionan correctamente, se realizó sin producto en las tolvas, se desactivó el rotor y se dejó que la velocidad disminuyera a cero, se seleccionó la tolva de la lista, se activó el interruptor maestro, se pulsó el botón iniciar, se mantuvo pulsado el botón + o – para accionar la válvula de control.

Pruebas: la prueba del CFR, consistió en establecer la densidad del producto con la formula $d = m/V$, mencionada con anterioridad, las velocidades fueron de 5,10 y 15 km/h, las dosis de las pruebas en kg/Ha se establecieron con los valores recomendados por el laboratorio Fertilab, se utilizó 141, 182, 221 y 228 kg/Ha, el peso real debe estuvo muy cerca de los valores deseados de la dosis de la prueba.

Pruebas de calibración del esparcidor

Esta prueba tiene la finalidad de establecer los parámetros con los que va a trabajar el sistema y consiste en lo siguiente: se fijó la densidad del producto en 1243 kg/m³, obtenida con la formula (1); la apertura de la abertura fue de 5 cm, el CFR esperado fue de 0.1043, las velocidades fueron de 5,10 y 15 km/h, la tasa de la prueba y el peso deseado se variaron para poder cumplir con el rango de la prueba de 10 segundos a 10 minutos.

Resultados Y Discusión

En el cuadro 2 se observa el número de repeticiones hechas en la prueba de laboratorio, la cantidad establecida de fertilizante y la cantidad entregada. La última columna nos muestra la diferencia en kilos, los valores de variación dieron resultados del 0% a 10%, con una media de 3.3%. Las diferencias entre la cantidad establecida y la cantidad entregada fueron desde 0 hasta un valor máximo de -0.7 kg.

Cuadro 2. Resultados de las evaluaciones en laboratorio en el sistema de dosificación.

Repeticiones	Cantidad establecida (kg)	Cantidad entregada (kg)	Diferencia (kg)
1	7.5	7	-0.5
2	7.5	7.1	-0.4
3	7.5	7.7	0.2
4	7.5	7.5	0
5	7.5	6.8	-0.7
6	7.5	7.2	-0.3
7	7.5	7.4	-0.1
8	7.5	7.3	-0.2

Las pruebas realizadas al control de tasa variable de fertilizante sólido consistieron en 12 tratamientos con tres repeticiones cada uno, las constantes fueron: la velocidad del tractor de 5, 10 y 15 km/h, y el fertilizante deseado fueron 141, 182, 221 y 228 kg/Ha.

Las variables fueron: Tiempo de reacción, cantidad de fertilizante real (kg/ha), y diferencia entre el fertilizante establecido y el fertilizante aplicado. Estas pruebas se realizaron en laboratorio, con los resultados se realizó el análisis estadístico, se obtuvo la desviación estándar, error estándar, varianza, media, valores mínimos, valores máximos y coeficiente de variación, para las pruebas realizadas. Se utilizó el sistema Statistical

Analysis System (SAS) y el software estadístico R. Los resultados se compararon en la prueba de medias de Tukey (≤ 0.05).

En la figura 12 se observa el comportamiento de los porcentajes de fertilizante en la salida de la fertilizadora con respecto a lo establecido, se observa que la mayoría de las pruebas hubo un balance negativo, excepto en la repetición 3, que tuvo balance positivo y la repetición 4 que tuvo balance neutro.

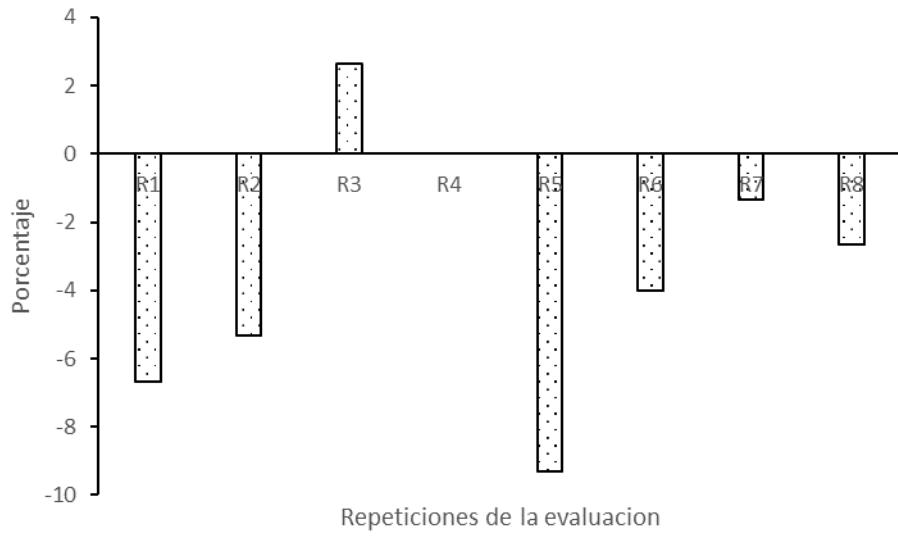


Figura 12. Porcentajes de fertilizante faltante o en exceso entregado a la salida de la fertilizadora con respecto a lo establecido en la configuración del Sistema en el monitor.

En la figura 13 se observa que, para cualquier dosis de aplicación de fertilizante, el tiempo de respuesta del dosificador decrece a medida que aumenta la velocidad de operación del tractor (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Mientras que, para cualquier velocidad de operación del tractor, el tiempo de respuesta en la dosis de 228 kg/ha es menor que en las dosis de aplicación de 182 y 141 kg/ha (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

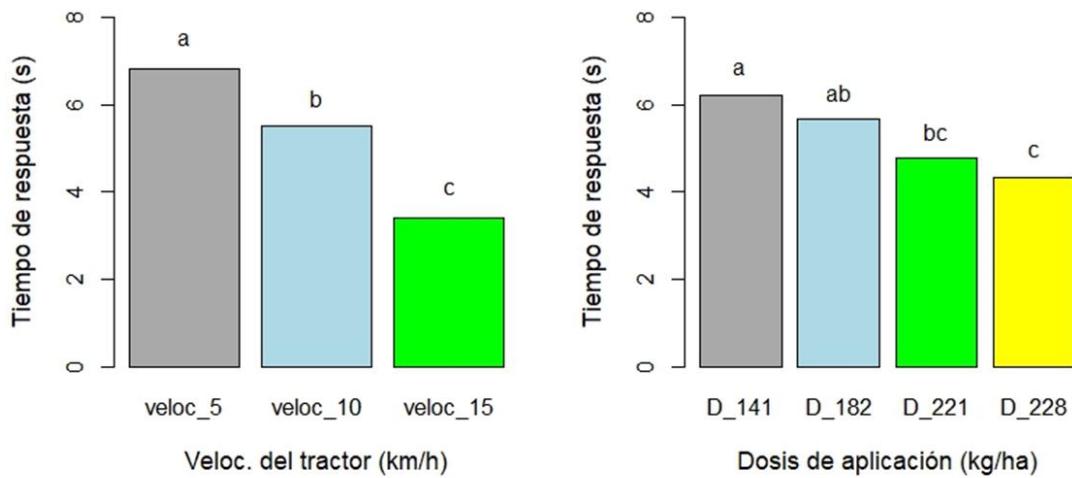


Figura 13. Velocidad de respuesta del dosificador en tres velocidades de operación del tractor y cuatro dosis de aplicación del fertilizante.

En la figura 14 se observa que, la amplitud de las diferencias del tiempo de respuesta en las tres velocidades de operación del tractor es mucho menor en la dosis de aplicación mayor (228 kg/ha) que la amplitud observada en la dosis de menor aplicación (141 kg/ha). El decremento del tiempo de respuesta del dosificador a medida que se incrementa la dosis de aplicación es mayor en la velocidad de operación de 5 km/h del tractor que el observado en las velocidades de 10 y 15 km/h.

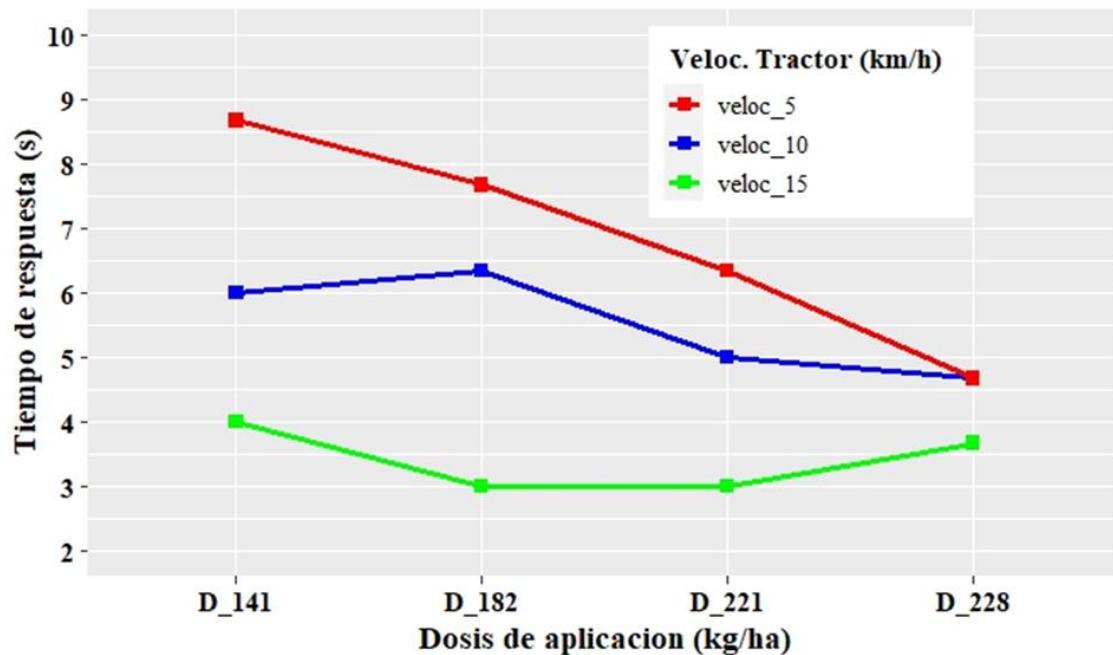


Figura 14. Interacción entre los factores principales (velocidad de operación del tractor y la dosis de aplicación) en el tiempo de respuesta del dosificador.

En la figura 15 el tiempo de respuesta del tratamiento uno (5 km/h y 141 kg/ha) (menor velocidad de operación del tractor y menor dosis de aplicación del fertilizante) fue igual al del tratamiento dos (5 km/h y 187 kg/ha), pero mayor al del resto de los tratamientos.

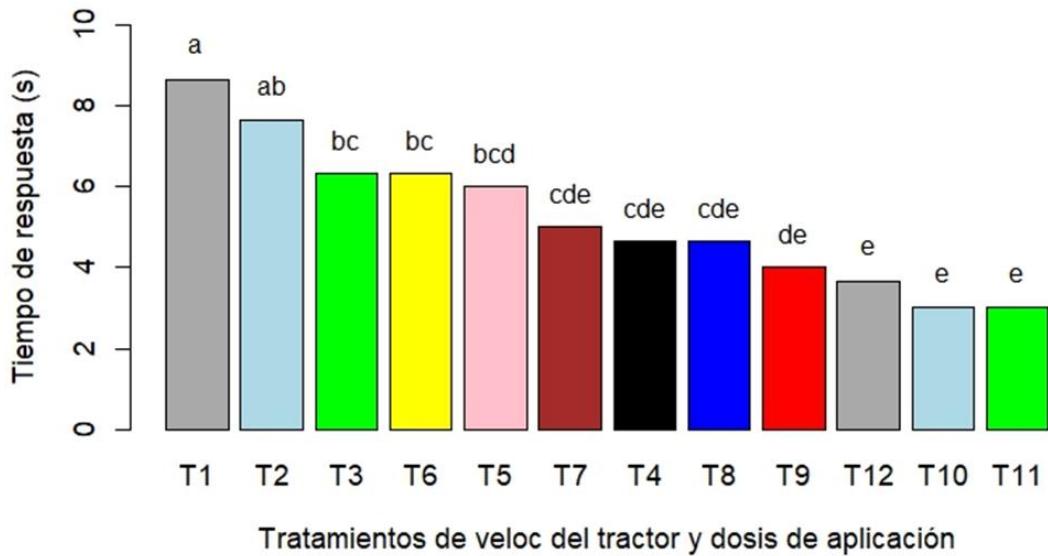


Figura 15. Efecto de la combinación de tres velocidades de operación del tractor y cuatro dosis de aplicación del fertilizante (12 tratamientos) en el tiempo de respuesta del dosificador. Medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

En la figura 16, para cualquier dosis de aplicación del fertilizante, el error de aplicación del dosificador es mayor a la velocidad de operación del tractor de 10 Km/h, el error decrece a la velocidad de 5 Km/h y es menor a la velocidad de 15 Km/h (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Mientras que, para cualquier velocidad de operación del tractor, el error de aplicación es mayor en la dosis de aplicación más alta (228 kg/ha) y menor en la de menor dosis de aplicación (141 kg/ha) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

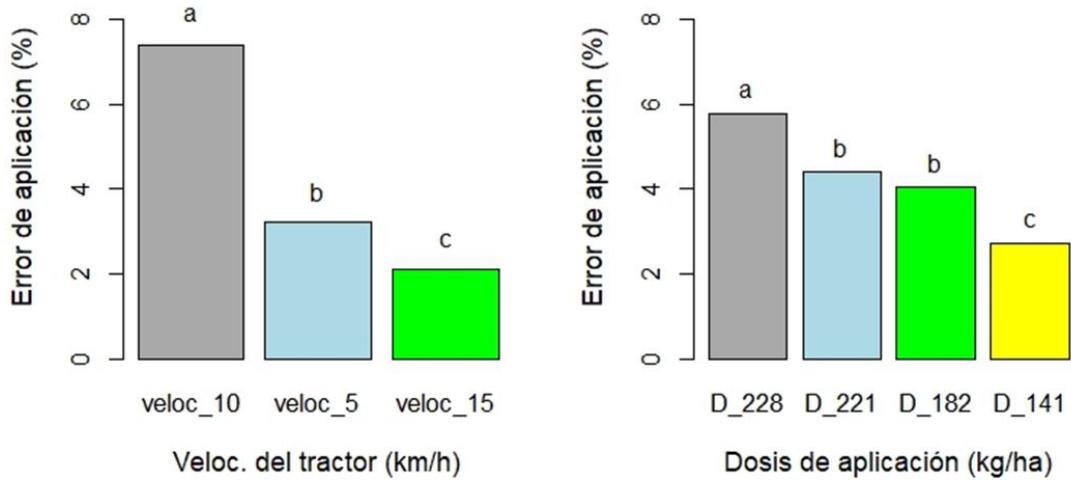


Figura 16. Error de aplicación del dosificador en tres velocidades de operación del tractor y cuatro de aplicación del fertilizante.

En la figura 17 se observa que, la diferencia en el error de aplicación del dosificador en las velocidades de operación de 5 Km/h y 15 Km/h es pequeña en las dosis de aplicación del fertilizante de 141, 182 y 228 kg/ha, pero es apreciablemente menor en la velocidad de 15 Km/h en la dosis de aplicación de 221 Kg/ha.

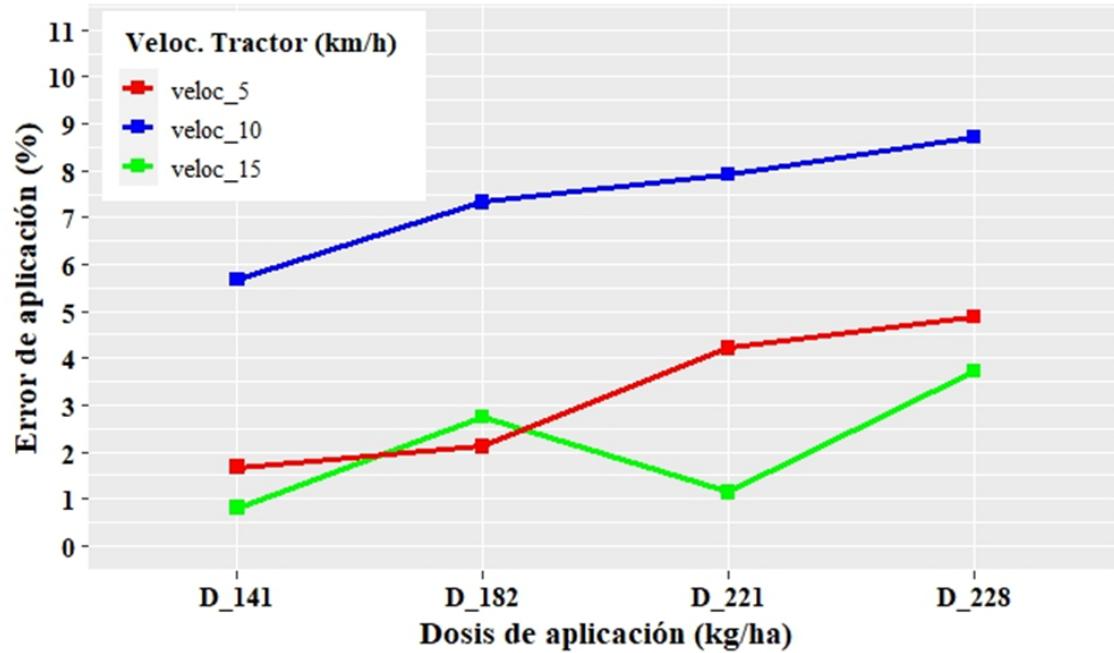


Figura 17. Interacción entre los factores principales (velocidad de operación del tractor y la dosis de aplicación) en el error de aplicación del dosificador.

En la figura 18, el error de aplicación del dosificador fue igual en los tratamientos T6, T7 y T8 (10 km/h y 182 Kg/ha, 10 km/h y 221 Kg/ha, 10 km/h y 228 Kg/ha respectivamente) y a su vez mayor que el resto de los tratamientos (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Aunque, el tratamiento T6 también fue igual al T5 (10 km/h y 141 Kg/ha).

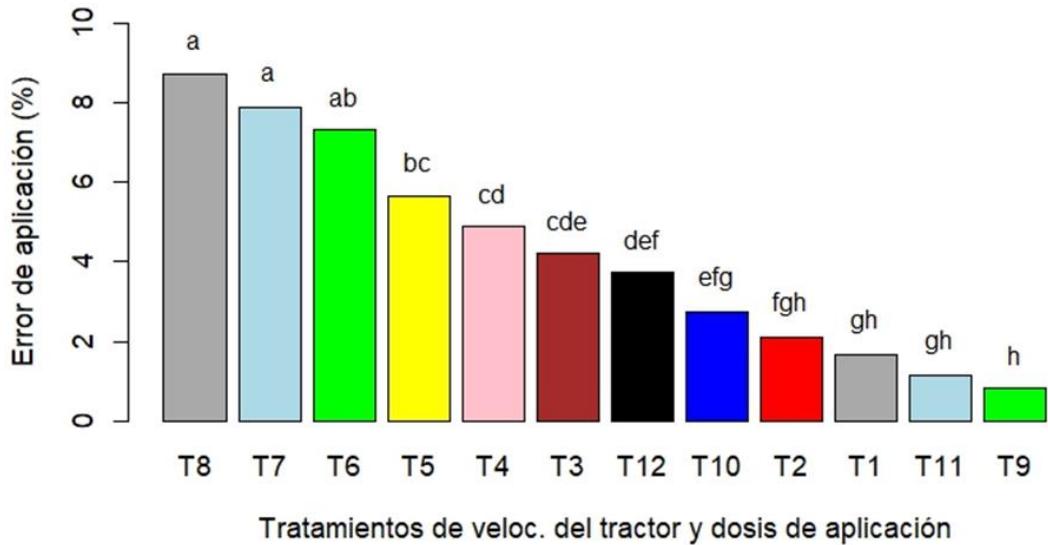


Figura 18. Efecto de la combinación de tres velocidades de operación del tractor y cuatro dosis de aplicación del fertilizante (12 tratamientos) en el error de aplicación del dosificador. Medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Las variables fueron: el tiempo de reacción, la cantidad de fertilizante real en kg/ha y la diferencia entre el fertilizante establecido y el fertilizante entregado. Estas pruebas se realizaron en campo, con los resultados se realizó un análisis de desviación estándar, error estándar, varianza, media, valores mínimos, valores máximos y coeficiente de variación, para las pruebas realizadas Se utilizó el sistema Statistical Analysis System (SAS) y el software estadístico R.

Discusión

Haciendo una comparación con el trabajo denominado Variable-rate control system for UAV-based granular fertilizer spreader (Computer Electronics in agriculture, vol 182, January 2021, 205832) con una variación en la dosificación de 6.07% a 0.72 ha/hr.

Otra comparación fue con el trabajo denominado Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application (Ahmed A. Alameen *et al* 2019) Con una velocidad de 3 a 12 km/h, dio como resultado una variación de 2.6%

El coeficiente de variación en la dosificación en el presente trabajo dio 4.2% para una dosis objetivo de 141 kg/ha hasta 228 kg/ha.

Se obtuvieron valores parecidos en ambos estudios para el coeficiente de variación. Las pruebas realizadas en el equipo instalado en la sembradora, dieron como resultado un rango de datos significativos para la aplicación de fertilizante, el sistema mostró tener flexibilidad en un número de variables que están muy cercanas al rendimiento real en campo.

Hubo diferencias en la dosificación debido a las diferentes velocidades de operación del tractor. La velocidad más alta de 15 km/h obtuvo el tiempo más corto de respuesta con 3.4 segundos. La dosis más alta de 228 kg/ha tuvo el mejor resultado con 4.3 segundos de tiempo de reacción.

Conclusiones

El sistema de control de dosis variable para agricultura de precisión implementado en la sembradora, dio buenos resultados, el sistema permitió realizar una calibración precisa para fertilizante sólido.

La sembradora mostró algunas diferencias de dosificación al variar la velocidad del tractor durante los valores experimentales; en la mayoría de los casos los valores entregados fueron inferiores a los valores establecidos durante la calibración experimental.

El valor de la constante entregada de dosificación dependió de la velocidad del eje dosificador de la sembradora, a mayor velocidad hubo menor tiempo de respuesta. Con los valores de dosificación obtenidos mediante la calibración, fue posible calcular valores medios de dosificación por hectárea de la sembradora en rangos de dosificación representativos de aquellos utilizados en la aplicación del fertilizante.

Recomendaciones

Según los resultados obtenidos, la sembradora nos dio diferencias de dosificación al trabajar con velocidades de operación bajas (5 km/h) y dosificaciones bajas (141 kg /ha). Se recomienda seguir buscando valores para mejorar la calibración y seguir haciendo pruebas de laboratorio para tratar de disminuir la variación de los resultados obtenidos para todas las velocidades de operación y dosis de aplicación.

También se recomienda seguir haciendo pruebas para disminuir el porcentaje de variación del error. Para esto se recomienda hacer una actualización del sistema de la pantalla de interface GreenStar™ 2630 con el fin de lograr reducir el porcentaje del error.

Bibliografía

- Adamchuck, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K., 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44, p.71-91.
- Ahmed A. Alameen, Khalid A. Al-Gaadi, ElKamil Tola, Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 160, 2019, Pages 31-39, ISSN 0168-1699, doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.011.
- B.A. Aubert et al. IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture Technology Decision Support Systems (2012)
- Barnes, A., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., van der Wal, T., & Gómez-Barbero, M. (2019). Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy*, 80, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>
- Bonilla, C.; Terra, J.A.; Gutiérrez, L.; Roel, Á.: “Cosechando los beneficios de la agricultura de precisión en un cultivo de arroz en Uruguay”, *Agrociencia Uruguay*, 19(1): 112-121, 2015, ISSN: 2301-1548.
- Bucci, G.; Bentivoglio, D.; Finco, A.: “Precision agriculture as a driver for sustainable farming systems: state of art in literature and research”, *Calitatea*, 19(S1): 114-121, 2018, ISSN: 1582-2559.
- Cancan Song, Zhiyan Zhou, Ying Zang, Lingli Zhao, Wenwu Yang, Xiwen Luo, Rui Jiang, Rui Ming, Yu Zang, Le Zi, Qiuyang Zhu, Variable-rate control system for UAV-based granular fertilizer spreader, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 180, 2021, 105832, ISSN 0168-1699, doi.org/10.1016/j.compag.2020.105832.
- Cullen, R., Forbes, S., & Grout, R. (2013). Non-adoption of environmental innovations in wine growing. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 41, 41-48. <https://doi.org/10.1080/01140671.2012.744760>.
- Deere & Company (2015) Manual del operador. Controlador de dosis seca GreenStar™, OMPFP14736 Edición B5 (Spanish).
- Evandro, C.M., Francisco de A. Daniel M. y Emilio R., 2017. Nuevas Herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa agropecuaria. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), Brasil.

García, E. y Flego, F. 2014. Agricultura de precisión. Tecnología agropecuaria. Facultad de ingeniería. Universidad de Palermo.

Hongfeng Yu, Yongqian Ding, Xiuqing Fu, Haitao Liu, Minfeng Jin, Chuanlei Yang, Zhuo Liu, Guoxiang Sun, Xianglin Dou, A solid fertilizer and seed application rate measuring system for a seed-fertilizer drill machine, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 162, 2019, Pages 836-844, ISSN 0168-1699, doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.007.

José F. Reyes, Wilson Esquivel, Daniel Cifuentes, Rodrigo Ortega, Field testing of an automatic control system for variable rate fertilizer application, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 113, 2015, Pages 260-265, ISSN 0168-1699, doi.org/10.1016/j.compag.2015.03.003.

Khalid A. Al-Gaadi, ElKamil Tola, Ahmed A. Alameen, Rangaswamy Madugundu, Samy A. Marey, Ahmed M. Zeyada, Mohamed K. Edrris, Control and monitoring systems used in variable rate application of solid fertilizers: A review, Journal of King Saud University - Science, Volume 35, Issue 3, 2023, 102574, ISSN 1018-3647, doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102574.

Kumar, S.; Karaliya, S.K.; Chaudhary, S.: "Precision farming technologies towards enhancing productivity and sustainability of rice-wheat cropping system", Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci, 6(3): 142-151, 2017.

López L. J. A., 2012 Evaluación de un sensor de permisividad eléctrica para agricultura de precisión. Tesis de nivel licenciatura. Departamento de maquinaria agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo México, Coahuila, México,

Luciana G. H. 2011 Conductividad Eléctrica aparente como herramienta para delimitar zonas de manejo de sitio específico en maíz, Universidad Nacional de la Plata

Luciana Moltoni, Andrés Moltoni, Gerardo Masiá, Nicolás Clemares y Natalia Pino Análisis económico del uso de Drones para la generación de mapas de prescripción de malezas 2015 www.inta.gob.ar/iir

Foladori, G. (2022). Agricultura de precisión y su carácter capitalista: la no neutralidad de la tecnología. Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad, v. 14, n. 28, e2339. <https://doi.org/10.22430/21457778.2339>

Galán-Martín David (2011). Control de movimientos en presas mediante DGPS. Aplicación a la presa de La Aceña, España Tecnología y ciencias del agua. Versión On-line ISSN 2007-2422 Tecnol. cienc. agua vol.2 no.3 Jiutepec jul. /sep. 2011

Mirzakhaninafchi, H.; Singh, M.; Bector, V.; Gupta, O.P.; Singh, R. Design and Development of a Variable Rate Applicator for Real-Time Application of Fertilizer. Sustainability 2021, 13, 8694. <https://doi.org/10.3390/su13168694>.

Mirzakhaninafchi, H.; Singh, M.; Dixit, A.K.; Prakash, A.; Sharda, S.; Kaur, J.; Nafchi, A.M. Performance Assessment of a Sensor-Based Variable-Rate Real-Time Fertilizer Applicator for Rice Crop. *Sustainability* 2022, 14, 11209. <https://doi.org/10.3390/su141811209>

M. Jafari, A. Hemmat, M. Sadeghi, Development and performance assessment of a DC electric variable-rate controller for use on grain drills, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 73, Issue 1, 2010, Pages 56-65, ISSN 0168-1699, doi.org/10.1016/j.compag.2010.04.004.

Naresh, R.K.; Kumar, Y.; Chauhan, P.; Kumar, D.: “Role of precision farming for sustainability of rice-wheat cropping system in western indo gangetic plains”, *Int J Life Sc Bt Pharm Res*, 1: 1-13, 2012.

Oliver, M.; Amon, T.; Marchant, B.: Precision agriculture for sustainability and environmental protection, Ed. Routledge, 2013, ISBN: 1-136-46825-0.

Paredes, M. R., Mandujano B A., Gámez V. J. A., García N. H. 2011. Actualización del mapa de uso del suelo agrícola en el estado de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias México. Vol. 2, No 1, Pp 85-96.

Paustian, M., & Theuvsen, L. (2017). Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. *Precision Agriculture*, 18, 701-717. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9482-5>

Paxton, K.W., Mishra, A.K., Chintawar, S., Roland, K., Larson, J.A., English, B.C., Lambert, D.M., Marra, M.C., Larkin, S.L., Reeves, J.M., Martin, W., 2017. Intensity of Precision Agriculture Technology Adoption by Cotton Producers 1, 133–144

Quevedo, H. I., Rodriguez, L. Y., Hernández, A. P., & Freire, R. E. (2006). La Aplicación de la Agricultura de Precisión: Su Impacto Social. *Revista Científica Técnicas Agropecuarias*, 44. SENA. (2020). SenaSofiaPlus. Retrieved from <http://oferta.senasofiaplus.edu.co/sofia-oferta/>

Ramírez, F., Tesis sistema de adquisición de datos de sensores analógicos y digitales, noviembre de 2009.

Rodríguez M. Montoya A. Contreras B. “Colombian Agriculture: Approaching Agriculture 4.0.,” *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 18, no. 2, 2022.

Rucks, L., F. García., A. Kaplan., J. Ponce L. y M. Hill. 2004 Propiedades físicas del suelo. Facultad de Agronomía. Departamento de suelos y aguas; Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay. 68 p.

- Šarauskis, E., Romanekas, K., Jasinskas, A., Kimbirauskienė, R., Naujokienė, V., 2020. Improving energy efficiency and environmental mitigation through tillage management in faba bean production. Energy 209, 118453. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118453>
- Say, S.M.; Keskin, M.; Sehri, M.; Sekerli, Y.E.: "Adoption of precision agriculture technologiesin developed and developing countries", Online J. Sci. Technol, 8: 7-15, 2018.
- Temizel, K.E.; Akin, F.; Aydogan, D.; Eren, S.; Kevseroglu, K.: "Determination the effect of land leveling on soil loses in rice (*Oryza sativa L.*) production areas.", Bulgarian Journal of Agricultural Science, 18(2): 219-226, 2012, ISSN: 1310-0351.
- E. Tola, T. Kataoka, M. Burce, H. Okamoto, S. Hata, Granular fertiliser application rate control system with integrated output volume measurement, Biosystems Engineering, Volume 101, Issue 4, 2008, Pages 411-416, ISSN 1537-5110, doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.09.019.
- Xiao J. et al. Visible-near infrared spectrum-based classification of apple chilling injury on cloud computing platform Computers and Electronics in Agriculture (2018)
- Yezekyan, T., Benetti, M., Armentano, G., Trestini, S., Sartori, L., Marinello, F., 2021. Definition of Reference Models for Power, Mass, Working Width, and Price for Tillage Implements.

Anexo 1

Mapa de prescripción

En el sitio web www.myjohndeere.com se apertura una cuenta. Se elige la opción Operations center; enseguida se selecciona en la pestaña de Plan el creador de prescripción de Agrian. Crear recomendaciones agrícolas para el trabajo en campo.

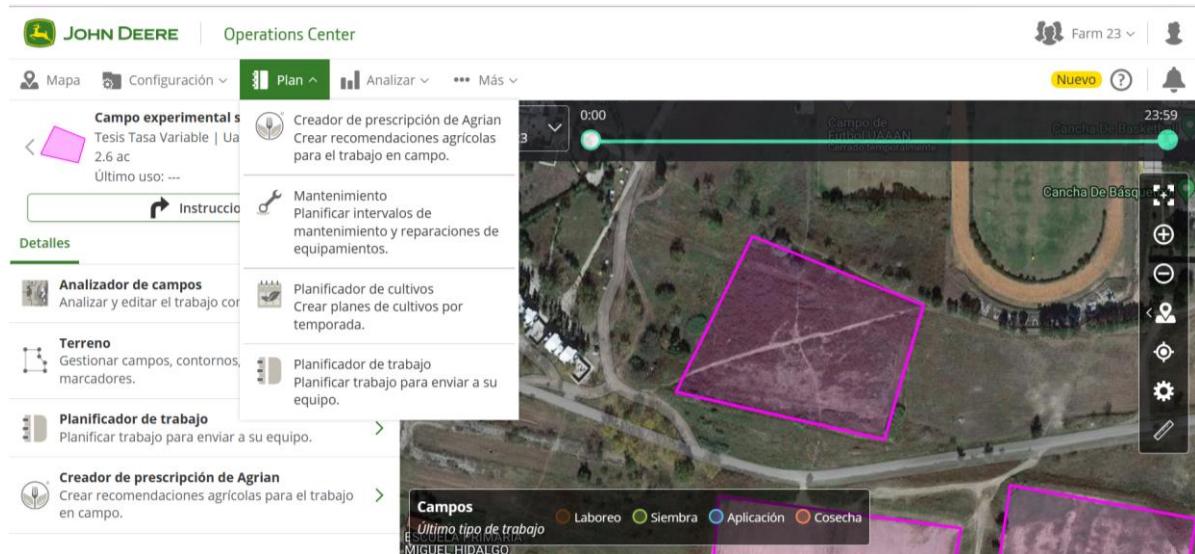


Figura 19. Creación de prescripciones

Enseguida se despliega el menú para crear una nueva prescripción de zona; se selecciona el tipo de producción, se elige una organización, un cliente, una hacienda, un campo, el límite del campo y el origen de la prescripción. Se presiona el botón de siguiente.

The screenshot shows the AGRIAN software interface for creating a new prescription zone. At the top, there is a logo for AGRIAN and navigation links for '1. Operación' and '2. Análisis'. The main title is 'Nueva Prescripción de Zona'. The form is divided into several sections:

- Tipo de Prescripción:** Radio buttons for 'Aplicación/Siembra' (selected) and 'Labranza'.
- Elija un Campo:** Fields for 'Organización' (Farm 23), 'Cliente' (Tesis Tasa Variable), and 'Hacienda' (Uaaan).
- Campo:** Field for 'Campo experimental sureste'.
- Límite de Campo:** Field for 'Límite' with a checked checkbox for 'Incluir interiores'.
- Elija una Capa:** Field for 'Origen de Prescripción' (Zonas de Forma Libre).

Figura 20. Nueva prescripción de zona

Enseguida se selecciona la opción de modificar zonas manualmente, se hacen las divisiones del terreno delineado. Enseguida se selecciona el botón crear zonas.

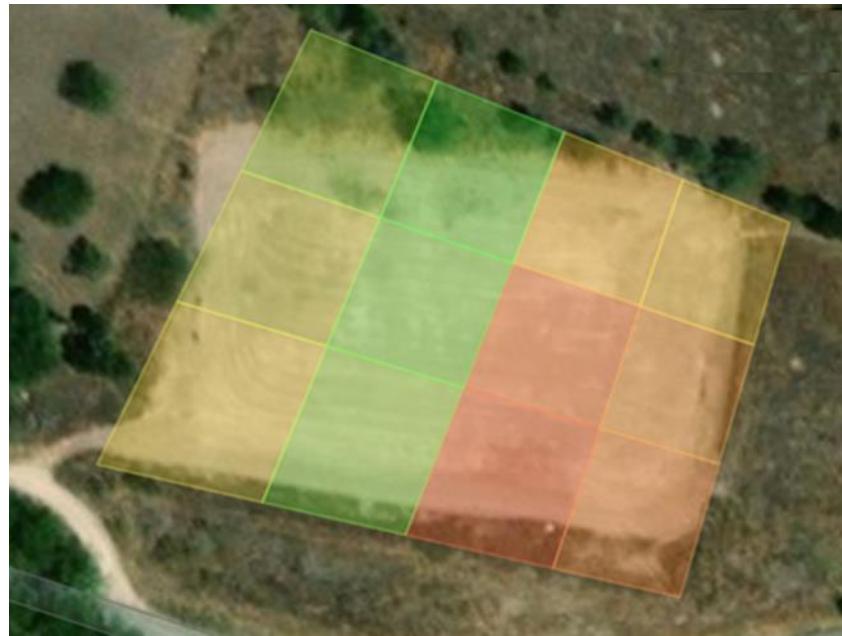


Figura 21. Creación de zonas

Para crear las zonas se seleccionan las zonas que se desea enlazar y se presiona el botón de crear las zonas seleccionadas:

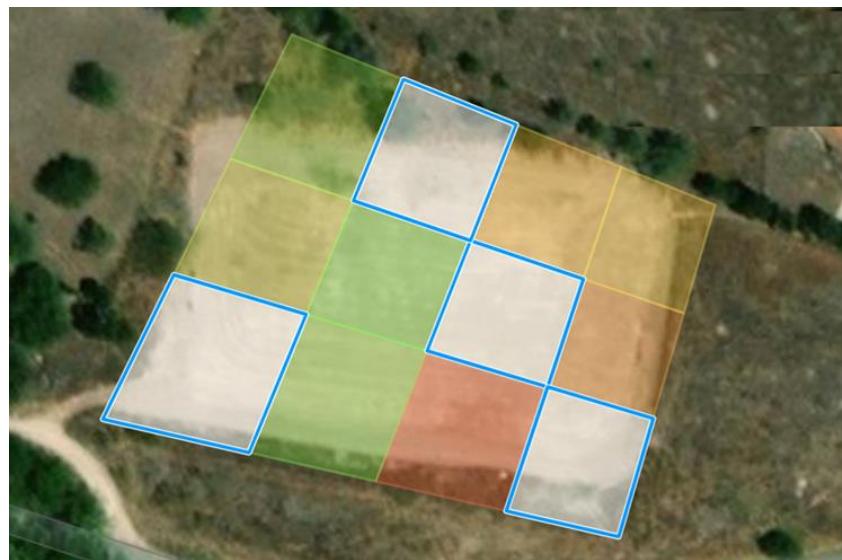


Figura 22. Enlazar zonas seleccionadas

Después se encuentran cuatro opciones para añadir el producto, estas son: añadir producto químico, añadir variedad, añadir fertilizante y añadir mezcla de tanque. En nuestro caso se seleccionó añadir fertilizante triple 17 de nitrógeno sólido, este producto fue añadido al catálogo de John Deere.

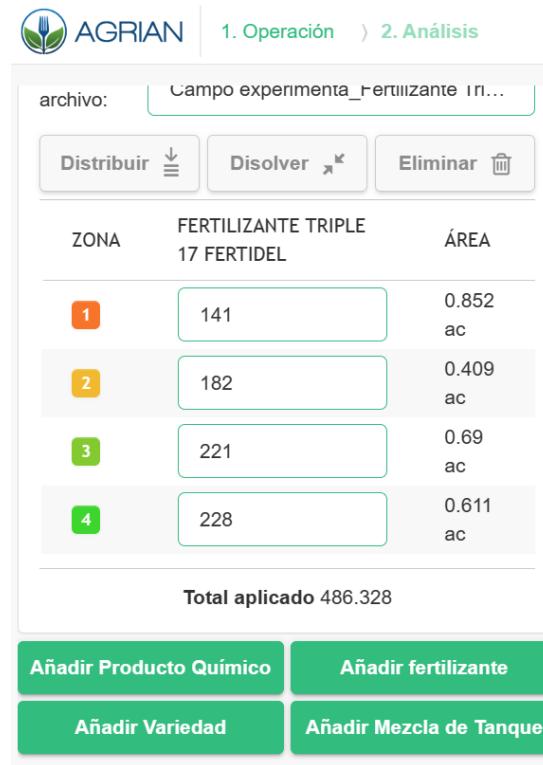


Figura 23. Adición de fertilizante

Anexo 2

Conversión del archivo Shapefile

En el sitio web www.myjohndeere.com se elaboró el mapa de prescripción con las cantidades de fertilizante a aplicar. Se generó el archivo y se descargó en una memoria USB.

En la pantalla GreenStar™ 2630 se selecciona la pantalla de inicio:

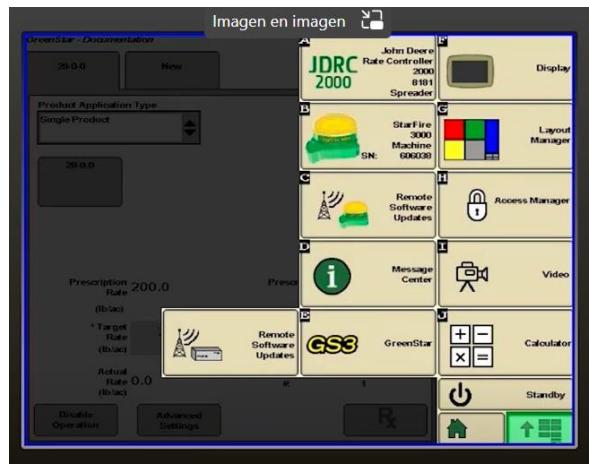


Figura 24. Pantalla de inicio GreenStar™ 2630

Enseguida se selecciona el botón GS3 Greenstar, se despliega la pantalla del control Greenstar y se selecciona documentación.

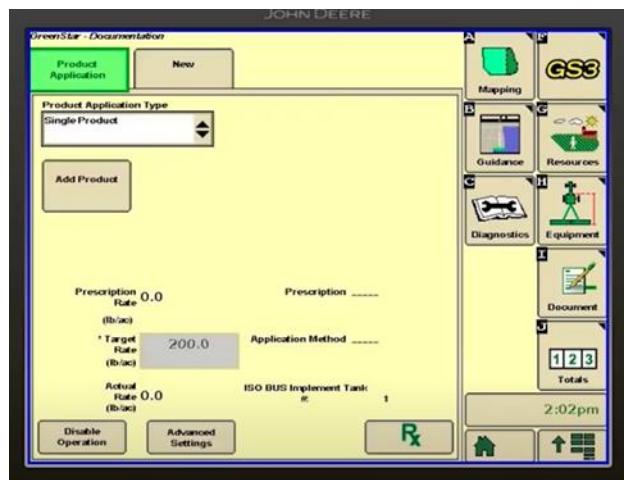


Figura 25. Pantalla de documentación

Con la pantalla de documentación activada se inserta en la unidad del drive la memoria USB que contiene el mapa de prescripción.

Enseguida se despliega una pantalla con las opciones para hacer la transferencia de los archivos.



Figura 26. Pantalla de manejo de transferencia de archivos.

Se selecciona la opción para importar Rx, esto agregara los archivos a la lista existente de archivos con prescripciones.

A continuación, se despliega una pantalla con la barra de avance del archivo importado



Figura 27. Pantalla de la aplicación de datos.

Al terminar la descarga de archivos se abre la pantalla de documentación. Se puede cambiar la opción de aplicación de un solo producto. En nuestro caso se seleccionó la aplicación de un solo producto

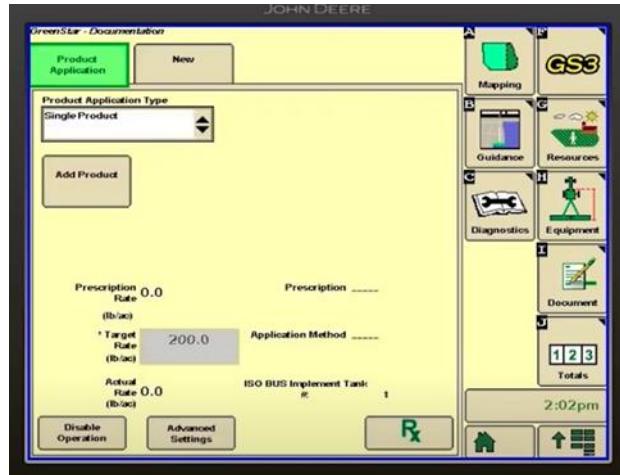


Figura 28. Pantalla de documentación.

Se selecciona el botón Rx para ver la prescripción. En la pestaña de la memoria se muestra la memoria usada y el nombre de la prescripción que descargamos.

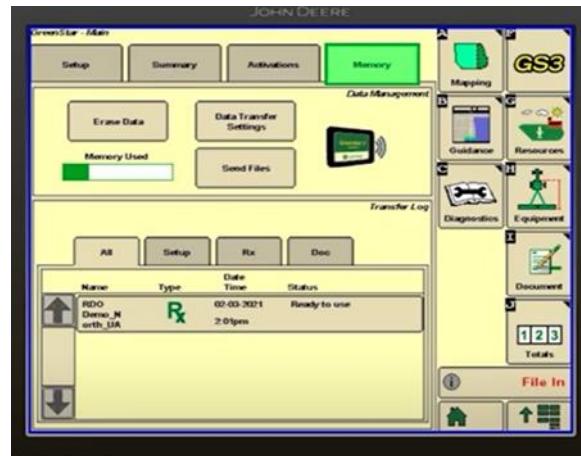


Figura 29. Pantalla de documentación.

Se despliega la pantalla de prescripción y aquí se selecciona la prescripción que se va a convertir. La opción de anticipar se deja en cero y el multiplicador de la prescripción en 100



Figura 30. Pantalla de prescripción.

Al terminar de configurar la prescripción se presiona aceptar y se despliega la pantalla de conversión del Shapefile.

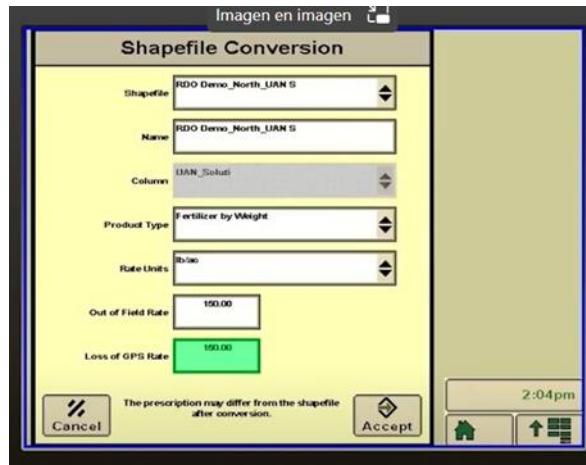


Figura 31. Pantalla de Conversión del Shapefile.

Aquí se despliegan el Shapefile y el nombre que va a tener al convertirse, se configura el tipo de producto, las unidades, la tasa si sale del rango del campo y una tasa por si hay perdida de señal de GPS. Se presiona aceptar.



Figura 32. Conversión del Shapefile.

Se despliega la pantalla del progreso de la conversión del Shapefile. Al terminar se muestra la imagen con el archivo convertido, contiene el área total, producto total, tasa máxima, tasa media, tasa promedio y un mapa del área de trabajo



Figura 33. Conversión del Shapefile.

En la opción mapas se puede ver el área de trabajo, el límite del área y la prescripción que se va a aplicar.

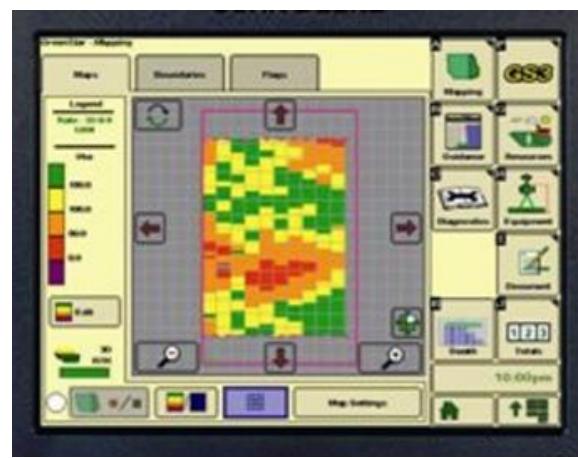


Figura 34. Límite del área de trabajo y prescripción.