

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**DISEÑO, INTEGRACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA MEDIR
PATINAJE EN TRACTORES AGRÍCOLAS BASADO EN ENCODERS**

Tesis

Que presenta GERÓNIMO GARCÍA RIVERA

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCION

Saltillo, Coahuila, Junio de 2021

DISEÑO, INEGRACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA MEDIR
PATINAJE EN TRACTORES AGRÍCOLAS BASADO EN ENCODERS

Tesis

Elaborada por GERÓNIMO GARCÍA RIVERA 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.



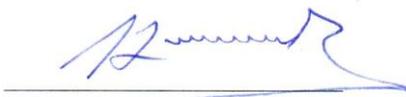
Dr. Martín Cadena Zapata

Asesor principal



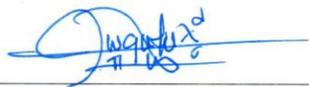
Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Asesor



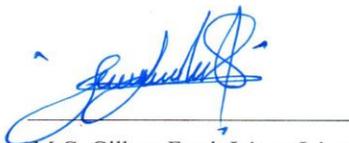
Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor



M.C. Juan Antonio López López

Asesor



M.C. Gilbert Fresh López López

Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente

Subdirector de Postgrado

UAAAN

Saltillo, Coahuila

Julio 2021

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Por darme la oportunidad de ser miembro de esta casa de estudios y adquirir conocimientos de un área diferente a mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Por el apoyo brindado para la realización de la maestría

Al Dr. Martin Cadena Zapata

Por proporcionar la línea de investigación para este trabajo y por la asesoría proporcionada en el desarrollo de la investigación y redacción de tesis. Sin lo cual este trabajo no hubiera podido realizarse.

Al Dr. Alejandro Zermeño González

Por darme oportunidad de ingresar al programa de maestría de ISP. El cual me ha proporcionado mucho conocimiento en el área agronómica.

Al M.C. Juan Antonio López López

Por el gran apoyo en la elaboración de toda la parte conceptual del trabajo y en la realización del experimento. Pieza fundamental para el desarrollo del mismo.

Al comité de asesoría

Dr. Santos Gabriel y M.C. Gilbert López. Por su valioso aporte en la parte experimental y en la revisión de esta tesis.

A la M.C. Yolanda González García

Por el apoyo y asesoría brindada para el análisis de información y correcta redacción del artículo científico.

A todos los profesores y personal de la UAAAN, que me ayudaron durante el transcurso de la maestría. Así como a mis compañeros de maestría por su apoyo y amistad.

Dedicatoria

A mis papás Gerónimo García Peña y Margarita Rivera Cantú, que me ha brindado todo el apoyo en todos los proyectos que he emprendido. Y a toda mi familia, que siempre ha estado ahí en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

Introducción.....	1
Objetivos.....	4
Objetivo General	4
Objetivos Especificos	4
Hipótesis.....	4
Revisión de literatura	4
Labranza del suelo.....	5
Tracción de llantas.....	6
Patinaje y presión de llantas	7
Humedad del suelo	7
Agricultura de precisión	8
Encoders y otros componentes electrónicos aplicados en tractores	8
Materiales y Métodos.....	9
Ubicación y características del sitio del proyecto	9
Componentes e integración del sistema	9
Prueba y calibración del sistema en laboratorio	11
Pruebas de validación del sistema de medición de patinaje en superficie de asfalto ...	12
Pruebas de validación del sistema de medición del patinaje en suelo.....	13
Medición del patinaje en forma tradicional y comparación con el sistema basado en encoders en suelo.....	13
Evaluación del sistema de patinaje con una labor de aradura a diferentes niveles de humedad	13
Resultados y Discusión	14
Ecuaciones para cálculo de patinaje	15
Pruebas en superficie de asfalto	15
Pruebas en superficie de suelo con dos implementos de labranza diferentes.....	16
Comparación entre los valores medidos con el método convencional manual y el sistema basado en encoders	17

Evaluación del sistema a diferentes contenidos de humedad en la superficie del suelo trabajando con un arado de discos.....	18
Conclusiones.....	20
Referencias.....	21

Lista Figuras

Figura 1. Componentes del sistema de medición del patinaje	10
Figura 2. Diseño experimental.....	14
Figura 3. Ecuaciones llanta delantera (A) y trasera (B) generada en Minitab.....	15
Figura 4. Valores medidos de patinaje para dos tipos de implementos	17
Figura 5. Comparación de medición de patinaje con método manual y el basado en encoders.....	18
Figura 6. Patinaje a cuatro valores de humedad en la superficie del suelo.....	19

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Calculo del porcentaje de patinaje	9
Ecuación 2. Distancia recorrida por giro de llanta trasera	11
Ecuación 3. Distancia recorrida por giro llanta delantera	11
Ecuación 4. Ecuación para cálculo de distancia basado en pulso llanta trasera.....	15
Ecuación 5. Ecuación para cálculo de distancia basado en pulso llanta delantera	15

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Distancia en metros y cantidad de pulsos calculado manualmente. Encoder llanta trasera (500 P/R)	11
Cuadro 2. Distancia en metros y cantidad de pulsos calculado manualmente. Encoder llanta trasera (400 P/R).....	12
Cuadro 3. Porcentaje de patinaje a diferentes distancias en superficie de asfalto	16

Resumen

DISEÑO, INTEGRACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA MEDIR
PATINAJE EN TRACTORES AGRÍCOLAS BASADO EN ENCODERS.

POR

GERÓNIMO GARCÍA RIVERA

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

DR. MARTÍN CADENA ZAPATA-ASESOR

SALTILLO, COAHUILA

JUNIO DEL 2021

Al realizar operaciones de labranza ocurre patinaje que debe mantenerse en rangos óptimos (8 a 12%) de otra manera se puede desperdiciar 50% o más de la energía.

El patinaje se mide manualmente en pruebas y evaluaciones de tractor- implemento, sin embargo, el patinaje varía con las condiciones en áreas extensas por lo que requiere instrumentos que puedan cuantificarlo en forma automatizada.

El objetivo de este trabajo fue diseñar, integrar y evaluar un sistema de medición de patinaje en forma automatizada basado en encoders.

El sistema fue integrado y probado en laboratorio, luego acoplado a un tractor agrícola y evaluado en sus mediciones de distancias y cálculos de patinaje en superficies de asfalto, en suelo con dos implementos diferentes y en el terreno midiendo el patinaje a cuatro contenidos de humedad.

Los resultados obtenidos muestran que el sistema funciona adecuadamente. En la superficie de asfalto el patinaje calculado fue entre 0.72 a 1.45%. Los valores de patinaje calculados en operaciones de labranza fueron de acuerdo al tipo de implemento. Las diferencias en cálculos de patinaje con el método manual y el de encoders fueron de máximo 2% y en promedio de 0.25%. En la evaluación del sistema en la labor de arado a diferentes contenidos de humedad, los valores de patinaje se incrementan de acuerdo al aumento en el contenido de humedad.

El sistema basado en encoders para medir distancias y calcular el patinaje funcionó adecuadamente. Los valores calculados responden de acuerdo al tipo de superficie, implementos y contenidos de humedad en el suelo.

Palabras clave: Medición de patinaje, labranza, encoders, humedad en el suelo

Abstract

DESIGN, ASSAMBLING AND EVALUATION OF A ENCODERS SYSTEM TO
MEASURE SLIPPAGE IN AGRICULTURAL TRACTORS

BY

GERONIMO GARCIA RIVERA

MASTER OF SCIENCE IN PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING.

DR. MARTIN CADENA ZAPATA - ADVISER

SALTILLO, COAHUILA

JUNE 2021

When doing tillage, slippage occurs, that should be in optimum range (8 to 12%) otherwise with higher values losses in energy from the tractor could exceed 50%.

On experimental plots, slippage is measured manually. Nevertheless, the requirement for quantifying the slippage in bigger extensions of cropland makes it necessary to develop equipment and devices to record data automatically.

The purpose of this work was to design, assemble and evaluate a system for measuring slippage in an automated manner based in encoders.

The system was assembled and tested in laboratory, then evaluated in asphalt surface, tilling soil with two different implements and in cropland plowing at four volumetric moisture contents.

The results show that the systems works well calculating the wheel slippage of an agricultural tractor. In the asphalt surface, slippage values were calculated in a range of 0.72% to 1.45%. When evaluating the system measuring slippage for tillage operations values were well related to the type of implement. Simultaneous measurements were made with the system based in encoders and the manual method as a reference. The values obtained had maximum differences of 2% and 0.25% in average. In the evaluation of the system measuring the slippage in a labor of disk plow at different moisture contents slippage values obtained where getting higher as moisture content in the surface increases.

The systems based in encoders calculates the slippage adequately. The values of slippage obtained match well those typical according to the type of surface, implements and soil surface moisture content.

Keys Words: Slippage measurements, Tillage, Encoders, Soil moisture.

INTRODUCCIÓN

La agricultura y sus complejas operaciones mecánicas y tecnológicas tienen una influencia significativa en el consumo de energía y la contaminación ambiental (Imran *et al.*, 2020). La producción de alimentos implica numerosas operaciones tecnológicas que consumen energía, como la labranza del suelo, la siembra, la fumigación, la fertilización, el riego, la cosecha, el transporte y el almacenamiento (Šarauskis *et al.*, 2020).

Particularmente las operaciones de labranza del suelo con arados para el aflojamiento profundo del suelo y la aplicación de equipos de labranza rotativos consumen entre el 29% y el 59% de todo el combustible Diesel necesario para la operaciones del sistema de producción (Šarauskis *et al.*, 2017). Otros autores como Kumar *et al.* (2017) señalan que hasta un 50% de esta energía puede ser desperdiciada en exceso de patinaje en las actividades de labranza de suelos. El patinaje del tractor incrementa el consumo de combustible y disminuye la capacidad efectiva de trabajo (Moitzi *et al.*, 2014).

El uso de energía a través del consumo de combustible de un tractor depende en gran medida de la velocidad del motor y de la carga seleccionada para una operación en particular (Xiao *et al.*, 2018). El tractor está diseñado para jalar implementos al ejercer tracción por medio de sus llantas; en realizar esta acción se produce patinaje es decir las llantas giran sin avanzar totalmente de acuerdo a lo que teóricamente deberían de acuerdo a su perímetro. Durante la labranza del suelo, el patinaje del tractor debe estar en el rango de 5 a 15%, cuando el patinaje excede el 15%, el daño a la capa superior del suelo, además del consumo de combustible (uso de energía) se considera demasiado alto (Šmerda & Čupera, 2010). Los métodos para ajustar el patinaje de las llantas motrices incluyen sistemas de control de la fuerza de tiro y posición del implemento, lastre, el uso de neumáticos de flexión aumentada y el ajuste de la presión de inflado en los neumáticos (Čiplienė *et al.*, 2019).

La planificación de las operaciones de campo es esencial para la eficiencia operativa en términos de tiempo y costo, por lo que los agricultores se enfrentan a una tarea complicada en la gestión de los recursos y la realización de una producción agrícola

sostenible (Yezeqyan *et al.*, 2021). La efectividad de las operaciones de laboreo depende en gran medida de la asociación entre el tractor y el implemento, el ajuste óptimo de estos parámetros en función de las condiciones de labranza, mejoran la productividad, el rendimiento y los ingresos agrícolas, además de reducir las emisiones de gases de escape y los efectos negativos en la estructura del suelo garantizando la protección del medio ambiente (Janulevičius & Čiplienė, 2018; Yezeqyan *et al.*, 2021).

Se tiene un aumento creciente en la preocupación a largo plazo en el impacto de las prácticas de producción agrícola sobre el suelo y el abasto de agua, debido a que ya no son considerados como recursos inagotables, se ha observado que la agricultura de precisión, puede ayudar a maximizar estos y otros recursos con el objetivo de reducir pérdidas y desperdicios (Cisternas *et al.*, 2020).

Adicionalmente, el uso de tecnologías de información contribuye a una toma adecuada de decisiones, desde el punto de vista productivo, económico y de impacto ambiental. En lugar de manejar todo el campo de cultivo basado en un hipotético estado homogéneo, el cual puede no existir, la agricultura de precisión usa una variedad de tecnologías para recolectar datos de sitios específicos y aplicar prácticas específicas para cada parte del terreno. (Paxton *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2017).

Considerando la heterogeneidad de los campos de producción y bajo el concepto de manejo de sitio específico, el patinaje varía de acuerdo a las condiciones superficiales del terreno (textura, humedad, cubierta vegetal, rugosidad) por lo que se requiere un sistema de medición electromecánico que de las lecturas del patinaje en tiempo real y esta pueda ser utilizadas para hacer ajustes en la configuración del tractor e implemento para mantener los valores del patinaje en rango óptimo (Gupta *et al.*, 2019)

La medición del patinaje en tractores agrícolas se ha realizado principalmente en forma manual en las actividades de pruebas y evaluaciones (Smith *et al.*, 1994, SECOFI, 2003). Pranav *et al* (2010), señalan que en las mediciones de patinaje con equipos mecánicos o electrónicos lo más difícil es medir la velocidad y desplazamiento actual del tractor. Otros autores han desarrollado equipos electrónicos y realizado mediciones

de patinaje y su relación con otra variable como la relación tiro-patinaje (Gupta *et al*, 2019) o patinaje-consumo de combustible (Kumar *et al*, 2017).

El presente trabajo se centra en el desarrollo de un método de medición automatizado del patinaje en tractores agrícolas basado en encoders, que son sensores que convierten la energía mecánica motriz en una señal eléctrica de salida digital, y usar un convertidor de señal para usar esta información para calcular el patinaje en un software de PC.

Primero se diseñó e integró un sistema y se generaron ecuaciones para cálculo de patinaje basado en los pulsos emitidos por los encoders. Posterior a esto se describe la validación del sistema, las pruebas que se realizaron con diferentes implementos, así como en diferentes niveles de humedad y una prueba para comparar las mediciones con un método de medición manual, con la finalidad de evaluar la eficiencia del sistema.

OBJETIVOS

General

Diseñar e implementar un sistema para medir patinaje en tractores agrícolas basado en encoders.

Especificos

- Integrar componentes electromecánicos para medir giros de las llantas y distancias recorridas para calcular el patinaje de forma automatizada.
- Evaluar el desempeño del sistema en el laboratorio y en el terreno.
- Evaluar el sistema en campo a diferentes condiciones de humedad de la superficie del suelo.

HIPÓTESIS

Se puede diseñar un sistema que mida el patinaje en tractores agrícolas en forma automatizada para áreas extensas de terreno usando encoders.

REVISIÓN DE LITERATURA

Labranza del suelo

La producción de alimentos implica numerosas operaciones tecnológicas que consumen energía, como la labranza del suelo, la siembra, la fumigación, la fertilización, el riego, la cosecha, el transporte y el almacenamiento (Šarauskis *et al.*, 2020).

La labranza causa cambios en el sistema de poros del suelo, afectando los procesos relacionados con los flujos de aire y agua y la resistencia mecánica al crecimiento de las raíces. La labranza convencional generalmente promueve la alteración total del suelo hasta una profundidad de 0 a 25 cm, lo que predispone a las pérdidas de suelo, agua, nutrientes y carbono orgánico debido a la erosión, pérdidas de carbono orgánico a través de una mineralización más rápida y compactación del suelo (Vizioli *et al.*, 2021). Además, esta práctica puede provocar muchos cambios negativos en el entorno del suelo, como la lixiviación de nutrientes del suelo y la reducción de la cantidad de materia orgánica del suelo (MOS), cambios sobre la estructura del suelo, la capacidad hídrica y la actividad biológica, además de aumentar la susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica (Elzbieta *et al.*, 2020).

Particularmente las operaciones de labranza del suelo como el arado, el aflojamiento profundo del suelo y la aplicación de equipos de labranza rotativos consumen entre el 29% y el 59% de todo el combustible diesel necesario para la producción completa de alimentos (Šarauskis *et al.*, 2017). La planificación de estas operaciones de campo es esencial para la eficiencia operativa en términos de tiempo y costo, por lo que los agricultores se enfrentan a una tarea complicada en la gestión de los recursos y la realización de una producción agrícola sostenible (Yezekyan *et al.*, 2021). La efectividad de las operaciones de laboreo depende en gran medida de la asociación entre el tractor y el implemento, el ajuste óptimo de estos parámetros en función de las condiciones de labranza, mejoran la productividad, el rendimiento y los ingresos agrícolas, además de reducir las emisiones de gases de escape y los efectos negativos en la estructura del suelo garantizando la protección del medio ambiente (Janulevičius & Čiplienė, 2018; Yezekyan *et al.*, 2021).

La interacción de la rueda motriz y el suelo del terreno en el proceso de conducción explica las pérdidas de energía y potencia de los tractores de ruedas del 20 al 55% que afectan gravemente al consumo y la demanda de combustible en las aplicaciones de la barra de tracción de los tractores de ruedas (Md-tahir *et al.*, 2021)

Por mencionar un ejemplo, un estudio realizado por Md-tahir *et al.*, (2021) informó 575 millones de litros de pérdida anual de combustible en los EE. UU debido a la mala gestión de los vehículos todo terreno en las interfaces suelo-rueda solo en aplicaciones agrícolas. La energía perdida en la interacción de la rueda con el suelo y el proceso de conducción se utiliza para desgastar los neumáticos y compactar el suelo, lo que provoca efectos perjudiciales en la producción de cultivos.

Para mejorar el rendimiento operativo y la eficiencia de las máquinas agrícolas y satisfacer los requisitos de producción de la agricultura moderna, es necesario actualizar, diseñar y optimizar las máquinas agrícolas y sus componentes donde el análisis teórico, el cálculo numérico y la experimentación son los tres enfoques más utilizados en el proceso de diseño y optimización (Zhao *et al.*, 2021).

Tracción de llantas

La fuerza de tracción de un neumático corresponde a la fuerza horizontal generada por un tractor para hacer funcionar la herramienta del que tira. La potencia de tracción es el producto del esfuerzo de tracción por la velocidad de avance (Zeng *et al.*, 2019).

Las fuerzas de tracción y frenado son características de rendimiento importantes de los neumáticos ya que es necesaria la modificación de ambos para diferentes tipos de condiciones de trabajo agrícolas. Tracción neta, es la fuerza longitudinal desarrollada por una rueda, y la fuerza de frenado debe considerarse cuando se evalúa el rendimiento de esta. Además, un elemento importante en el diseño de la forma de un neumático es la comprensión de cómo las fuerzas de tracción en las superficies afectan el rendimiento de la rueda (Shao *et al.*, 2016).

La predicción del rendimiento de tracción de los vehículos agrícolas es un tema importante a considerar. Actualmente la fuerza de tracción puede ser medida con el apoyo de sistemas informáticos (Nakashima *et al.*, 2012).

Patinaje y presión de llantas

La presión de inflado de los neumáticos es de suma importancia para la distribución de la tensión en el área de contacto entre la llanta y el suelo. Una presión de inflado más baja generalmente aumenta el área de contacto lo que disminuye tanto la presión media del suelo como la magnitud de la tensión máxima en el perfil del suelo (Damme *et al.*, 2020). Al reducir la presión de inflado de los neumáticos, dependiendo del tipo y tamaño de estos, la potencia de tracción se puede aumentar entre un 8-10% (Čiplienė *et al.*, 2019). El uso correcto de baja presión de inflado de llantas en tractores puede ser una práctica que genere ahorros significativos en costos de producción y también evitar compactación excesiva del suelo (Lancas *et al.*, 1994).

Humedad del suelo

La humedad del suelo, junto con las dimensiones de los neumáticos, la presión de inflado y la carga de la rueda se consideran los factores más importantes que influye en los procesos de compactación del suelo, de los cuales la presión de inflado de los neumáticos es el factor más fácil y rápido de manejar (Ren *et al.*, 2019). En condiciones húmedas, el área de contacto del neumático con el suelo y la profundidad de la transmisión de la compactación del suelo aumentan debido a un factor de concentración creciente según la teoría de la elasticidad (Keller *et al.*, 2019).

Las propiedades hidráulicas del suelo es decir, retención de agua y conductividad hidráulica son información clave en muchos campos de los trabajos de investigación agroambiental, ya que son necesarias, por ejemplo, para simular algunos procesos agroambientales para establecer estrategias de adaptación agronómica ante el cambio climático, y para cuantificar los impactos económicos y ambientales del manejo alternativo del suelo (Castellini *et al.*, 2020).

El contenido de humedad del suelo tiene un papel clave en aplicaciones agrícolas globales tales como estudios de cambio climático, además de contribuir a la determinación de una variedad de interacciones tierra-atmósfera y de ser un factor clave en las prácticas agrícolas (Yahia *et al.*, 2021).

El contenido de humedad es un parámetro importante que afecta significativamente los parámetros técnicos del suelo, distribución de la temperatura de los campos. Además el aumento del contenido de humedad del suelo aumenta significativamente su transferencia de calor (Nawalany & Sokołowski, 2021; Gómez-Calderón *et al.*, 2018).

Agricultura de precisión

Se tiene un aumento creciente en la preocupación a largo plazo en el impacto sobre el suelo y el abasto de agua, debido a que ya no son considerados como recursos inagotables. Aquí, se ha observado que la agricultura de precisión, puede ayudar a maximizar estos y otros recursos con el objetivo de reducir pérdidas y desperdicios (Cisternas *et al.*, 2020).

Adicionalmente, el uso de tecnologías de información contribuye a una toma adecuada de decisiones, desde el punto de vista de productivo, económico y de impacto ambiental. En lugar de manejar todo el campo de cultivo basado en un hipotético estado homogéneo, el cual puede no existir, la agricultura de precisión usa una variedad de tecnologías para recolectar datos de sitios específicos y aplicar prácticas específicas para cada parte del terreno (Paxton *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2017).

Encoders y otros componentes electrónicos aplicados en tractores

El encoder es un transductor rotativo, que genera una señal eléctrica (normalmente un pulso o una señal senoidal) que nos indica el ángulo girado. Este dispositivo convierte la energía mecánica motriz en una señal de salida digital. Un encoder convierte el movimiento en una señal eléctrica, la cual puede ser leída por equipos de adquisición de datos o directamente por un PLC. Que se puede leer por un sistema de control, como un contador, equipo de cómputo o PLC (Paredes *et al.*, 2021). Los encoders rotacionales han sido utilizados para medir la velocidad rotacional (rpm) de las llantas de tracción de los tractores y medir experimentalmente el porcentaje de patinaje en labores (Pranav *et al.*, 2012). Otros autores han utilizado sensores de proximidad y potenciómetros rotatorios para contar los giros de las ruedas (Raheman & Jha, 2006). Sensores tipo Hall fueron utilizados por Kumar *et al.* (2017), para contar las revoluciones de las ruedas de tractor y calcular el patinaje trabajando con varios implementos de labranza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características del sitio del proyecto

El proyecto se realizó en las instalaciones de laboratorios y talleres del Departamento de Maquinaria Agrícola y en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Las coordenadas geográficas son: 100°59'57" de longitud oeste, 25°23'42" de latitud Norte y una altitud de 1743 metros sobre el nivel del mar (msnm). El suelo del sitio en que se trabajó en el campo experimental es de textura franco-arcilloso en los primeros 0.30 m con una composición de 34.1% de arcilla 33.4% de limo y 32.5% de arena. El contenido de materia orgánica es de 2.09%. El clima es seco-árido, templado con verano fresco largo, con un régimen de lluvias en verano y una precipitación media anual de 435 mm, y un clima extremoso con una temperatura media anual de 16.9°C.

Componentes e integración del sistema

Para definir los componentes del sistema de medición de patinaje y su integración, se consideró la fórmula para el cálculo del patinaje de los tractores que en forma rutinaria se realiza en la evaluación de implementos en campo (SECOFI, 2003, Smith et al, 1994).

$$P = \frac{D1-D2}{D1} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

P= porcentaje de patinaje (%)

D1 = Distancia recorrida por las llantas de tracción sin carga (m)

D2= Distancia recorrida por las llantas de tracción con carga (m)

Dado que estas mediciones se realizan en forma manual por separado, la necesidad es que el sistema mida simultáneamente las dos distancias requeridas. Para medir en forma simultanea las distancias recorridas, se requiere medir la distancia (D1) que teóricamente deben recorrer las llantas de tracción (traseras) contando sus giros cuando se está

realizando una labor en un periodo de tiempo determinado sin carga. La distancia D_2 será la distancia real que se desplaza el tractor realizando la labor y será medida con los giros de las ruedas delanteras en el mismo periodo de tiempo determinado con carga.

Para medir los giros de las llantas de tracción (traseras) se colocó un encoder rotativo de 500 pulsos por revolución (ppr) (LPD3806-500BM; 500 P/R1; Orange, China) y para medir los giros de las llantas delanteras un encoder rotativo de 400 ppr (LPD3806-400BM 400 P/R, Orange, China). Debido a que estos encoders son los de mayor disponibilidad en el mercado. Para su funcionamiento se conectó a una fuente externa de voltaje para suministrar 5 V de entrada. Las señales digitales de salida generadas con el giro de las ruedas se enviaron a uno de los puertos de contadores digitales del sistema de adquisición de datos DaqBook 2000 (IoTech, USA) donde también se almacenó la información y se procesó con el software DaqView como archivos .txt, Una vez guardada la información puede ser utilizada con programas como Minitab y Excel en una computadora normal. En la Figura 1, se muestra el diseño y la integración del sistema de medición de patinaje.

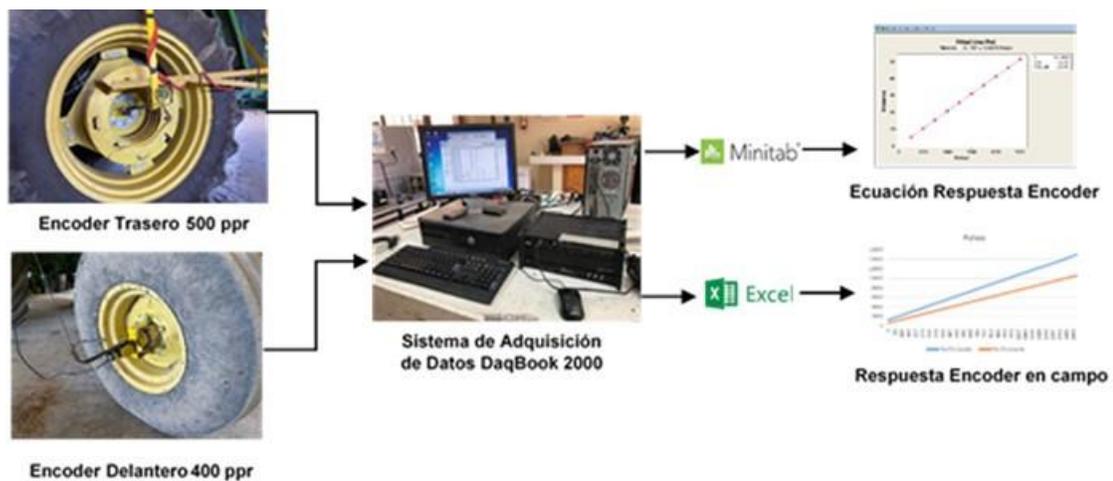


Figura 1. Componentes del sistema de medición de patinaje basado en encoders

Prueba y calibración del sistema en laboratorio

Para utilizar los datos de los encoder en el cálculo de las distancias recorridas, necesarias para determinar el patinaje, se generaron dos ecuaciones de calibración (Ecuación 4 y 5). Para llegar a estas ecuaciones, primero se realizó una prueba en el laboratorio, girando el encoder de manera manual para registrar la cantidad de pulsos generado por vuelta. Se realizaron 5 pruebas de 10 mediciones cada una, se convirtió la señal usando equipo DaqBook 2000 para posteriormente ser registrados en un equipo de cómputo (PC ACER Aspire). Del resultado de las mediciones se obtuvo un promedio de pulsos por vuelta, los cuales se muestran en el Cuadro 1 y 2.

Posterior a eso se midió el radio de las llantas del tractor y se utilizaron las siguientes ecuaciones para calcular una distancia recorrida por cada llanta:

Distancia recorrida por la llanta trasera (radio 0.82m) (Ecuación 2) Distancia recorrida por la llanta delantera. (radio 0.42m) (Ecuación 3).

$$\text{Distancia 1} = 2 \pi r = 2 * \pi * 0.82 = 5.1522 \frac{m}{\text{giro de la llanta}} \quad (2)$$

$$\text{Distancia 2} = 2 \pi r = 2 * \pi * 0.42 = 2.6389 \frac{m}{\text{giro de la llanta}} \quad (3)$$

Con los pulsos por vuelta obtenidos en el laboratorio y la distancia calculada por cada giro de la llanta con las ecuaciones 2 y 3 se elaboró una tabla que relaciona la distancia con la cantidad de pulsos para la llanta trasera como se observa en el Cuadro 1, y para la llanta delantera como se ve en el Cuadro 2.

Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4		Repetición 5	
Distancia	Pulsos								
5.15	491	5.15	486	5.15	508	5.15	498	5.15	488
10.30	987	10.30	968	10.30	993	10.30	993	10.30	985
15.46	1501	15.46	1465	15.46	1494	15.46	1498	15.46	1502
20.61	1997	20.61	1972	20.61	1989	20.61	1998	20.61	1991
25.76	2500	25.76	2476	25.76	2489	25.76	2498	25.76	2489
30.91	2991	30.91	2969	30.91	3006	30.91	3010	30.91	2989

36.07	3485	36.07	3472	36.07	3493	36.07	3495	36.07	3490
41.22	4004	41.22	3976	41.22	3992	41.22	3993	41.22	3990
46.37	4499	46.37	4474	46.37	4500	46.37	4510	46.37	4492
51.52	5010	51.52	4980	51.52	5003	51.52	5010	51.52	5007

Cuadro 1. Relación entre cantidad de pulsos y distancia en metros para la llanta de tracción (trasera)

Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4		Repetición 5	
Distancia	Pulsos	Distancia	Pulsos	Distancia	Distancia	Pulsos	Distancia	Pulsos	Distancia
2.64	426	2.64	401	2.64	406	2.64	394	2.64	401
5.28	819	5.28	803	5.28	807	5.28	793	5.28	810
7.92	1230	7.92	1211	7.92	1212	7.92	1195	7.92	1208
10.56	1627	10.56	1616	10.56	1607	10.56	1596	10.56	1612
13.19	2029	13.19	2015	13.19	2008	13.19	2019	13.19	2012
15.83	2439	15.83	2414	15.83	2407	15.83	2423	15.83	2409
18.47	2837	18.47	2831	18.47	2817	18.47	2820	18.47	2819
21.11	3256	21.11	3224	21.11	3214	21.11	3226	21.11	3213
23.75	3647	23.75	3640	23.75	3621	23.75	3623	23.75	3615
26.39	4050	26.39	4042	26.39	4028	26.39	4026	26.39	4017

Cuadro 2. Relación entre cantidad de pulsos y distancia en metros para la llanta delantera.

Pruebas de validación del sistema de medición de patinaje en superficie de asfalto

El sistema de medición de patinaje se instaló en un tractor John Deere 6403 que tiene una potencia nominal de 90 HP al volante del motor. Con el fin de verificar el funcionamiento del sistema en una condición de superficie para mínimo (cercano a cero) patinaje del tractor, se realizó una prueba de validación de la medición del patinaje con el sistema en una superficie de asfalto. Las mediciones de patinaje se realizaron estableciendo un experimento de bloques al azar tomando como tratamientos cinco distancias: 20, 40, 60 y 80 m cada tratamiento se repitió cuatro veces.

Pruebas de validación del sistema de medición del patinaje en suelo

Para validar en campo el funcionamiento del sistema, se realizaron mediciones en campo utilizando el mismo tractor con dos implementos diferentes. Primero se midió el patinaje trabajando con un arado de discos JD645 el cual tiene cuatro discos lisos de 711 mm de diámetro y 6.55 mm de espesor. El implemento tiene un peso de 642 kg, se acopla en forma integral a los tres puntos del tractor con un enganche categoría II. También se realizaron mediciones trabajando con un arado de cinceles JD610, el implemento cuenta con ocho cinceles tipo “C”, se engancha en forma integral con un enganche categoría II, tiene un peso total de 618 kg. Para comparar las mediciones entre ambos implementos.

Medición del patinaje en forma tradicional y comparación con el sistema basado en encoders en suelo

Esta prueba se realizó en forma simultánea para comparar el resultado de la medición del patinaje calculado con los encoders con el método de medición manual como se describe en las evaluaciones de implementos (SECOFI, 2003, Smith et al, 1994). Para la prueba se utilizó el tractor con el arado de discos ya descritos. En la medición convencional, se cuentan diez giros de las llantas de tracción con el implemento trabajando (con carga) y se mide con una cinta métrica la distancia recorrida (D2). Para la distancia D1, se cuentan diez giros de las llantas de tracción con el implemento sin trabajar (sin carga) y se mide la distancia recorrida con una cinta métrica. El porcentaje de patinaje se calculó con la Ecuación 1.

Al mismo tiempo se realizó la medición con el método de encoders. Usando las Ecuaciones 4 y 5 para calcular el patinaje en base a los pulsos emitidos. Con la finalidad de comparar los resultados entre ambos métodos.

Evaluación del sistema de patinaje con una labor de aradura a diferentes niveles de humedad

Se estableció en campo un experimento en bloques completos al azar para evaluar el patinaje del tractor en una labor de arado de discos a cuatro niveles de humedad volumétrica (15%, 25%, 35% y 40%) como se ilustra en la Figura 2. Las repeticiones

fueron de 1 m por 100 m con seis repeticiones por tratamiento. Las llantas de tracción se lastraron con agua hasta una capacidad de volumen de 75% del total y se rellenaron aire hasta alcanzar una presión de 207 kPa. El tractor y el arado de discos utilizados fueron descritos anteriormente en los apartados de las pruebas de validación del sistema de medición en asfalto y suelo respectivamente. Con el fin de que el único factor que afecte el patinaje fuese la variación en la humedad en la superficie del suelo, la profundidad de trabajo se estableció en 15 cm y la velocidad de trabajo en 4.5 km / h.

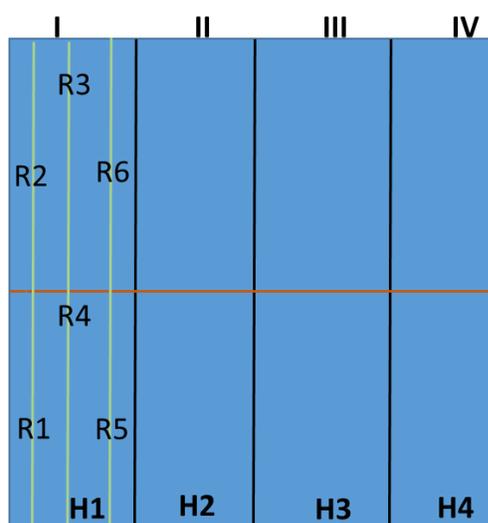


Figura 2. Diseño experimental

El suelo del sitio experimental es de textura franco-arcillosa en los primeros 0.30 m con una composición de 34.1% de arcilla 33.4% de limo y 32.5% de arena. El contenido de materia orgánica es de 2.09%. El suelo fue irrigado por medio de aspersion hasta saturación en la superficie y se dejó secar hasta alcanzar los porcentajes de humedad de los tratamientos. El seguimiento de humedad se realizó con una sonda TDR (TDR FIELDSCOUT 300 E.U.A), realizando las mediciones de patinaje según el suelo fue perdiendo humedad y estuvo a la humedad requerida por cada tratamiento.

Se utilizó un diseño en bloques al azar y se realizó análisis de varianza y prueba de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$) mediante el software InfoStat (v2018) (<https://www.infostat.com.ar>).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ecuaciones para cálculo de patinaje

Basado en la relación de pulsos y distancia, mediante una regresión lineal de los datos usando el software Minitab 16, se obtuvieron dos ecuaciones para calcular la distancia basada en el número de pulsos emitidos por el encoder. Llanta trasera (Ecuación 4) y llanta delantera (Ecuación 5).

$$\text{Distancia} = 0.1292 + 0.01029 * \text{Pulsos} \quad (4)$$

$$\text{Distancia} = 0.00479 + 0.006545 * \text{Pulsos} \quad (5)$$

En la Figura 3 se muestran las gráficas de las regresiones obtenidas con los datos de pulsos y distancias

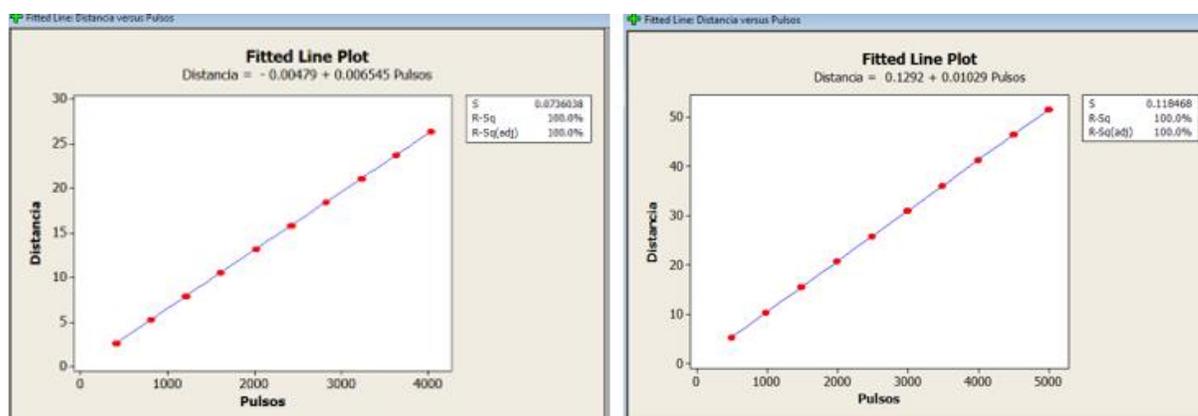


Figura 3. Gráficas y ecuaciones obtenidas de las regresiones de los datos pulsos y distancias para la de tracción (trasera) y de la delantera

Pruebas en superficie de asfalto

Los resultados de las pruebas sobre la superficie de asfalto se pueden observar en el Cuadro 3. Los resultados son los que se pueden esperar cuando el tractor realiza una

mínima tracción solo para superar la resistencia al rodamiento para desplazarse sin implementos por lo que el patinaje es cercano a cero por ciento (Zoz y Grisso, 2003). Se puede apreciar en los resultados que únicamente la medición en una distancia de 20 m es significativamente diferente a las demás. Dado que los resultados son cercanos al cero, se puede apreciar que el sistema mide correctamente un patinaje mínimo en este caso por la mínima tracción que realiza el tractor para auto propulsarse (sin carga).

Distancias (m)	% de patinaje	Grupos
40	1.45	A
100	1.37	Ab
60	1.30	Ab
80	1.05	Ab
20	0.72	B

Grupos con la misma letra en la misma letra no tienen diferencia significativa (Tukey 0.05)

Cuadro 3. Porcentaje de patinaje a diferentes distancias en superficie de asfalto

Las diferencias entre las medias que comparten una letra no son estadísticamente significativas a una confiabilidad de 0.05, por lo que las pruebas de 60m, 80m y 100m tuvieron resultados estadísticamente similares. Por ende, se puede establecer que las mediciones de patinaje con este sistema se deben realizar en distancias en un rango de 40 a 100 m para obtener resultados estadísticamente similares.

Pruebas en superficie de suelo con dos implementos de labranza diferentes

Los resultados de la validación previa de mediciones de patinaje medidas en el terreno con dos diferentes implementos de labranza se muestran en la Figura 4. El patinaje medido con el arado de discos tiene mayores variaciones porque varía la profundidad de trabajo en cada repetición. La profundidad de trabajo del arado de discos depende además de los ángulos de trabajo de los discos, del peso del implemento (Olatunji *et al* 2009) por lo que la profundidad varía con la resistencia del suelo y contenido de humedad. Las profundidades del arado de cinceles fueron más uniformes por lo que los valores de patinaje tuvieron poca variación.

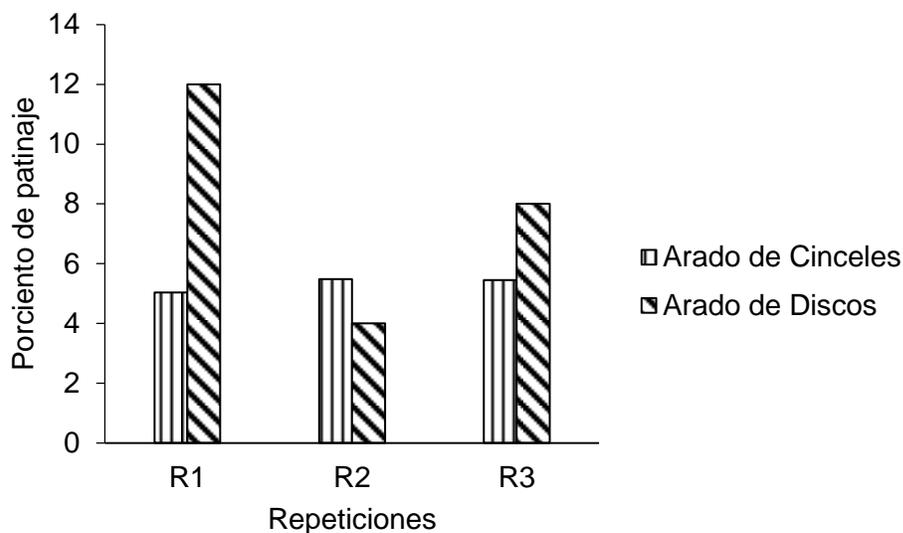


Figura 4. Valores medidos de patinaje para dos tipos de implemento

Los resultados de las mediciones de patinaje van de acuerdo al tipo de implemento, el arado de discos demanda una mayor fuerza de tracción comparado con el arado de cinceles (Vázquez *et al*, 2019) por lo que el patinaje trabajando con el primer implemento siempre es mayor.

Comparación entre los valores medidos con el método convencional manual y el sistema basado en encoders

Se realizó una comparación usando simultáneamente el método de medición manual (Smith *et al*, 1994) y el sistema de encoders, en una labor de arado con discos dando resultados similares. Con lo que se puede verificar que el método basado en encoders es confiable (Figura 5). De acuerdo con Pranav *et al* (2010) un error aceptable en la medición de patinaje es de $\pm 2\%$ por lo que si tomamos como referencia la medición manual, los valores calculados por el sistema basado en encoders tiene un máximo de 2% de diferencia con respecto a esa referencia.

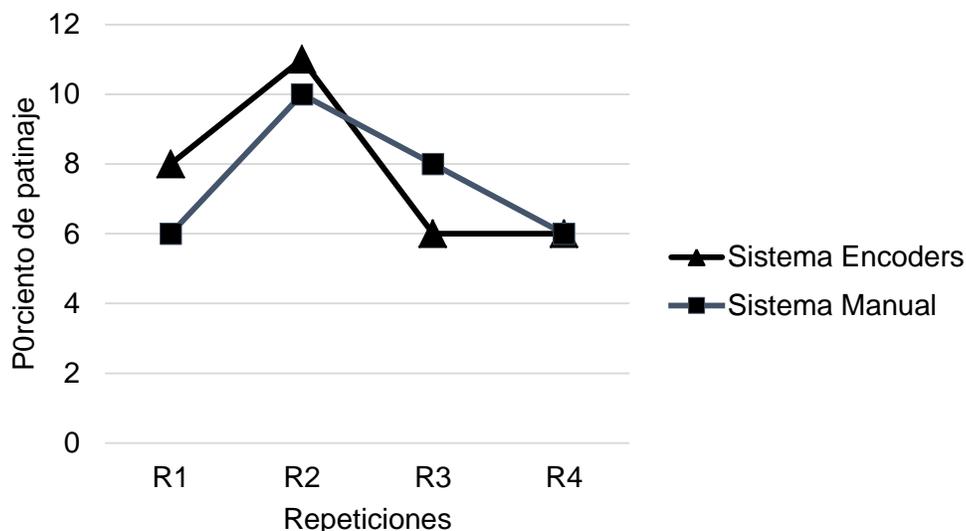


Figura 5. Comparación de mediciones de patinaje con método manual y el basado en encoders

Cuando se calcula el promedio las repeticiones de cada método, las diferencias son mínimas pues el método manual quedaría en 7.5% y el de encoders en 7.75%.

Evaluación del sistema a diferentes contenidos de humedad en la superficie del suelo trabajando con un arado de discos

Los resultados del experimento en campo de las mediciones del patinaje del tractor en cuatro niveles de humedad se muestran en la Figura 6. Manteniendo constantes la profundidad de trabajo y la velocidad del tractor, el único factor que influyó en el patinaje es la humedad en la superficie del suelo, se puede ver que el porcentaje de patinaje se incrementa de acuerdo al aumento de la humedad, esto concuerda con lo reportado en otros trabajos de estudios de patinaje (Amponsah *et al*, 2014) y en la revisión de literatura en el tema realizada por Mamkagh (2019). De acuerdo a las diferencias de contenido de humedad, el sistema basado en encoders registra los giros de las ruedas de tracción y calcula los porcentajes de patinaje en forma adecuada y lógica en una tendencia de acuerdo a la variación de la humedad en la superficie del suelo.

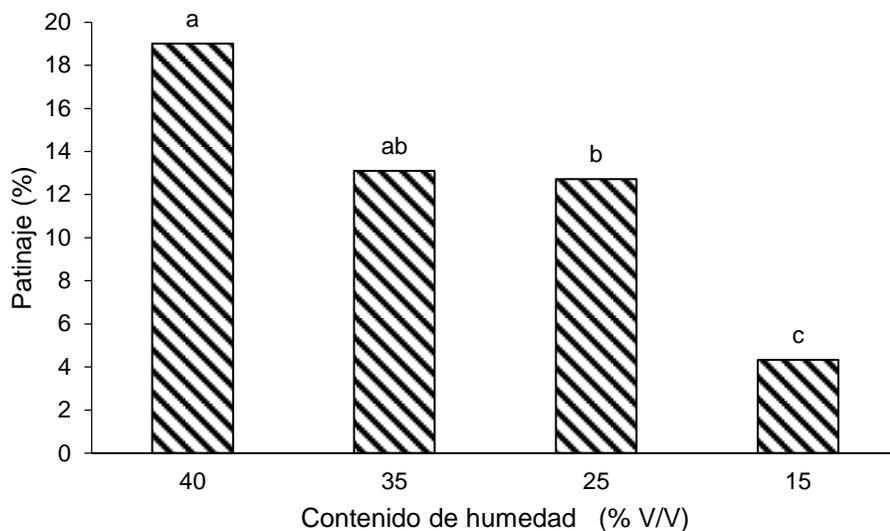


Figura 6. Patinaje a cuatro valores de humedad en la superficie del suelo (letras iguales en cada valor de humedad no tiene diferencia significativa, Tukey 0.05)

Las diferencias estadísticas entre tratamientos en el porcentaje de patinaje se observan en el suelo en consistencia seca (15% de humedad) comparado con los estados de suelo friable (entre 25% a 35 % de humedad) y con el suelo en estado plástico (40% de humedad). Lo anterior corrobora que las mediciones y cálculos de patinaje realizados con el sistema son adecuados considerando las variaciones de valores de humedad en la superficie del suelo tal como se reporta en mediciones similares en otras investigaciones (Tayel *et al*, 2015).

CONCLUSIONES

El sistema de medición diseñado e integrado es confiable para medir el porcentaje de patinaje en tractores agrícolas. Se realizó una comparación usando el método de medición manual convencional y el sistema de medición basado en encoders, dando resultados de diferencias máximas de 2% y diferencias en promedio de 0.25%

En la evaluación en campo a diferentes contenidos de humedad en la superficie del suelo, se registró un incremento en patinaje a mayores contenidos de humedad. Esto concuerda con lo que se reporta en la literatura por lo que los resultados de medición de distancias y cálculos de patinaje son correctos.

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que el sistema de medición de patinaje con encoders es una posibilidad viable para medir el patinaje en diferentes zonas del terreno de manera automatizada.

REFERENCIAS

- Amponsah, S.K., Bobobee, E.Y., Agyare W.A., Okyere, J.B., Aveyire, J., King, S.R., SarkodieAddo, J. 2014. Mechanical cassava harvesting as influenced by seedbed preparation and cassava variety. *Appl Eng. Agric.* 30(3): 391-403.
- Castellini, M., Vonella, A.V., Ventrella, D., Rinaldi, M., Baiamonte, G., 2020. Determining soil hydraulic properties using infiltrometer techniques: An assessment of temporal variability in a long-term experiment under minimum-and no-tillage soil management. *Sustainability* 12. <https://doi.org/10.3390/su12125019>
- Čiplienė, A., Gurevičius, P., Janulevičius, A., Damanauskas, V., 2019. Experimental validation of tyre inflation pressure model to reduce fuel consumption during soil tillage. *Biosyst. Eng.* 186, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.023>
- Cisternas, I., Velásquez, I., Caro, A., Rodríguez, A., 2020. Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 176, 105626. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>
- Elzbieta, H., Antonkiewicz, J., Kwiatkowski, C.A., 2020. agronomy The Effects of Catch Crops and Tillage Systems on Selected Physical Properties and Enzymatic Activity of Loess Soil in a Spring Wheat Monoculture. *Agronomy*.
- Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K., Solórzano-Quintana, M., 2018. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Rev. Technol. en Marcha* 31, 170. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>
- Imran, M., Özçatalbaş, O., Bashir, M.K., 2020. Estimation of energy efficiency and greenhouse gas emission of cotton crop in South Punjab, Pakistan. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 19, 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.09.007>
- Janulevičius, A., Čiplienė, A., 2018. Estimation of engine CO₂ and NO_x emissions and their correlation with the not-to-exceed zone for a tractor ploughing fields of various sizes. *J. Clean. Prod.* 198, 1583–1592. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.078>
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., Or, D., 2019. Soil & Tillage Research Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil Tillage Res.* 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Lancas, K.P., Upadhyaya, S.K., Sime, M., Shafii, S., 1994. Overinflated tractor tires waste fuel reduce productivity. *Calif. Agric.* 50, 48–51.
- Md-tahir, H., Zhang, J., Xia, J., Zhou, Y., Zhou, H., Du, J., 2021. Experimental Investigation of Traction Power Transfer Indices of Farm-Tractors for Efficient Energy Utilization in Soil Tillage and Cultivation Operations. *Agronomy*.

- Nakashima, H., Yoshida, T., Wang, X.L., Shimizu, H., Miyasaka, J., Ohdoi, K., 2012. On a Gross Traction Generated at Grouser for Tracked Agricultural Vehicles, IFAC Proceedings Volumes. IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00071>
- Nawalany, G., Sokołowski, P., 2021. Numerical analysis of the effect of ground dampness on heat transfer between greenhouse and ground. *Sustain.* 13. <https://doi.org/10.3390/su13063084>
- Paredes, F., Herrojo, C., Martín, F., 2021. Electromagnetic Encoders. *Sensors.*
- 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.
- Ren, L., D'Hose, T., Ruyschaert, G., De Pue, J., Meftah, R., Cnudde, V., Cornelis, W.M., 2019. Effects of soil wetness and tyre pressure on soil physical quality and maize growth by a slurry spreader system. *Soil Tillage Res.* 195, 104344. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104344>
- Rodríguez, S., Gualotuña, T., Grilo, C., 2017. ScienceDirect ScienceDirect A System for the Monitoring and Predicting of Data in Precision A Agriculture System for the and Predicting of Wireless Data in Precision in a Monitoring Rose Greenhouse Based on Sensor Agriculture in a Rose Greenhouse Based on. *Procedia Comput. Sci.* 121, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.042>
- Šarauskis, E., Romaneckas, 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>
- Šarauskis, E., Vaitauskienė, K., Romaneckas, K., Jasinskas, A., Butkus, V., Kriaučiušienė, Z., 2017. Fuel consumption and CO₂ emission analysis in different strip tillage scenarios. *Energy* 118, 957–968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.121>
- Shao, M., Kishimoto, T., Satow, T., Takeda, J., Way, T.R., 2016. Engineering in Agriculture , Environment and Food Traction and braking force on three surfaces of agricultural tire lug. *Eng. Agric. Environ. Food* 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.07.002>
- Šmerda, T., Čupera, J., 2010. Tire inflation and its influence on drawbar characteristics and performance – Energetic indicators of a tractor set. *J. Terramechanics* 47, 395–400. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2010.02.005>
- ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Munkholm, L.J., Lamandé, M., 2020. Construction of modern wide, low-inflation pressure tyres per se does not affect soil stress. *Soil Tillage Res.* 204, 104708. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104708>

- Vizioli, B., Cavalieri-Polizeli, K.M.V., Tormena, C.A., Barth, G., 2021. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. *Soil Tillage Res.* 209, 104935. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104935>
- Xiao, M., Zhao, J., Wang, Y., Zhang, H., Lu, Z., Wei, W., 2018. Fuel economy of multiple conditions self-adaptive tractors with hydro-mechanical CVT. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 11, 102–109. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.2158>
- Yahia, O., Guida, R., Iervolino, P., 2021. Thermal Infrared Data Fusion. *Sensors*.
- Yezeqyan, 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.
- Zeng, H., Xu, W., Zang, M., Yang, P., 2019. Calibration of DEM-FEM model parameters for traction performance analysis of an off-road tire on gravel terrain. *Powder Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.006>
- Zhao, H., Huang, Y., Liu, Z., Liu, W., Zheng, Z., 2021. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. *Agriculture*.