



Ingeniería agrícola y biosistemas

ISSN: 2007-3925

ISSN: 2007-4026

Universidad Autónoma Chapingo

García-Rivera, Gerónimo; Cadena-Zapata, Martín; López-López, Juan Antonio; López-López, Gilbert Fresh; Campo-Magaña, Santos Gabriel; Zermeno-González, Alejandro; Gutiérrez-Flores, Hugo
Agricultural tractor slippage measurement system using encoders
Ingeniería agrícola y biosistemas, vol. 13, no. 2, 2021, July-December, pp. 261-271
Universidad Autónoma Chapingo

DOI: <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.07.070>

Available in: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688672123004>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's webpage in redalyc.org



Scientific Information System Redalyc

Network of Scientific Journals from Latin America and the Caribbean, Spain and Portugal

Project academic non-profit, developed under the open access initiative

Agricultural tractor slippage measurement system using encoders

Sistema de medición de patinaje de tractores agrícolas mediante codificadores

Gerónimo García-Rivera; Martín Cadena-Zapata*; Juan Antonio López-López; Gilbert Fresh López-López; Santos Gabriel Campo-Magaña; Alejandro Zermeño-González; Hugo Gutiérrez-Flores

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro
núm. 1923, Saltillo, Coahuila, C. P. 25315, MÉXICO.

*Corresponding author: martin.cadena@uaan.edu.mx, tel. 844 53 42 349.

Abstract

Introduction: Slippage is usually measured with a standard manual method, however, if it is required slippage information inline in extensive areas of cropland, mechanical and electronic equipment have to be developed.

Objective: To design, assemble and evaluate (in laboratory and under field conditions) an encoder-based slippage measurement system.

Methodology: The system was integrated and tested in the laboratory, where equations were generated to calculate the slippage. The system was installed in an agricultural tractor and its performance was evaluated on an asphalt track and working with tillage implements on various soil conditions.

Results: The values obtained with the manual method and the encoder-based method showed very small differences. The results of field evaluation of the system are in congruence with the type of implement and with the moisture content in the soil. This indicates that the measurement of distances by the wheel turns and the calculation of the percentage of slippage are correct.

Study limitations: The system was tested in short runs (up to 100 m). Still to be tested in at least 1 ha.

Originality: Automated slippage measurement in extended crop areas.

Conclusions: The slippage measurement system based on encoders is reliable for automatically measuring the slippage of agricultural tractor in different field conditions.

Keywords: traction, tillage, automation, soil moisture.

Resumen

Introducción: Generalmente, el patinaje de los tractores se mide con un método manual estándar; sin embargo, si se requiere información del patinaje en línea en áreas extensas de cultivo es necesario desarrollar equipos mecánicos y electrónicos.

Objetivo: Diseñar, montar y evaluar (en laboratorio y campo) un sistema de medición del patinaje basado en codificadores.

Metodología: El sistema se integró y probó en laboratorio, donde se generaron ecuaciones para calcular el patinaje. El sistema se instaló en un tractor agrícola y su rendimiento se evaluó en una pista de asfalto y con implementos de labranza en diversas condiciones de suelo.

Resultados: Los valores obtenidos con el método manual y el basado en codificadores presentaron diferencias muy pequeñas. Los resultados de la evaluación en campo son congruentes con el tipo de implemento y el contenido de humedad del suelo, lo cual indica que la medición de distancias por giros de la rueda y el cálculo del porcentaje de patinaje son correctos.

Limitaciones del estudio: El sistema se probó en recorridos cortos, aún se debe evaluar en al menos 1 ha.

Originalidad: Medición del patinaje automatizado en áreas extensas de cultivo.

Conclusiones: El sistema planteado es adecuado para medir automáticamente el patinaje de un tractor agrícola en diferentes condiciones de campo.

Palabras clave: tracción, labranza, automatización, humedad del suelo.



Introduction

Intensive crop production requires many mechanical and technological operations that consume energy for crop establishment, pest control, irrigation, transport and storage (Imran et al., 2020; Šarauskis et al., 2020). Particularly, tillage operations could spend between 29 to 59 % of all fuel used in the production system (Šarauskis et al., 2017).

The agricultural tractor has been designed to pull implements by performing traction by means of its wheels; when making traction, wheels turn without travelling the distance that in theory they should do according to their perimeter, this is called slippage (Zos & Grisso, 2003). During the tillage operations, slippage should be between 5 to 15 %. When it exceeds 15 %, it causes damage to the soil surface, and increases fuel consumption and excessive wear of the traction tires (Šmerda & Čupera, 2010; Moitzi et al., 2014). Kumar et al. (2017) indicates that up to 50 % of energy delivered by the tractor could be wasted by the slippage excess. Methods to adjust the slippage of agricultural tractors are control systems of the draft force and depth control of implements, ballast, ultra-flexible tires, and tire pressure adjustment (Čipliesnė et al., 2019).

Slippage is affected by the moisture content at the soil surface, the type of soil cover, working depth of the implements and surface roughness. All these factors vary in the field so, it is required a measurement system that can deliver slippage readings inline in order to adjust the configuration tractor-implement to maintain the slippage in the optimum range (Gupta et al., 2019).

Slippage measurements of agricultural tractors are mainly performed in the activity of testing and evaluation of implements by using a standard manual method (Smith et al., 1994). This standard method is appropriate for small plots, but mechanical and electronic equipment is required for bigger extensions where large amount of slippage data as well as working depth and speed rate had to be collected and processed automatically, which influence the tractive efficiency (Shafaei et al., 2019). Romantchik-Kriuchkova et al. (2015) equipped a tractor with a fifth wheel, rotation sensors and automated data acquisition system, to quantify the revolutions of the fifth wheel and the rear tractor wheels to calculate slippage and determine the working areas for a tractor with the same loads applied in a 4x4 and 4x2 traction schemes.

Pranav et al. (2012) reports that when measuring slippage with mechanical or electronic devices, it is difficult to measure the current speed and slippage of the tractor. Several authors have developed electronic devices to measure the relationship draft-slippage

Introducción

La producción intensiva de cultivos requiere de muchas operaciones mecánicas y tecnológicas que consumen energía para el establecimiento de cultivos, el control de plagas, el riego, el transporte y el almacenamiento (Imran et al., 2020; Šarauskis et al., 2020). En particular, el proceso de labranza puede gastar entre 29 y 59 % de todo el combustible utilizado en el sistema de producción (Šarauskis et al., 2017).

El tractor agrícola fue diseñado para jalar implementos mediante tracción por medio de sus ruedas. Al realizar la tracción, las ruedas giran sin recorrer la distancia que, en teoría, deben hacer según su perímetro, lo cual se denomina patinaje (Zos & Grisso, 2003). Durante la labranza, el patinaje debe estar entre 5 y 15 %, y cuando supera el 15 % se producen daños en la superficie del suelo, e incrementa el consumo de combustible y el desgaste de los neumáticos de tracción (Šmerda & Čupera, 2010; Moitzi et al., 2014). Kumar et al. (2017) señalan que hasta 50 % de la energía brindada por el tractor se podría desperdiciar por el exceso de patinaje. Los métodos para ajustar el patinaje de los tractores agrícolas son los sistemas de control de la fuerza de arrastre, la profundidad de los implementos, el lastre, los neumáticos ultraflexibles y el ajuste de la presión de los neumáticos (Čipliesnė et al., 2019).

El patinaje se ve afectado por el contenido de humedad en la superficie del suelo, el tipo de cobertura del suelo, la profundidad de trabajo de los instrumentos y la rugosidad de la superficie. Dichos factores varían en el terreno de cultivo; por ello, se requiere un sistema de medición que pueda entregar lecturas de patinaje en línea, esto con el fin de ajustar la configuración tractor-implemento para mantener el patinaje en el rango óptimo (Gupta et al., 2019).

Las mediciones de patinaje de tractores agrícolas se realizan principalmente en pruebas y evaluaciones de implementos utilizando un método manual estándar (Smith et al., 1994). Este método es apropiado para parcelas pequeñas, pero se requieren equipos mecánicos y electrónicos para parcelas grandes, ya que se tienen que recopilar y procesar automáticamente una gran cantidad de datos sobre el patinaje como profundidad de trabajo y velocidad de avance, los cuales influyen en el rendimiento (Shafaei et al., 2019). Romantchik-Kriuchkova et al. (2015) equiparon un tractor con una quinta rueda, sensores de rotación y un sistema automatizado de adquisición de datos con el fin de cuantificar las revoluciones de la quinta rueda y de las ruedas traseras del tractor, para calcular el patinaje y determinar las zonas de trabajo de un tractor con las mismas cargas aplicadas en un esquema 4x4 o 4x2.

(Gupta et al., 2019) and the relationship slippage-fuel consumption (Kumar et al., 2017). Therefore, the aim of this study was to design, assemble and evaluate an encoder-based tractor slippage measurement system. In addition, the efficiency of the proposed system was evaluated under laboratory and field conditions, using the standard manual method as a reference.

Materials and methods

Location and characteristics of the experimental site

The experimental work was carried out at the facilities and experimental station of the Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro located in Buenavista, Saltillo, Coahuila Mexico (100° 59' 57" W and 25° 23' 42" N, at 1 743 m a. s. l.). The soil texture of the experimental site is a clay loam 34.1 % clay, 33.4 % silt, 32.5 % sand and 2.09 % of organic matter. The climate is dry-arid with a mean annual rainfall of 435 mm and 16.9 °C of annual mean temperature.

Design, components and integration of the system

Tire slip of a two-wheel drive (2WD) tractor is quantified by the difference of the distance travelled by the traction (rear) tires when the implement is working (loaded) and unloaded, this according to Equation (1) (Smith et al., 1994).

$$S = \frac{(Dul-Dl)}{Dul} \times 100 \quad (1)$$

where S is tire slippage (%), Dul is the distance travelled by traction tires unloaded (m) and Dl is the distance travelled by traction tires loaded (m). In the manual standard method, the distances Dul and Dl are measured in two separate times, then the slippage is calculated.

To replace the manual measurement that are made when evaluating agricultural implements, it was considered to integrate electronic components in a system to measure the equivalents of Dul and Dl and from that to calculate the slippage.

Figure 1 shows the components of the slippage measuring system. The basic components are the encoders that count the turns, one encoder of 500 pulses (LPD3806-500BM; 500 P/R1, China) is attached to the rear wheel. To measure the turns of the front wheel an encoder of 400 pulses was used (LPD3806-400BM 400 P/R, China).

The digital signals generated by the wheel turns are stored in the data acquisition system DaqBook 2000 (IoTech, USA) and processed with the DaqView software (IoTech, USA) as .txt files. The DaqBook is connected

Pranav et al. (2012) señalan que, al medir el patinaje con dispositivos mecánicos o electrónicos, lo más difícil es medir la velocidad actual y el patinaje del tractor. Varios investigadores han desarrollado dispositivos electrónicos para medir la relación arrastre-patinaje (Gupta et al., 2019) y la relación patinaje-consumo de combustible (Kumar et al., 2017). Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo fue diseñar, montar y evaluar un sistema de medición del patinaje de un tractor basado en codificadores. Además, se evaluó el rendimiento del sistema planteado en condiciones de laboratorio y campo, teniendo como referencia el método manual estándar.

Materiales y métodos

Ubicación y características del sitio experimental

El experimento se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México (100° 59' 57" longitud oeste y 25° 23' 42" latitud norte, a 1 743 m s. n. m.). La textura del suelo del sitio experimental era franco-arcillosa: 34.1 % arcilla, 33.4 % limo, 32.5 % arena y 2.09 % materia orgánica. El clima es seco-árido con precipitación media anual de 435 mm y temperatura media anual de 16.9 °C.

Diseño, componentes e integración del sistema

El patinaje de los neumáticos de un tractor de tracción sencilla (2WD) se cuantifica con la diferencia de la distancia recorrida por los neumáticos de tracción (traseros) cuando el tractor está trabajando (cargado) y cuando está sin carga, esto de acuerdo con la Ecuación 1 (Smith et al., 1994).

$$S = \frac{(Dul-Dl)}{Dul} \times 100 \quad (1)$$

donde S es el patinaje de los neumáticos (%), Dul es la distancia recorrida por los neumáticos de tracción sin carga (m) y Dl es la distancia recorrida por los neumáticos de tracción con carga (m). En el método manual estándar, las distancias Dul y Dl se miden en dos ocasiones distintas y, posteriormente, se calcula el patinaje.

Para sustituir las mediciones manuales que se realizan al evaluar los implementos agrícolas, se integraron componentes electrónicos en un sistema para medir los equivalentes de Dul y Dl , y a partir de ello calcular el patinaje.

En la Figura 1 se muestran los componentes del sistema de medición del patinaje, donde los componentes básicos son los codificadores que cuentan las vueltas. En la rueda trasera se fijó un codificador de 500 pulsos (LPD3806-500BM 500 P/R1, China), y para medir las



Figure 1. Components of the slippage measuring system based on encoders.

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

to the PC and to the tractor's onboard computer with Minitab and Excel software, where the calculated slippage can be monitored.

With this automated method, measurement and calculation of slippage (S , %) of the traction wheels was carried out on the fly (Equation 2). Distances required were measured with the encoders as follows: 1) the actual distance (Ad , m) traveled by the tractor with the implement was calculated from the front wheel turns measured with the encoder and 2) the theoretical distance (Td , m) that the tractor should travel with no slippage, found from the rear drive wheel turns measured with the encoder.

$$S = \frac{(Td - Ad)}{Td} \times 100 \quad (2)$$

Test and calibraion of the system in laboratory

System calibration was carried out in the laboratory to generate two equations (one for each encoder) for the calculation of the distance travelled by the rear wheels and the front wheels. The encoders were tested to verify and record the number of pulses per turn. The signals were stored in the DaqBook 2000 and processed in a PC. Five tests were performed with 10 replications each, and an average number of pulses per turn was recorded from the results collected.

With the radius of the rear and front wheels of the tractor, Td (Equation 3) and Ad (Equation 4) were calculated:

$$Td = 2 \pi r = 2 \pi \times 0.82 = 5.1522 \times \frac{m}{\text{wheel turn}} \quad (3)$$

vueltas de la rueda delantera se utilizó un codificador de 400 pulsos (LPD3806-400BM 400 P/R, China).

Las señales digitales generadas por los giros de las ruedas se almacenaron en el sistema de adquisición de datos DaqBook 2000 (IoTech, EUA) y se procesaron con el programa DaqView (IoTech, EUA) como archivos .txt. El DaqBook se conecta al tractor y a la computadora a bordo del tractor con el programa Minitab y Excel, donde se puede ver el patinaje calculado.

Con el método automatizado, la medición y el cálculo del patinaje (S , %) de las ruedas de tracción se realizó sobre la marcha (Ecuación 2). Las distancias requeridas se midieron con los codificadores de la siguiente manera: 1) la distancia real (Ad , m) recorrida por el tractor con el implemento se calculó a partir de las vueltas de la rueda delantera medidas con el codificador y 2) la distancia teórica (Td , m), la cual debería recorrer el tractor si no se produce patinaje, se obtuvo a partir de los giros de la rueda trasera de tracción medidos con el codificador.

$$S = \frac{(Td - Ad)}{Td} \times 100 \quad (2)$$

Prueba y calibración del sistema en laboratorio

La calibración del sistema se realizó en laboratorio con el fin de generar dos ecuaciones (una por cada codificador) para calcular la distancia recorrida por las ruedas traseras y las delanteras. Los codificadores se probaron para verificar y registrar el número de pulsos por cada vuelta. Las señales se almacenaron en el DaqBook 2000 y se procesaron en una computadora. Se realizaron cinco pruebas con 10 repeticiones cada una,

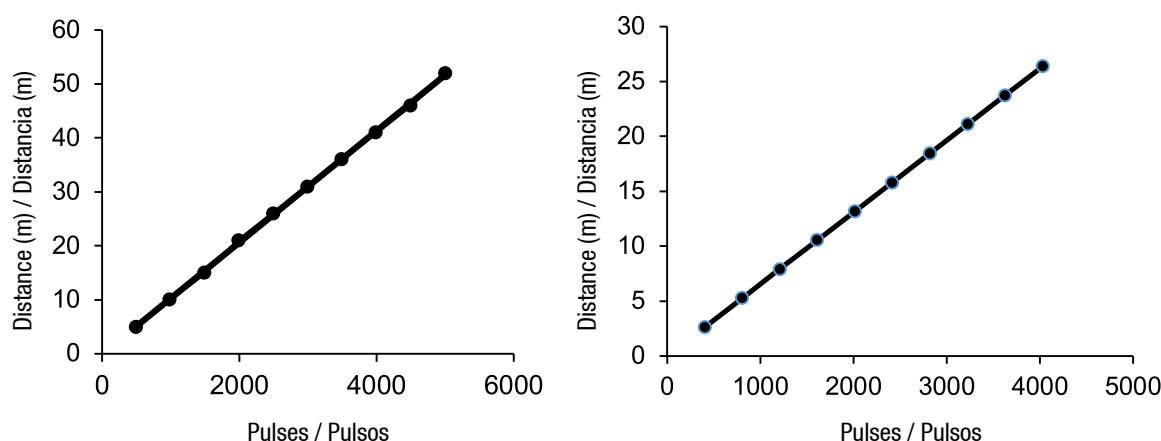


Figure 2. Graphs and equations of the relationship of pulses and distance for the rear wheel (left) and the front wheel (right).
Figura 2. Relación número de pulsos-distancia de la rueda trasera (izquierda) y la rueda delantera (derecha).

$$Ad = 2\pi r = 2\pi \times 0.42 = 2.6389 \times \frac{m}{\text{wheel turn}} \quad (4)$$

With the pulses per wheel turn measured in the laboratory and the distance per turn, a database was developed relating the number of pulses with the distance for the rear and front wheels. With that information, a lineal regression (Figure 2) was performed using the software Minitab and two equations were generated, one for the rear wheel encoder pulses (Equation 5) and one for the front wheel encoder pulses (Equation 6).

$$Td = 0.1292 + 0.01029 \times \text{Pulses} \quad (5)$$

$$Ad = 0.00479 + 0.006545 \times \text{Pulses} \quad (6)$$

Validation test of the system on surface of asphalt

The system for slippage measurement based on encoders was installed in a John Deere tractor (model 6403, 2WD) with a rated engine power of 73 kW. Gross weight of the tractor is 5590 kg and the front to rear weight distribution is 35 and 65 % (Figure 3).

To verify the performance of the measurement slippage system on a hard surface, tests were conducted on asphalt. For this purpose, a randomized block experiment was set up with five distances as treatments (20, 40, 60, 80 and 100 m); each treatment was replicated four times. All trials were conducted at a travelling speed of 5.65 km·h⁻¹ and runs started from 0 km·h⁻¹. The system was reset by an operator after each run to label them.

System trials with tillage implements

To validate the performance of the system under field conditions, three tractor runs were made using different tillage implements (Figure 3). First, the

y de los resultados obtenidos se registró un promedio de pulsos por vuelta.

Con los radios de las ruedas traseras y delanteras del tractor, se calcularon la Td (Ecuación 3) y la Ad (Ecuación 4):

$$Td = 2\pi r = 2\pi \times 0.82 = 5.1522 \times \frac{m}{\text{giro de la rueda}} \quad (3)$$

$$Ad = 2\pi r = 2\pi \times 0.42 = 2.6389 \times \frac{m}{\text{giro de la rueda}} \quad (4)$$

Con los pulsos por vuelta de rueda y la distancia por vuelta medidos en el laboratorio, se elaboró una base de datos que relaciona el número de pulsos con la distancia de las ruedas traseras y delanteras. Con dicha información, se realizó una regresión lineal (Figura 2) con ayuda del programa Minitab y se generaron dos ecuaciones de la distancia calculada, una de los pulsos del codificador de la rueda trasera (Ecuación 5) y la otra de los pulsos del codificador de la rueda delantera (Ecuación 6).

$$Td = 0.1292 + 0.01029 \times \text{Pulsos} \quad (5)$$

$$Ad = 0.00479 + 0.006545 \times \text{Pulsos} \quad (6)$$

Prueba de validación del sistema en superficie de asfalto

El sistema de medición del patinaje basado en codificadores se instaló en un tractor John Deere (modelo 6403, 2WD) con una potencia nominal al motor de 73 kW. El peso bruto del tractor es de 5590 kg, y la distribución del peso entre la parte delantera y la trasera es de 35 y 65 % (Figura 3).

Para verificar el rendimiento del sistema de medición en una superficie dura, se realizaron pruebas en asfalto. Para ello, se estableció un experimento en bloques aleatorios con cinco distancias como tratamientos (20,



Figure 3. a) Disk plow and b) chisel plow used in the trials.

Figura 3. a) Arado de discos y b) arado de cincel utilizados en los ensayos.

slippage was measured when working with a JD645 plow with four smooth discs (711 mm diameter and 6.55 mm thick each, with a total weight of 642 kg). The second test was made by working with a JD610 chisel plow with eight “C” type chisels and a total weight of 618 kg. Both implements have a three-point link attachment category II. The travelling speed was 5.65 km·h⁻¹. The condition of the soil surface (top layer from 0 to 5 cm) of the trial plot had a penetration resistance of 1045 kPa and 5.85 % of volumetric water content.

Comparison of slippage measurements results from the manual method and the systems based on encoders

The comparison of the measurement methods was carried out on four tractor runs with the disk plow already described. Slippage was measured simultaneously with both methods, and the standard manual method (Smith et al., 1994) was used as a reference. For the standard manual method, ten turns of the rear (traction) wheels are counted with the implement lifted, and the distance (*D_{ul}*) is measured with a tape measure. For the *DI*, ten-wheel turns were also counted, but with the implement working, then the distance was measured with a tape measure. Slippage with an encoder-based system was calculated with the data recorded when the implement was working.

Evaluation of an encoder-based system at different soil moisture content

For this purpose, a field experiment was established with a randomized block statistical arrangement. The treatments were four levels of volumetric soil moisture (15, 25, 35 and 40 %) with six replicates each. The experimental units were 1 m wide by 100 m long.

40, 60, 80 y 100 m); cada tratamiento se replicó cuatro veces. Todos los ensayos se realizaron a una velocidad de desplazamiento de 5.65 km·h⁻¹ y los recorridos comenzaron desde 0 km·h⁻¹. El sistema fue restablecido por un operador después de cada recorrido para etiquetarlos.

Ensayos del sistema con implementos de labranza

Para validar el rendimiento del sistema en condiciones de campo, se realizaron tres recorridos con el tractor utilizando dos implementos de labranza diferentes (Figura 3). Primero se midió el patinaje del tractor al trabajar con un arado JD645 de cuatro discos lisos (711 mm de diámetro y 6.55 mm de espesor cada uno, con peso total de 642 kg). El segundo ensayo se realizó con un arado de cincel JD610 con ocho cinceles tipo “C” y peso total de 618 kg. Ambos implementos contaban con un acoplamiento de tres puntos categoría II. La velocidad de desplazamiento en estos ensayos fue de 5.65 km·h⁻¹. La superficie del suelo (capa superior de 0 a 5 cm) de la parcela del ensayo tenía una resistencia a la penetración de 1045 kPa y una humedad volumétrica de 5.85 %.

Comparación de los resultados del método manual estándar y el sistema basado en codificadores

La comparación de los métodos de medición se realizó en cuatro recorridos del tractor trabajando con el arado de discos. El patinaje se midió simultáneamente con ambos métodos, y se usó como referencia el método manual estándar (Smith et al., 1994). Para el método manual estándar se cuentan diez vueltas de las ruedas traseras (de tracción) con el implemento levantado, y la distancia (*D_{ul}*) se mide con una cinta métrica. Para la *DI*, también se contaron diez vueltas de la rueda, pero con el implemento trabajando, y

Traction tires were ballasted with water up to 75 % of total volume, the rest was air until pressure reached 207 kPa. Mean soil resistance in the surface layer (0 to 5 cm) was 1637 kPa and soil cover was about 80 %, and dry matter was 3.47 Mg·ha⁻¹.

Depth and working speed of the disk plow (0.15 m and 4.5 km·h⁻¹, respectively) were kept constant so that the only factor affecting slippage was soil moisture content. The soil was irrigated with a sprinkler system until surface saturation was reached, and then left to dry out until the moisture levels of the treatments were achieved. The monitoring of the soil moisture content was made with a TDR probe (TDR 300, FieldScout®, EUA).

Analysis of variance and Tukey's mean comparison test ($P \leq 0.05$) were performed using the statistical software InfoStat v2018.

Results and discussion

Validation test of the system on surface of asphalt

Table 1 shows that slippage obtained on the asphalt surface are close to zero, which occurs when the tractor makes minimal traction, just to move forward with the implement lifted in a hard surface (Zoz & Grisso, 2003). According to these results, the only value with significant differences was the slippage measured at 20 m. Slippage in short runs (20 m) is not the best condition because starting from 0 km·h⁻¹ the target speed is not well established over short distances.

The results obtained on this hard surface are an indication that the system works correctly measuring the distances and calculating the percentage of slippage under this condition.

Trial of the system with tillage implements

The results of the validation of slippage measurements working with two tillage implements are shown in Figure 4. The differences in the values found were

posteriormente la distancia se midió con una cinta métrica. El patinaje por el método manual estándar se calculó con la Ecuación 1, y por el sistema basado en codificadores se calculó con los datos registrados cuando el implemento estaba en uso.

Evaluación del sistema basado en codificadores a diferentes contenidos de humedad del suelo

Para esta determinación, se estableció un experimento en campo con un arreglo estadístico de bloques al azar. Los tratamientos fueron cuatro niveles de humedad volumétrica del suelo (15, 25, 35 y 40 %), con seis repeticiones cada uno. Las unidades experimentales fueron de 1 m de ancho por 100 m de longitud. Los neumáticos de tracción se lastraron con agua hasta el 75 % de su volumen total, el resto se llenó de aire hasta que la presión alcanzó los 207 kPa. La resistencia media del suelo en la capa superficial (0 a 5 cm) era de 1637 kPa, la cobertura del suelo era de aproximadamente 80 % y la materia seca era de 3.47 Mg·ha⁻¹.

La profundidad y la velocidad de trabajo del arado de discos (0.15 m y 4.5 km·h⁻¹, respectivamente) se mantuvieron constantes para que el único factor que afectara al patinaje fuera el contenido de humedad del suelo. El suelo se regó con un sistema de aspersión hasta alcanzar la saturación en la superficie, y luego se dejó secar hasta alcanzar los niveles de humedad de los tratamientos. El monitoreo del contenido de humedad del suelo se realizó con una sonda TDR (TDR 300, FieldScout®, EUA).

El análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) se realizó con el programa estadístico InfoStat v2018.

Resultados y discusión

Prueba de validación del sistema en superficie de asfalto

En el Cuadro 1 se puede apreciar que los patinajes obtenidos en la superficie de asfalto son cercanos a cero,

Table 1. Percentage of slippage measured at different distances on a surface of asphalt.

Cuadro 1. Porcentaje de patinaje medido en diferentes distancias en una superficie de asfalto.

Distances (m)/Distancias (m)	Slippage (%) / Patinaje (%)
40	1.45 a ^z
100	1.37 ab
60	1.30 ab
80	1.05 ab
20	0.72 b

^zMeans with the same letter are not statistically different (Tukey, $P \leq 0.05$). Standard deviation = 0.39, mean = 1.18.

^zMedias con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). Desviación estándar = 0.39, media = 1.18.

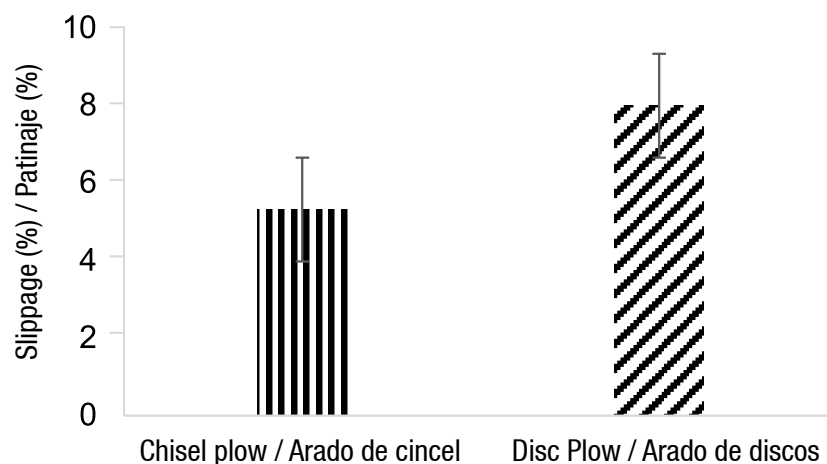


Figure 4. Mean slippage values for two types of tillage implements.

Figura 4. Valores medios de patinaje con dos tipos de implementos de labranza.

mainly due to variations in working depth (0.25 m for the disk plow and 0.14 m for the chisel plow), since more traction (generating more slippage) was required to pull the disk plow. Differences on working depth also depends on the weight of the implement (Olatunji et al., 2009); in this case the disk plow was heavier than the chisel plow under the same condition of soil resistance.

The results of the measurements are in accordance with the type of implement. The disk plow demands a greater traction force compared to the chisel plow (López-Vázquez et al., 2019); therefore, slippage was greater with the disk plow. With the chisel plow, slippage values obtained reported were more uniform. This could be because with this implement it was possible to set and maintain, with small variations, the working depth.

Comparison of slippage measurements results from the manual method and the systems based on encoders

There is small difference in the values that result from the measurements made with the manual method of reference (Smith et al., 1994) and the encoder-based system. Figure 5 shows the mean values of five runs measured simultaneously with both methods.

The encoder-based method is more efficient than the standard manual method. According to Pranav et al. (2010), an acceptable error in slippage measurement is approximately $\pm 2\%$. Therefore, if the manual method is considered as a reference, the values calculated with the encoder-based method are within this tolerance, since the mean of slippage of all runs with the manual method is 7.5 %, and with the encoder-based method it is 7.75 %, which gives an average difference of 0.25 %.

lo cual se produce cuando el tractor hace una tracción mínima, sólo para avanzar con el implemento levantado en una superficie dura (Zoz & Grisso, 2003). De acuerdo con los resultados, el único valor que presentó diferencias significativas fue el patinaje medido a 20 m. El patinaje en recorridos cortos (20 m) no es la mejor condición, pues a partir de $0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ la velocidad objetivo no está bien establecida en distancias cortas.

Los resultados obtenidos en la superficie dura indican que el sistema basado en codificadores mide las distancias y calcula el porcentaje de patinaje adecuadamente bajo esta condición.

Ensayo del sistema con implementos de labranza

En la Figura 4 se muestran los resultados de validación de las mediciones de patinaje con dos implementos de labranza. Las diferencias en los valores obtenidos se debieron, principalmente, a las variaciones en la profundidad de trabajo (0.25 m para el arado de discos y 0.14 m para el arado de cincel), ya que se necesitó más tracción para jalar el arado de discos, lo cual generó un mayor patinaje. Las profundidades de trabajo dependen del peso del implemento (Olatunji et al., 2009); en este caso, el arado de discos era más pesado que el arado de cincel en las mismas condiciones de resistencia del suelo.

Los resultados obtenidos son acordes con el tipo de implemento. El arado de discos demanda una mayor fuerza de tracción en comparación con el arado de cincel (López-Vázquez et al., 2019); por ello, el patinaje fue mayor con el arado de discos. Con el arado de cincel, los valores de patinajes obtenidos fueron más uniformes. Esto se pudo deber a que con dicho implemento se pudo fijar y mantener, con pequeñas variaciones, la profundidad de trabajo.

Evaluation of an encoder-based system at different soil moisture content

Figure 6 shows the results of the field experiment. As the moisture content of the soil increases, slippage values are higher. At the highest moisture content, the maximum slippage threshold allowed for field operations, which is 15 %, is shown. These results are consistent with those reported by Amponsah et al. (2014) and Mamkagh (2019).

Significant statistical differences resulted among the different soil moisture contents (Figure 6), which confirms that the measurements of distances and the

Comparación del patinaje obtenido con método manual estándar y el sistema basado en codificadores

Se observó una pequeña diferencia en los valores obtenidos con el método manual de referencia (Smith et al., 1994) y el sistema basado en codificadores. La Figura 5 muestra los valores medios de cinco recorridos medidos simultánea con ambos métodos.

El método basado en codificadores es más eficaz que el método manual estándar. De acuerdo con Pranav et al. (2010), un error aceptable en la medición del patinaje es de aproximadamente ± 2 %. Por lo anterior,

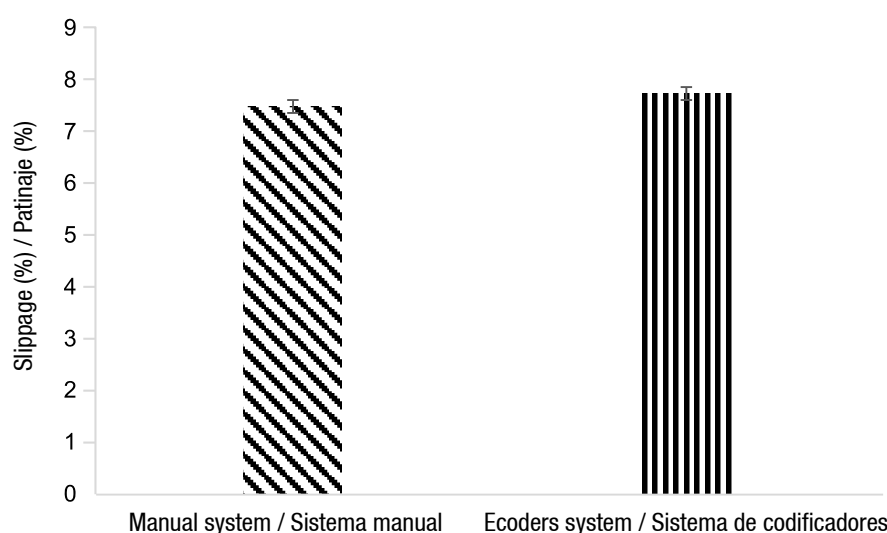


Figure 5. Comparison of slippage measurements with the manual method and method based on encoders.

Figura 5. Comparación de la medición del patinaje de un tractor con el método manual estándar y el método basado en codificadores.

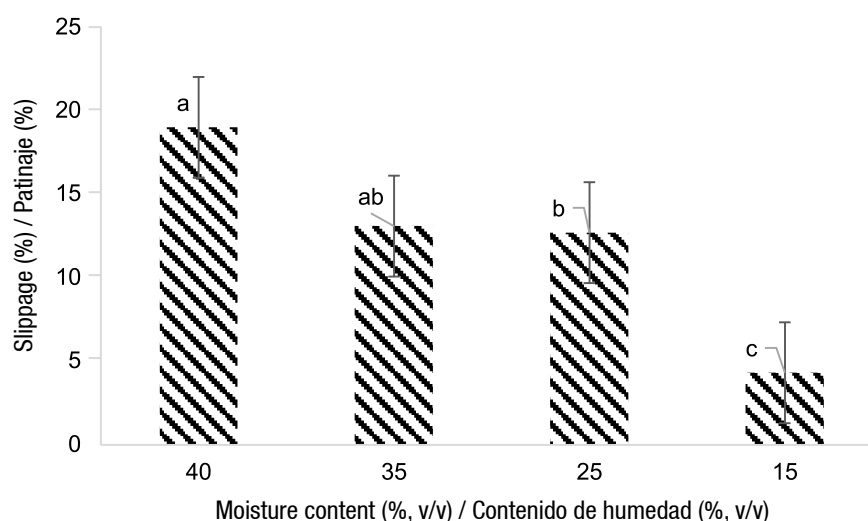


Figure 6. Tractor slippage at four soil moisture contents with disk plow.

Figura 6. Patinaje del tractor obtenido en cuatro contenidos de humedad del suelo con arado de disco.

calculations of slippage with the encoder-based system are reliable. Similar results and trends were reported by Tayel et al. (2015) when measuring slippage.

Conclusions

The system designed, assembled and evaluated for measuring slippage in agricultural tractors is reliable. The values of slippage found by using the reference manual method and the method based on encoders have very small differences, which are within the error allowed for slippage measurements.

The results of field evaluation of the system were consistent with the type of implement and working depth, the heavier the implement and the more working depth corresponded to more slippage. The same occurred with soil moisture content, where higher slippage was recorded as moisture increased. This indicates that the measurement of distances by wheel turns and the calculation of the percentage of slippage are correct.

The slippage measurement encoder-based system is reliable for automatically measuring the slippage of agricultural tractor under different field conditions. Because the values of slippage are inline, the next step is to integrate a system that uses the values to control variables such as working depth or drive tire pressure.

End of English version

References / Referencias

- Amponsah, S. K., Bobabee, 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. *Applied Engineering in Agriculture*, 30(3), 391-403. <https://doi.org/10.13031/aea.30.10495>
- Čiplienė, A., Gurevičius, P., Janulevičius, A., & Damanauskas, V. (2019). Experimental validation of tyre inflation pressure model to reduce fuel consumption during soil tillage. *Biosystems Engineering*, 186(4), 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.023>
- Gupta, C., Tewaria, V. K., Kumar, A. A., & Shrivastava, P. (2019). Automatic tractor slip-draft embedded control system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, 104947. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104947>
- Imran, M., Özçatalbaş, O., & Bashir, M. K., (2020). Estimation of energy efficiency and greenhouse gas emission of cotton crop in South Punjab, Pakistan. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(3), 216-224. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.09.007>

si se considera como referencia el método manual, los valores calculados con el método basado en codificadores están dentro de dicha tolerancia, ya que la media del patinaje de todas las ejecuciones con el método manual es de 7.5 %, y con el método basado en codificadores es de 7.75 %, lo cual da una diferencia promedio de 0.25 %.

Evaluación del sistema basado en codificadores en diferentes contenidos de humedad del suelo

La Figura 6 muestra los resultados de la evaluación en campo. A medida que aumenta el contenido de humedad del suelo, los valores de patinaje son más altos. Con el mayor contenido de humedad se exhibe el umbral de patinaje máximo permitido para las operaciones de campo, que es de 15 %. Estos resultados concuerdan con los reportados por Amponsah et al. (2014) y Mamkagh (2019).

En general, se obtuvieron diferencias estadísticas significativas entre los diferentes contenidos de humedad del suelo (Figura 6), lo cual confirma que las mediciones de las distancias y los cálculos de patinaje con el sistema basado en codificadores son fiables. Tayel et al. (2015) obtuvieron resultados y tendencias similares al medir el patinaje.

Conclusiones

El sistema diseñado, montado y evaluado para medir el patinaje de tractores agrícolas es eficaz. Los valores de patinaje obtenidos con el método manual estándar y el método basado en codificadores presentaron diferencias pequeñas, las cuales están dentro del error permitido para mediciones de patinaje.

Los resultados de la evaluación en campo fueron consistentes con el tipo de implemento y la profundidad de trabajo; a mayor peso del implemento y mayor profundidad de trabajo, mayor fue el patinaje. Lo mismo ocurrió con el contenido de humedad del suelo, donde se obtuvo mayor patinaje conforme aumentó la humedad. Esto indica que la medición de las distancias y el cálculo del porcentaje de patinaje son correctos.

El sistema de medición basado en codificadores es eficaz para medir automáticamente el patinaje del tractor agrícola en diferentes condiciones de trabajo. Debido a que los valores de patinaje son lineales, el siguiente paso es integrar un sistema que utilice los valores para controlar variables como la profundidad de trabajo o la presión de los neumáticos de tracción.

Fin de la versión en español

- Kumar, A. A., Tewari, V. K., Gupta, C., & Pareek, C. M. (2017). A device to measure wheel slip to improve the fuel efficiency of off road vehicles. *Journal of Terramechanics*, 70, 1-11 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2016.11.002>
- López-Vázquez, A., Cadena-Zapata, M., Campos-Magaña, S., Zermeño-González, A., & Méndez-Dorado, M. (2019). Comparison of energy used and effects on bulk density and yield by tillage systems in a semiarid condition of Mexico. *Agronomy*, 9(4), 189. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040189>
- Mamkagh, A. (2019). Effect of soil moisture, tillage speed, depth, ballast weight and, used implement on wheel slippage of the tractor: A review, *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*, 9(1), 1-7. <https://doi.org/10.9734/AJAAR/2019/46706>
- Moitzi, G., Wagentristsl, H., Refenner, K., Weingartmann, H., Piringer, G., Boxberger, J., & Gronauer, A. (2014). Effects of working depth and wheel slip on fuel consumption of selected tillage implements. *CIGR Journal*, 16(1), 182-190 <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2661>
- Olatunji, O. M., Akor, A. J., Ozogu, B. A., Burubai, W., & Davies, R. M. (2009). Modeling the effect of weight and forward speed on the performance of disc plough. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 8(2), 130-149 <https://www.researchgate.net/publication/259620931>
- Pranav, P. K., Pandey, K. P., & Tewari, V. K. (2010). Digital wheel slipmeter for agricultural 2WD tractors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73(2), 188-193 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.05.003>
- Pranav, P. K., Tewari, V. K., Pandey, K. P., & Jha, K. R. (2012). Automatic wheel slip control system in field operations for 2WD tractors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.002>
- Romantchik-Kriuchkova, E., Morelos-Moreno, A., Villaseñor-Pereá, C. A., & Pérez-Sobrevilla, L. (2015). Zonas de trabajo del conjunto del tractor agrícola con implemento en los esquemas de tracción 4x2 y 4x4. *Agrociencia*, 49(1), 53-67. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30236850004.pdf>
- Šarauskis, E., Vaitauskienė, K., Romaneckas, K., Jasinskas, A., Butkus, V., & Kriauciūnienė, 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>
- 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>
- Shafaei, S. M., Loghavi, M., & Kamgar, S. (2019). A practical effort to equip tractor-implement with fuzzy depth and draft control system. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(2), 191-203. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.12.008>
- Šmerda, T., & Čupera, J., (2010). Tire inflation and its influence on drawbar characteristics and performance – Energetic indicators of a tractor set. *Journal of Terramechanics*, 47(6), 395-400. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2010.02.005>
- Smith, D. W., Sims, B. G., & O'Neill, D. H. (1994). *Testing and evaluation of agricultural machinery and equipment: Principles and practices*. FAO Agricultural Engineering Services. <http://www.fao.org/3/t1841e/t1841e.pdf>
- Tayel, M., Shaaban, S., & Mansour, H. (2015). Effect of plowing conditions on the tractor wheel slippage and fuel consumption in sandy soil. *International Journal of ChemTech Research*, 8(12), 151-159. [https://www.sphinxnsai.com/2015/ch_vol8_no12/1/\(151-159\)V8N12CT.pdf](https://www.sphinxnsai.com/2015/ch_vol8_no12/1/(151-159)V8N12CT.pdf)
- Zoz, F. M., & Grisso, R. D. (2003). *Traction and tractor performance*. American Society of Agricultural Engineers. http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Molin/leb5004/Material_para_leitura/Traction_Tractor_Performance.pdf