



universidad
de león

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRARIA Y FORESTAL

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA AGRARIA MENCIÓN EN INGENIERÍA RURAL

Desarrollo y evaluación de un sistema de adquisición de datos para la determinación de pérdidas de potencia por rodadura en tractores.

Development and evaluation of a data acquisition system for the determination of power losses due to rolling resistance in agricultural tractors.

Alumno: Olivier Fernández Beneítez

Tutores: Francisco Javier López Díez

Ángel Ruíz Padín

León, julio de 2022

ANEXO 9. HOJA DE CONFORMIDAD

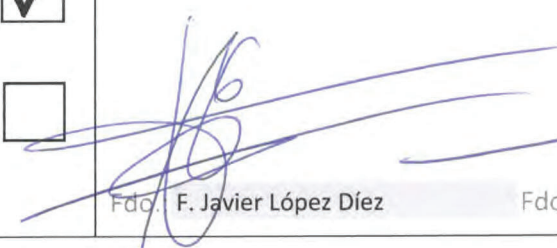

TRABAJOS DE CARÁCTER CIENTÍFICO O TÉCNICO

Título: Desarrollo y evaluación de un sistema de adquisición de datos para la determinación de pérdidas de potencia por rodadura en tractores

Autor: **Olivier Fernández Beneítez**

ELEMENTOS DE OBLIGADA APARICIÓN

- Resumen.** De 400 palabras como máximo.
- Introducción.** Debe incluir los motivos por los que se realiza el trabajo y los antecedentes o estudios previos sobre el mismo.
- Objetivos.** Se detallarán de forma clara y concisa los objetivos que se pretenden alcanzar.
- Material y Métodos / Metodología.** Descripción de las técnicas, los materiales empleados, y los métodos de análisis de datos, de forma que se garantice la repetibilidad de los mismos.
- Resultados / Análisis / Diagnóstico.** La información obtenida con el estudio se presentará de forma sistemática, preferentemente mediante tablas y figuras que deberán ser en todo caso autoexplicativas, y deberán aparecer debidamente numeradas y referenciadas en un índice propio.
- Discusión.** Los resultados propios del trabajo deberán ser discutidos relacionándolos, en su caso, con otros de estudios precedentes.
- Conclusiones.** Deberán ser claras, concisas, y coherentes con los objetivos propuestos. En el caso planes de ordenación de recursos forestales, propuestas concretas con objetivos, líneas y medidas.
- Planos / Mapas.** Serán obligatorios en trabajos topográficos, estudios de implantación de cultivos o transformaciones de explotaciones, y en general, cualquier trabajo técnico o científico asociado a áreas, parcelas, o territorios determinados.
- Bibliografía.** Listado de las fuentes de información utilizadas debidamente referenciadas y ordenadas.

OBTENIDA LA CONFORMIDAD <input checked="" type="checkbox"/>	El tutor/es:  
DENEGADA LA CONFORMIDAD (No se autoriza la presentación) <input type="checkbox"/>	
	Fdo.: F. Javier López Díez Fdo.: Ángel Ruiz Padín



Índice general.

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. LOS TRABAJOS DE TRACCIÓN Y EL NEUMÁTICO AGRÍCOLA.	7
1.2. LA RESISTENCIA A LA RODADURA Y EL PATINAMIENTO.....	8
1.3. PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA RODADURA.	10
1.4. TENDENCIAS EN NEUMÁTICOS AGRÍCOLAS.....	12
1.5. DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE RODADURA.....	16
2. OBJETIVOS.....	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
3.1. EMPLAZAMIENTO DE LOS ENSAYOS.....	19
3.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	19
3.3. Diseño del sistema electrónico.....	20
3.4. Ficheros y archivos generados.....	32
3.5. Tractor unidad de ensayo.....	33
3.6. Diseño experimental	37
3.7. Ensayo de eficiencia en tracción.....	40
3.8. Medición del índice de cono.....	42
3.9. Características del suelo y clima.....	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1. Resultados de los ensayos de resistencia a la rodadura.	50
4.2. Resultados DE LOS ensayos PARA EL BALANCE DE TRACCIÓN.	58
4.3. ÍNDICE DE CONO y determinación analítica de k.	62
5. CONCLUSIONES.....	65
6. BIBLIOGRAFÍA.....	66



Índice de figuras.

Figura 1. Fuerzas intervinientes rueda conducida/suelo (Wismer y Luth, 1973).....	11
Figura 2. Capacidad de deformación de un neumático VF (Continental CombineMaster para cosechadoras).....	13
Figura 3. Capacidad de deformación del neumático Pnueutrac de Trelleborg,(Trelleborg).	14
Figura 4. Sistema de teleinflado de Michelin, que aprovecha el circuito neumático que incorporan algunos tractores (FIMA 2022).	16
Figura 5. Esquema del sistema de adquisición de datos.....	20
Figura 6. Esquema de conexiones y componentes electrónicos.....	21
Figura 7. Instalación de equipo y sensores en el tractor.....	21
Figura 8. Raspberry pi 3.....	22
Figura 9. Esquema de programación Raspberry pi 3.	23
Figura 10. Características del microcontrolador Arduino Nano.	24
Figura 11. Captura de imagen del dashboard creado	25
Figura 12. Especificaciones de la célula de carga Magtrol LB214.....	26
Figura 13. Hoja de calibración de la célula de carga Magtrol LB-214	27
Figura 14. Balanza electrónica para la calibración realizada en Talleres Benavides (15/09/2021).....	28
Figura 15. Diseño del acoplamiento para la célula de carga.....	29
Figura 16. Conexiones convertidor analógico-digital HX711	30
Figura 17. Detalle de instalación del radar doppler.....	31
Figura 18. Módulo GNSS y montaje en tractor.....	32
Figura 19. Formato de los ficheros csv generados por el sistema. Izquierda, célula de carga,, derecha, velocidad	33
Figura 20. Formato del paquete de datos protocolo NMEA enviado por el módulo GNSS	33
Figura 21. Pesaje del tractor en báscula industrial.....	34
Figura 22. Dimensiones y cotas del tractor CASE Farmall 85C.....	35
Figura 23. Esquema general de los ensayos previstos.....	37
Figura 24. Circuito de ensayos en la Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal.....	39



Figura 25. Esquema de ensayo para obtener deslizamiento. Arriba, velocidad teórica y abajo, velocidad real en cada presión de inflado	41
Figura 26. Esquema de ensayos en tracción en suelo con laboreo superficial	41
Figura 27. Penetrómetro Eikelkamp.....	42
Figura 28. Imagen del recorrido total del ensayo suministrada por el sistema.	48
Figura 29. Gráfica del recorrido total de un ensayo.	49
Figura 30. Imagen del recorrido seleccionado en uno de los ensayos. En color amarillo, selección de la zona de toma de datos	50
Figura 31. Gráfica de resultados de uno de los ensayos. En línea recta verde (CCsel) se indica el método de marcaje que se visualiza en la figura anterior en color amarillo en la trayectoria.....	51
Figura 32. Resultados del coeficiente k en los distintos suelos según presión de inflado de los neumáticos.....	57
Figura 33. Ensayo de tracción en suelo con laboreo superficial.	58



Índice de tablas.

Tabla 1. Características del tractor utilizado en el ensayo	34
Tabla 2. Neumáticos equipados en el tractor CASE	35
Tabla 3. Capacidad de carga del neumático 380/70 R24.	36
Tabla 4. Capacidad de carga del neumático 480/70 R34.	36
Tabla 5. Condiciones iniciales de cada ensayo.	38
Tabla 6. Características generales de suelo y clima.	44
Tabla 7. Resistencia a la penetración suelo sin laboreo. Valores en Mpa.	45
Tabla 8. Resistencia a la penetración suelo con laboreo superficial. Valores en Mpa.	46
Tabla 9. Resistencia a la penetración suelo con suelo arado. Valores en Mpa.	47
Tabla 10. Resumen de datos adquiridos por el sistema con comparación de coeficientes de variación en los intervalos de medida para 1,6 y 2 bar.	53
Tabla 11. Resumen de datos adquiridos por el sistema con comparación de coeficientes de variación en los intervalos de medida para presiones de 0,8 bar.	54
Tabla 12. Coeficientes k calculados con los ensayos. $K = F_s \text{ media}/41,52$ (peso adherente total).....	55
Tabla 13. Datos de k calculado según suelo y presión de inflado. CV es el coeficiente de variación de todos los datos a distintas velocidades.	56
Tabla 14. Balance de fuerzas. $(F_s \text{ media})k$ corresponde a la pasada con el apero levantado. FT es la fuerza de tiro demandada por el apero $(FT = F - F_k)$	60
Tabla 15. Velocidades obtenidas en el ensayo con y sin tracción (velocidades real y teórica respectivamente).	60
Tabla 16. Composición de balance de tracción:.....	61
Tabla 17. Valores de Índice de Cono obtenidos en el suelo sin laboreo. $C_n =$ valor numérico de neumático de Wismer y Luth.	63
Tabla 18. Valores de Índice de Cono obtenidos en el suelo con laboreo superficial medidos en la huella del tractor. $C_n =$ valor numérico de neumático de Wismer y Luth.	63
Tabla 19. Valores de Índice de Cono obtenidos en el suelo con laboreo superficial medidos en la huella del tractor. $C_n =$ valor numérico de neumático de Wismer y Luth.	64



Resumen.

La tecnología disponible hoy en día para la optimización de las labores agrarias ha mejorado drásticamente, y dichas tareas se realizan de forma más rápida y efectiva con el valor añadido de la captación de datos, tanto de los cultivos como de los suelos. El tractor desempeña multitud de tareas fundamentales en las explotaciones agrarias y los neumáticos deben adaptarse a muy diferentes condiciones de uso. La potencia de tracción que se puede desarrollar con el tractor depende en gran medida del conjunto rueda/suelo. Los neumáticos y la presión de inflado de los mismos son factores decisivos para conseguir una mayor productividad, reducir costes y disminuir la compactación de los suelos.

El presente trabajo consiste en el diseño, montaje y puesta a punto de un sistema de medida de la fuerza de resistencia a la rodadura empleando un sensor dinamométrico y sensores de velocidad. Con este dispositivo se han realizado varios ensayos para comprobar la capacidad de medida, en función del estado del suelo, de la velocidad de trabajo y de la presión de inflado de los neumáticos, para comprobar al mismo tiempo la influencia de estos en las pérdidas por rodadura. Se ha determinado de esta forma valores específicos de la resistencia a la rodadura en tractores de tamaño medio, como el utilizado en el ensayo y se han comparado los valores con los del modelo más aceptado para a predicción de dicho parámetro. Utilizando el mismo equipo, se ha evaluado la capacidad de medida de la fuerza de tiro utilizando un tractor auxiliar de suficiente potencia, para hacer un balance de tracción simple.

Los resultados han permitido obtener valores de resistencia a la rodadura coherentes con los propuestos en otros estudios, y corroborando la validez de las medidas. El equipo permite la determinación del patinamiento, pero no de forma simultánea a la resistencia a la rodadura, por lo que se plantea la incorporación de sensores que permitan detectar dicho patinamiento en futuros trabajos.



1. INTRODUCCIÓN.

Actualmente la modernización y evolución de la producción agrícola ha incorporado al campo multitud de innovaciones tecnológicas que proporcionan al agricultor soluciones para mejorar sus producciones y optimizar los recursos. El tractor agrícola se ha convertido en una máquina de gran versatilidad que arrastra un gran abanico de equipos que demandan distintas potencias y ejercen diferentes acciones al suelo. Por ello, el papel que juegan los neumáticos para ejercer las labores agrícolas y conservar las características del suelo son fundamentales. La correcta elección de los neumáticos, así como un uso adecuado de ellos, nos genera grandes beneficios a largo plazo, tanto económicos como técnicos. Para evitar la compactación del suelo, un desgaste innecesario de los neumáticos y un consumo excesivo de combustible es necesario trabajar con las presiones adecuadas de inflado. Determinar la presión de inflado correcta que deben llevar los neumáticos para lograr un trabajo eficiente, suele ser un interrogante cuya respuesta comúnmente resulta ser bastante incierta. Realizar los cálculos matemáticos, exactos y eficientes, ofrecidos por los fabricantes de neumáticos agrícolas, implica la necesidad de contar con diversas variables que, en ocasiones, no están al alcance del usuario (Ferrari, 2016).

Tanto los fabricantes de neumáticos como los de maquinaria agrícola recomiendan unas presiones determinadas en función de las tareas a realizar siendo estas muy diferentes en trabajos que demandan mucha tracción y por tanto peso adherente a otras tareas que prácticamente no demandan potencia.

Realizando grandes esfuerzos de tracción, sobre todo en suelo suelto, una baja presión favorece una amplia zona de contacto y mejora la tracción, ahorrando, por tanto, combustible. Pero esta misma baja presión, sobre piso duro, en carretera, incrementa las pérdidas por rodadura, y, por tanto, el consumo y acelera el desgaste de los neumáticos (Juanós, 1999).

1.1. LOS TRABAJOS DE TRACCIÓN Y EL NEUMÁTICO AGRÍCOLA.

La forma más común de demandar energía al tractor es a través del trabajo de tracción. El tractor, como “motor de tracción”, no sólo debe ser capaz de generar suficiente energía como para auto transportarse, sino entregar un remanente de fuerza como para poder realizar el trabajo



de tracción demandado, empujar o arrastrar un equipo sobre un sustrato siempre deformable, el suelo agrícola. Como se pretende mantener esa fuerza a lo largo de una distancia, se puede concluir en la necesidad de contar con una suficiente cantidad de potencia tractiva, comúnmente llamada “potencia en la barra”. (Draghi, L. y Hilber, J. 2006)

Para poder utilizar la potencia que proporciona el motor de un tractor en tracción se necesita que el peso mínimo sea el adecuado, ya que si este es escaso se produce un aumento de patinamiento y por el contrario si el peso adherente es muy elevado aumentan las pérdidas por rodadura. Dichas pérdidas de potencia son inevitables, pero hay que intentar minimizarlas en su conjunto para obtener el mejor rendimiento posible y así obtener un consumo mínimo de combustible y de neumáticos, reducir la compactación del suelo y conseguir un máximo agarre lo que implica una mejora en eficiencia de tracción. El lastrado es especialmente útil para los trabajos que requieren mucha tracción, consiste en aumentar el peso del tractor para aumentar el agarre de los neumáticos o bajar el centro de gravedad cuando se trabaja con aperos pesados o con una fuerte tracción.

Lo que se busca principalmente es conseguir una máxima adherencia con una mínima compactación del suelo, lo cual repercutirá en minimizar las pérdidas por deslizamiento y la reducción del consumo de combustible (Boto, J.A., 2006).

1.2. LA RESISTENCIA A LA RODADURA Y EL PATINAMIENTO.

El esfuerzo de rodadura está conformado principalmente por la energía utilizada para la formación de la huella al deformarse el suelo, al empuje de la tierra y a la deformación del neumático o deflexión. (Perdock et al., 1990). Wood y Burt (1987) definen al esfuerzo de rodadura como la suma de las componentes horizontales de las tensiones normales de un neumático.

Cuando un neumático toma contacto con una superficie plana, la distribución de presiones será simétrica con respecto al eje vertical en la superficie de contacto, y la fuerza resultante es posicionada en el centro de dicha área. Cuando el neumático gira, la banda de rodadura se deforma y como resultado, la presión normal en la mitad delantera de la huella es mayor que en



la trasera provocando que la resultante de todas las fuerzas se ubique a una distancia “l” del eje de la rueda (figura 1).

Tan pronto como un neumático que soporta el peso de un vehículo comienza a moverse, la banda de rodadura y el flanco se ven sometidos a fuerzas de flexión y cizallamiento. Durante su uso, el neumático pierde y recupera su forma constantemente, y es en este proceso, conocido como histéresis, donde la energía se pierde disipada en forma de calor. Los componentes del neumático que contribuyen a la resistencia a la rodadura son el talón, los cinturones, el flanco, el butilo, la carcasa y, sobre todo, el dibujo de la banda de rodadura. (Continental, 2021).

El suelo, además de soportar la carga vertical que genera el paso de cualquier vehículo, es el punto de apoyo de la fuerza tangencial que el par en la rueda produce a través de los tacos del neumático, y si este punto de apoyo soporta la carga deformándose dentro de unos límites razonables, el tractor avanzará, pero si se rompe, el patinamiento o deslizamiento hará que el avance del tractor sea menor, pudiendo llegar a detenerse, y las ruedas, al seguir girando, no harán más que abrir un hoyo en el suelo, con indeseables consecuencias para el suelo y el trabajo a realizar, aun cuando no se llegue a producir un atascamiento total.

El patinamiento puede expresarse como la diferencia entre la velocidad teórica del tractor y la real, en relación con la velocidad teórica. Esta diferencia de velocidades es producto del corte del suelo y su desplazamiento por debajo del rodado, con la consiguiente disminución de la capacidad de trabajo del conjunto.

El parámetro que mide el rendimiento del conjunto, desde el punto de vista de la tracción, es la denominada “eficiencia de tracción”. Se define como la relación entre la fuerza desarrollada en el arrastre y el conjunto de fuerzas periféricas derivadas del par transmitido por la transmisión del tractor en el punto de contacto con el suelo.

Numerosos trabajos de investigación demuestran que la máxima eficiencia tractiva se alcanza cuando el coeficiente de tracción vale aproximadamente 0,4. El coeficiente de tracción o de adherencia es la relación entre la fuerza de tiro y el peso (fuerza normal) que gravita sobre las ruedas que traccionan. En neumáticos agrícolas y tractores convencionales de tracción trasera con eje delantero motriz (vulgarmente doble tracción), y en suelos labrados, el valor del patinamiento máximo recomendado que equilibra esos coeficientes puede llegar al 15%. Es



decir que una primera hipótesis básica es, armonizar el esfuerzo de tracción demandado por el implemento con el peso adherente del tractor (Draghi, L. y Hilber, J. 2006).

Por tanto, patinamiento y rodadura funcionan de manera antagónica. Cuando se desea reducir la pérdida de potencia por deslizamiento, por ejemplo, lastrando, se incrementa la pérdida por rodadura. Por tanto, debe buscarse un sumatorio de ambas mínimo, que proporcionará la máxima eficiencia en tracción.

Reducir la resistencia a la rodadura no es una tarea fácil porque es difícil mejorar este aspecto del neumático sin afectar negativamente a otros, como puede ser la maniobrabilidad, el agarre o el kilometraje. En el mercado, desde hace años, se han impuesto en los tractores de mediana y alta potencia, los neumáticos radiales. Este tipo de construcción brinda la posibilidad de obtener a igualdad de peso una huella más larga y por lo tanto una mayor superficie de contacto, esto trae aparejado una menor presión en la interfase rueda-suelo, posibilitando una menor compactación y un aumento de la adherencia.

1.3. PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA RODADURA.

Un modelo sencillo para predecir el coeficiente de rodadura k es el propuesto por Wismer y Luth (1973), Brixius (1987) y Wong y Domier (1989). Tratan de predecir la rodadura basándose en la resistencia a la penetración de un cono de acero con un vértice de 30° y un área de base de 3.23 o 1.23 cm^2 (base de la norma ASAE S 312.2). La ecuación obtenida a partir de numerosos ensayos en diferentes condiciones de suelo y vehículos

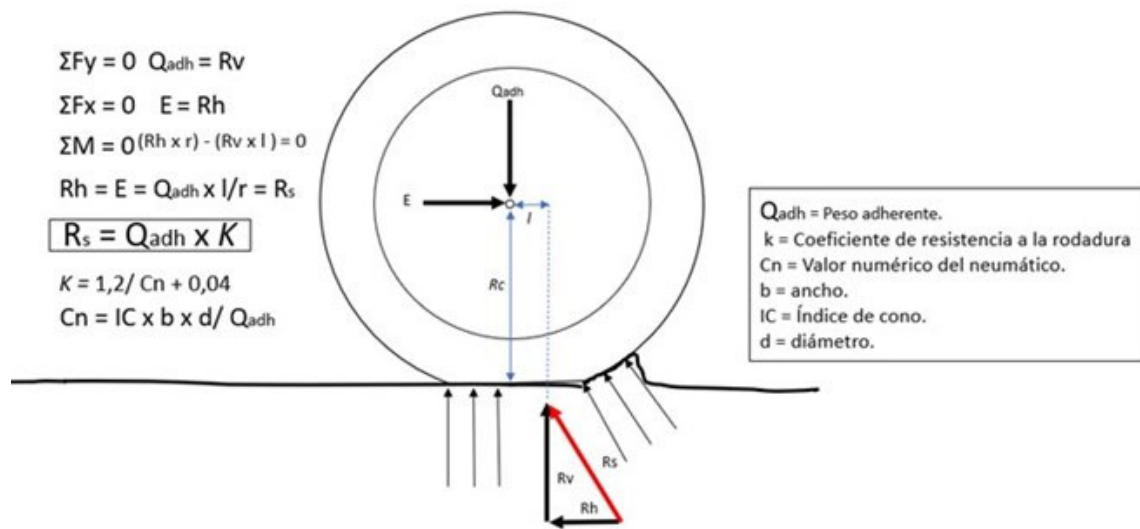


Figura 1. Fuerzas intervinientes rueda conducida/suelo (Wisner y Luth, 1973).

Conviene, por tanto, relacionar la fuerza tangencial que soporta el suelo con el deslizamiento que entre rueda y suelo se produce en ese momento, que, asimismo, depende de la carga vertical que actúa sobre las ruedas motrices, debida a la masa del tractor y a las transferencias de carga que pueden transmitir los aperos que arrastra.

McAllister (1983), condujo un ensayo en el que demostró que el coeficiente de rodadura varia con el diámetro, la carga, forma y dimensiones de la banda y tipo de neumático, la humedad del suelo y la presión de inflado.

Draghi (1989) y Botta (1997), coinciden en que la ecuación de predicción del esfuerzo de rodadura de un tractor agrícola que más se ajustó en trabajos predictivos similares fue la de McAllister, lo fundamentan es el hecho de que éste obtuvo su modelo a partir de situación de ruedas remolcadas.

Otros investigadores, (Gee-Clough et. Al., 1977; Bashford, 1985; Zoz y Wiley, 1995; Rosa's, 2000; Modest, 2010) han investigado el rendimiento de tracción para mejorarlo en condiciones específicas de suelo y tractor.

En definitiva, existe gran cantidad de literatura científica que versa sobre todas las cuestiones mencionadas que afectan a la tracción con neumáticos agrícolas. Ya se he



mencionado el paso decisivo del neumático diagonal al radial (quedando el primero, puede decirse, en desuso), que sin duda habrán conducido a una mejora en el diseño, adecuación del neumático al tractor, y mejores prestaciones, y por tanto mayor eficiencia. Hay que tener presente que una mejor eficiencia en tracción es en definitiva una mayor eficiencia energética.

1.4. TENDENCIAS EN NEUMÁTICOS AGRÍCOLAS.

Son varias las alternativas y mejoras que implementado los fabricantes de neumáticos en el sector agrícola. A diferencia de lo que ocurre en otros sectores, en el que es habitual disponer de diferentes neumáticos para distintas condiciones de uso, al neumático agrícola se le demanda un uso más polivalente tanto en tareas de campo de gran tracción como arrastre de grandes pesos en carretera. Con el objeto de eliminar los problemas de fatiga en los flancos del neumático y el peligro de rodar rápido en transporte se han incorporado al mercado una nueva familia de neumáticos, los llamados de “baja presión” o “alta flexibilidad” divididos en dos grupos IF y VF.

El uso de neumáticos de baja presión para aumentar el área de carga de los neumáticos puede reducir la deformación vertical del suelo, reducir la resistencia a la rodadura y aumentar la fuerza de tracción cuando el tractor trabaja en suelo blando.

El neumático agrícola de tipo IF (*Improved Flexion*) se beneficia de una carcasa reforzada con flancos más resistentes y también más flexibles. Una de las principales ventajas de estos neumáticos es la posibilidad de reducir la presión a menos de 1 bar para proteger el suelo, gracias a sus flancos flexibles y reforzados, lo que no es posible con un neumático agrícola convencional cuya presión recomendada se acerca más a un promedio de 1,6 bar.

Un neumático agrícola de tipo VF (*Very Improved Flexion*) está diseñado con materiales más avanzados que los neumáticos convencionales, aumentando la resistencia, la flexibilidad, la capacidad de carga y la tracción. Se beneficia de una banda de rodadura reforzada con flancos muy flexibles, resistentes a los golpes y a las flexiones.



Figura 2. Capacidad de deformación de un neumático VF (Continental CombineMaster para cosechadoras)

Si se comparan neumáticos radiales estándar con neumáticos IF y VF lo más llamativo es que a igual presión de inflado (1,5-1,6 bar) un IF puede cargar en torno a un 20% más que el neumático radial estándar. En cuanto al VF, y siguiendo a la misma presión, carga alrededor del 40% más. Por tanto, un neumático IF con la misma carga, puede bajar su presión de inflado ese 20 % (1,2-1,3 bar) o en el caso de un VF el 40% que significa que en muchos casos puede estar incluso por debajo de 1 bar manteniendo cargas elevadas.

Diferentes fabricantes incorporan novedades en la fabricación de sus neumáticos, PneuTrac es un híbrido entre un neumático VF y una cubierta tipo oruga. El flanco del neumático en vez de ser recto, se pliega hacia el interior, el fabricante lo denomina perfil en omega (Ω) o diseño Cup Wheel.



Figura 3. Capacidad de deformación del neumático Pneutrac de Trelleborg,(Trelleborg).

Sin duda una de las opciones de interés que van apareciendo en el mercado es la posibilidad de variar la presión de inflado desde el puesto de conducción. Este sistema, ya conocido en el sector del transporte, se implementa cada vez de forma más eficiente y económica en vehículos agrícolas.

Se controla directamente desde la cabina del tractor mediante un módulo de control electrónico (OCP) que permite visualizar y ajustar las presiones. El sistema de *teleinflado* consta de juntas rotativas, que aseguran el paso del aire entre el eje fijo y la rueda en rotación, y un compresor. En general, el consumo de combustible se reducirá en el campo gracias a que



la presión baja reduce el patinamiento y en carretera gracias a que una presión elevada reduce la resistencia a la rodadura. Utilizar neumáticos con la presión adecuada mejorará la tracción y reducirá el desgaste, aumentando la vida útil de los neumáticos. La baja presión en el campo aumenta la amortiguación de las vibraciones, disminuye la fatiga del agricultor, mientras que la presión elevada por carretera estabiliza la trayectoria y mejora el comportamiento durante el frenado, permitiendo así conducir con mayor seguridad (Ferrari, H. y Ferrari, M.C.).



Figura 4. Sistema de teleinflado de Michelin, que aprovecha el circuito neumático que incorporan algunos tractores (FIMA 2022).

1.5. DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE RODADURA.

El problema de la versatilidad necesaria del tractor y del neumático, el coste de adquisición y desgaste de los mismos, el inconveniente del tamaño, además de la sensibilización



por la compactación y conservación del suelo, aumenta el interés por validar estos modelos y conocer los valores reales de coeficiente a la rodadura (k).

Como ya se ha comentado anteriormente, la variación de la presión de inflado, ya sea de forma manual o automática, tiene un interés creciente en el sector y resulta interesante poder medir de manera sencilla en un equipo de neumáticos en un tractor dado, los valores de resistencias a la rodadura cuando modificamos la presión de inflado en las tan variadas condiciones de trabajo en las que nos podemos encontrar.



2. OBJETIVOS.

El objetivo del presente estudio es diseñar un sistema de adquisición de datos fácilmente instalable en un tractor cualquiera para poder determinar la resistencia a la rodadura del conjunto del tractor en distintas condiciones de presión y suelo. Dada la evolución de los neumáticos y las tendencias en nuevos sistemas de los mismos como es el caso de los VF, se considera de gran interés poder actualizar valores del coeficiente de rodadura para esos casos.

Para ello es necesario diseñar un dispositivo de medida y realizar un experimento con dicho sistema que valide la capacidad de medida y viabilidad de utilización en condiciones de trabajo reales.

Como objetivo secundario de este trabajo, se plantea ver la viabilidad del sistema para obtener además fuerzas de tracción que permitan hacer un balance de tracción completo del conjunto tractor-apero. En este caso, la motivación es fundamentalmente académica, es decir, que el sistema permita adquirir la información necesaria para actividades de prácticas docentes sobre la temática de la tracción.



3. MATERIALES Y MÉTODOS.

La figura 5 representa la idea básica del sistema de medida de la resistencia a la rodadura. Es preciso utilizar un segundo tractor de arrastre para mover el tractor unidad de ensayo, sin tracción.

La medida de la fuerza de un tractor sobre otro es la fuerza de rodadura en cada instante. Se ha utilizado un sensor dinamométrico industrial junto con dos sensores de velocidad (uno de tipo radar y otro por posición satelital), y se ha implementado un sistema de hardware y software para la adquisición y gestión de los datos.

3.1. EMPLAZAMIENTO DE LOS ENSAYOS

Los ensayos y la preparación de los equipos se han realizado en las parcelas y en laboratorios de la Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal de León. Para ello, ha sido necesario preparar y acondicionar el terreno para conseguir los distintos tipos de suelo a utilizar.

El experimento consistirá medir la resistencia a la rodadura combinando cuatro distintos tipos de suelo, tres presiones de inflado y tres velocidades de avance. Los detalles se especifican más adelante.

3.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Una de las principales características del diseño es registrar la telemetría del sistema para posteriormente interpretar los resultados. Para ello es necesario saber la posición real del vehículo, la velocidad y la fuerza ejercida en la célula de carga y generar unos ficheros donde guardar la información obtenida.

El sistema debe permitir la geolocalización del ensayo y dejarla registrada con el fin de poder analizar las trayectorias y seleccionar las zonas exacta de toma de datos, ya que se prevé que existirán variaciones de velocidad u otras perturbaciones que puedan descartarse para una selección de datos representativos.

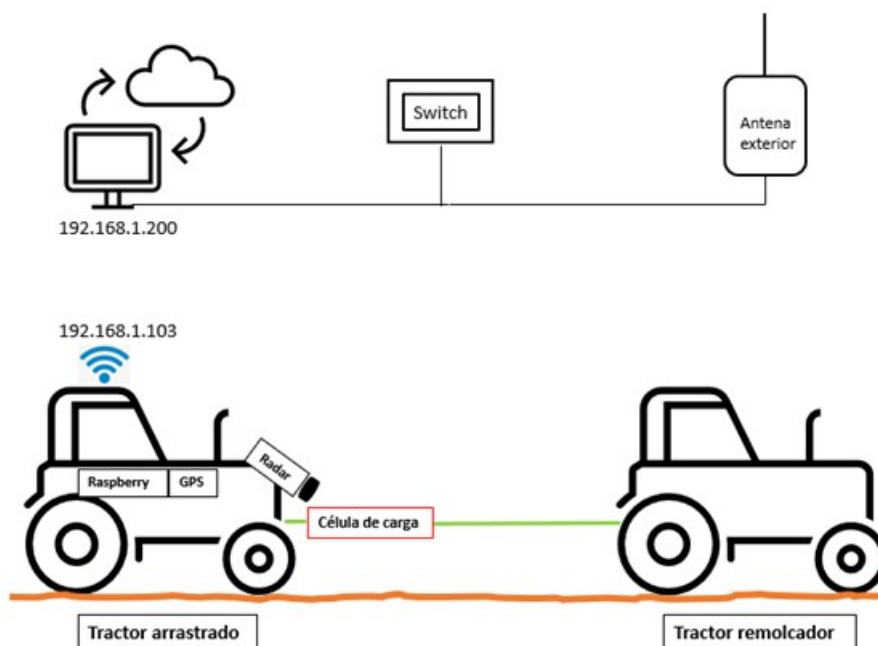


Figura 5. Esquema del sistema de adquisición de datos.

3.3. DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.

A la hora de diseñar el sistema electrónico se ha optado por instalar un ordenador de placa reducida (SoC system on chip) tipo Raspberry Pi 3 que está conectada a la red de datos del laboratorio vía inalámbrica. Para tener conexión WIFI con el equipo durante todo el circuito de pruebas ha sido necesario instalar una antena en el edificio de la escuela. Disponemos de 4 puertos USB para alimentar y comunicarnos con los 2 microcontroladores tipo Arduino nano que gestionan las señales externas tanto de la célula de carga como la del radar y el módulo GNSS. El sistema registra y graba las señales que a su vez se pueden visualizar en cualquier ordenador a través del servidor web con el dashboard creado.

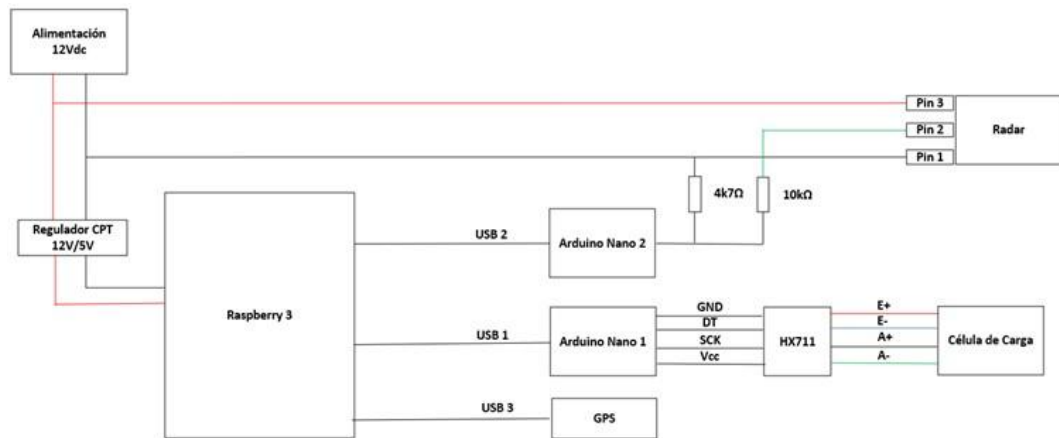


Figura 6. Esquema de conexiones y componentes electrónicos

Para la construcción del sistema de adquisición de datos se ha utilizado una caja estanca para alojar los componentes electrónicos y las conexiones de los sensores. Se realiza la conexión eléctrica de alimentación de 12 Vcc en la conexión auxiliar del tractor y posteriormente se instala un regulador de tensión a 5 Vcc y un bornero para alimentar los equipos electrónicos.



Figura 7. Instalación de equipo y sensores en el tractor.

3.3.1. Raspberry pi 3.

La Raspberry Pi es una serie de ordenadores de placa reducida, de bajo costo, y con software de código abierto, denominado Raspberry Pi OS, aunque permite usar otros sistemas operativos, incluido una versión de Windows 10. En todas sus versiones, incluye un procesador



Broadcom, memoria RAM, GPU, puertos USB, HDMI, Ethernet (el primer modelo no lo tenía), 40 pines GPIO (desde la Raspberry Pi 2) y un conector para cámara. Ninguna de sus ediciones incluye memoria, siendo esta en su primera versión una tarjeta SD y en ediciones posteriores una tarjeta MicroSD.



Figura 8. Raspberry pi 3.

3.3.2. Programación Raspberry pi 3.

En la figura 9 podemos ver el esquema generado en Node-RED, las señales externas que recibe Raspberry pi 3 son tres:

1. Valor bruto de lectura de la célula de carga.
2. Valor en km/h de la señal generada por el radar.
3. Protocolo NMEA generado por el módulo GNSS.

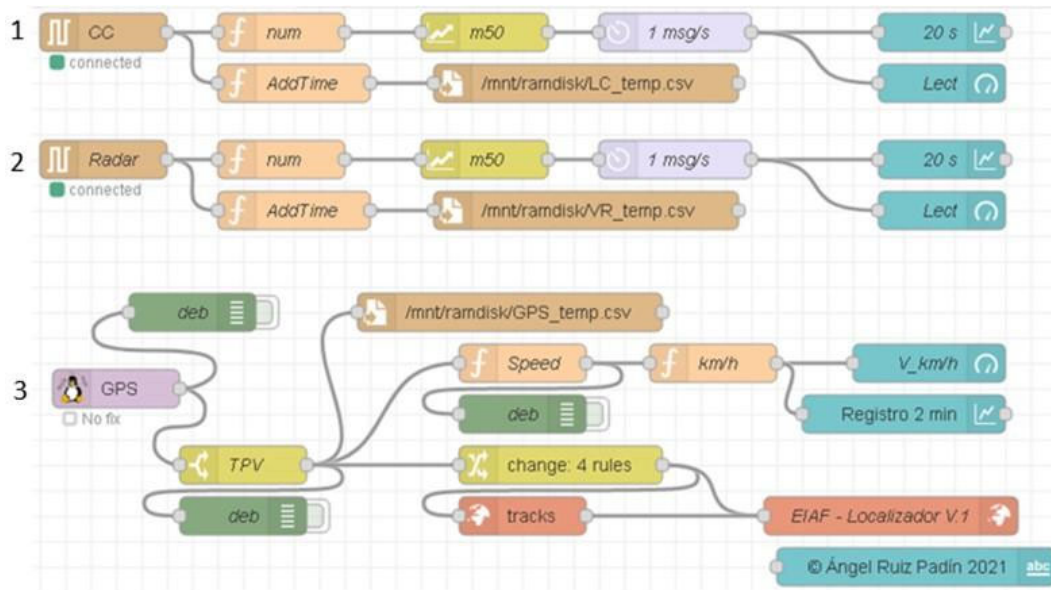


Figura 9. Esquema de programación Raspberry pi 3.

Tanto la señal de la célula de carga (1) como la del radar (2) se le añade la información de la fecha y la hora de su captura para generar un registro con el que luego analizaremos los datos. También realizan una media móvil de las últimas 50 lecturas y filtra el número de lecturas para poder crear el visor de tracción en el dashboard.

3.3.3. Arduino nano.

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla. Arduino Nano es una placa de desarrollo de tamaño compacto, completa y compatible con protoboards, basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usando con PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de 16 Mhz, conexión Mini-USB, terminales para conexión ICSP y un botón de reseteo.



Especificaciones:	
Microcontrolador	Atmel ATmega168 o ATmega328
Tensión de Operación (nivel lógico)	5 V
Tensión de Entrada (recomendado)	7-12 V
Tensión de Entrada (límites)	6-20 V
Pines E/S Digitales	14 (de los cuales 6 proveen de salida PWM)
Entradas Analógicas	8

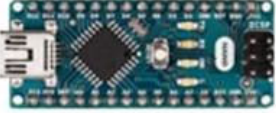


Figura 10. Características del microcontrolador Arduino Nano.

3.3.4. Programación Arduino nano (Célula de carga).

En el programa del microcontrolador de la célula de carga se instala la librería específica para trabaja con el convertidor A/D HX711, se definen los pines de la señal de la célula de carga y se inicia la comunicación serie. Se genera un bucle en el que si hay lectura lee y registra el dato. Finalmente se envía la una lectura cada décima de segundo al fichero generado.

3.3.5. Programación Arduino nano (Radar).

Como ya se ha mencionado anteriormente, la señal del radar es una onda cuadrada y su frecuencia es proporcional a la velocidad (27.45 Hz/km/h). Se le asigna entrada correspondiente y después de medir el tiempo por ciclo y pasarlo a km/h se establece comunicación con Raspberry pi 3 que recibe la señal de salida de Arduino a través del puerto serie.

La señal del GNSS (3) es un protocolo NMEA del cual se selecciona (TPV): la velocidad, que es el dato que se quiere comparar con el radar y como en los casos anteriores se genera un fichero y se visualiza la señal. Esta señal también es usada para generar los mapas (tracks) mediante los cuales se registra el recorrido de las pruebas.



Figura 11. Captura de imagen del dashboard creado

3.3.6. Célula de carga.

La célula de carga de la que se dispuso es un modelo comercial Magtrol LB214. Se trata de un bulón dinamométrico de uso en investigación en el sector de ingeniería mecánica cuya capacidad de medida y otros detalles se indican en la figura 12. Para su montaje en el ensayo ha sido necesario diseñar un soporte articulado para intercalar el bulón en los elementos de enganche. El dispositivo célula de carga con su soporte se montan en la boca del enganche frontal del tractor a ensayar.



LB SERIES

TECHNICAL DATA - LB 21X SERIES

STANDARD VERSION ^{a)}	LB210	LB211	LB212	LB213	LB214	LB216	LB217	LB218	LB220	LB221	
LOAD MEASUREMENT											
Nominal Load (NL) (Metric) ^{b)}	2.5 kN	5 kN	10 kN	20 kN	50 kN	100 kN	200 kN	500 kN	1000 kN	1250 kN	
Nominal Load (NL) (US) ^{b)}	0.28 tf	0.56 tf	1.12 tf	2.25 tf	5.62 tf	11.24 tf	22.48 tf	56.2 tf	112.4 tf	140.5 tf	
Overload Admissible (% of NL)	150% (of nominal load without influence on measurement)										
Overload at Rupture (% of NL)	≥ 500%							400%		300%	
Non-linearity Error ^{b)}					< 0.25%			< 0.5%			
Non-linearity + Hysteresis Error ^{b)}					< 0.5%			< 0.8%			
Repeatability ^{b)}	± 0.1%										



Pin Configuration



Figura 12. Especificaciones de la célula de carga Magtrol LB214

Para realizar la calibración de la célula de carga ha sido necesario contactar con el fabricante para obtener información de nuestra unidad. Facilitando el nº de serie nos han proporcionado el certificado de calibración.

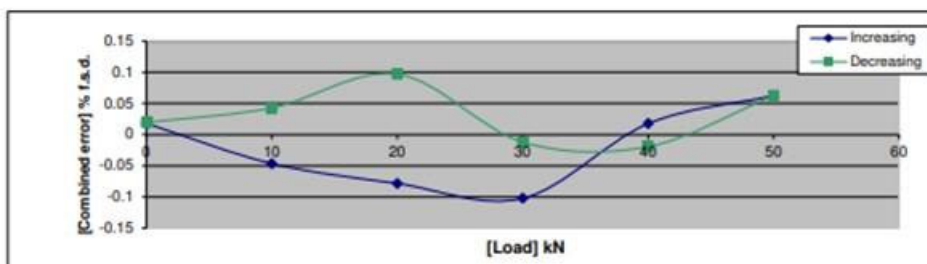
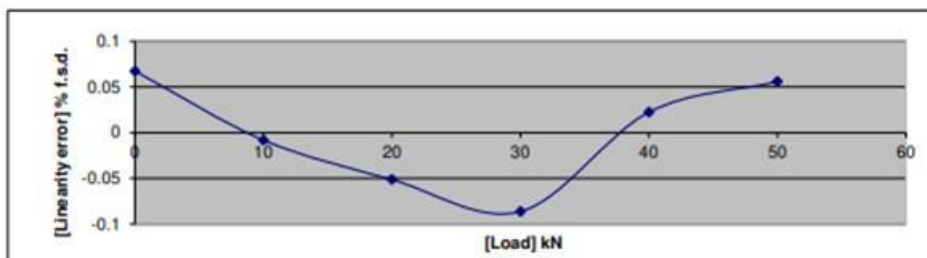


Acceptance Test Report

Type	Part Number P/N	Serial Number S/N	Id. mat. N°
LB 214-011/001	122-214/011/001	X 0151	9243-07

Nominal Load **50** kN Supply **10.00** V_{DC}

Load (kN)	Increasing Signal (mV)	Decreasing Signal (mV)
0	-0.007	-0.007
10	1.987	1.996
20	3.984	4.002
30	5.983	5.992
40	7.995	7.991
50	10.000	10.000



Rated Output **1.0007** mV/V

Linearity error **-0.086 < % f.s.d < 0.067**

Combined error **-0.102 < % f.s.d < 0.097**

Remarks:						
Tested by	C.B.	Inventory n°	Instrument	Manufacturer	Calibrated	Next calibration
		MM-078	Press 250kN	AMSLER	12.12.06	11.12.08
		MM-098	DMM 34401 A	HP	28.12.07	27.12.08
Date	29.07.2008					

Magtrol SA certifies that this instrument has been calibrated to published specifications using measurement standards traceable to the federal office of metrology (METAS)

Figura 13. Hoja de calibración de la célula de carga Magtrol LB-214

Se ha utilizado un gancho de pesaje certificado con pantalla digital utilizando un puente grúa en una empresa colaboradora. Se ha intercalado el soporte con la célula de carga entre el puente grúa y el gancho de pesaje y se ha realizado la calibración.



Figura 14. Balanza electrónica para la calibración realizada en Talleres Benavides (15/09/2021)

Para acoplar la célula de carga en el sistema de remolcado, se ha diseñado y fabricado previamente un soporte de acero para unir mediante un cable o una barra los dos vehículos y hacer trabajar a la célula.

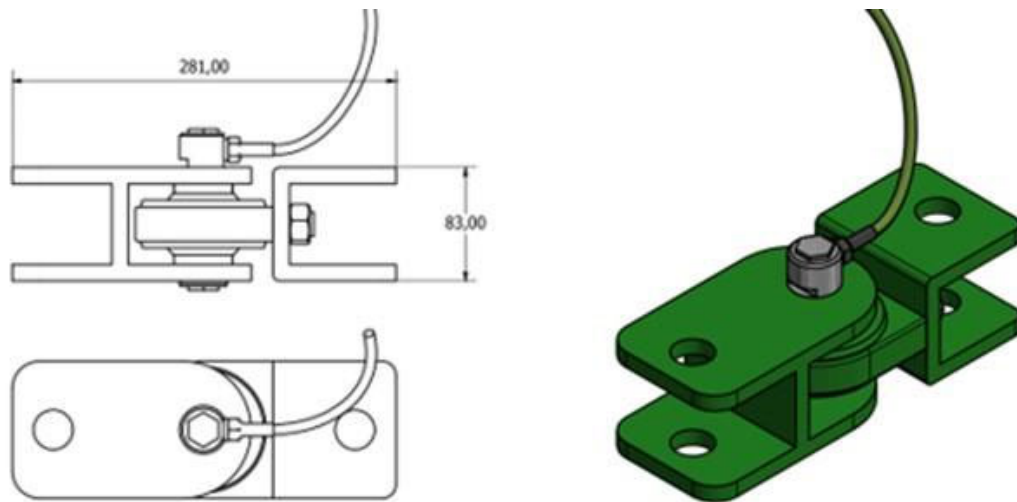


Figura 15. Diseño del acoplamiento para la célula de carga

3.3.7. Convertidor A/D HX711.

La señal de la célula de carga se conecta a un convertidor analógico/digital tipo HX711 diseñado para conectarse directamente a la salida de un puente Wheatstone, los pines E+ y E- sirven para alimentar la célula de carga a través del propio HX711 y A+ y A- es la salida de la célula de carga (1mV/V).

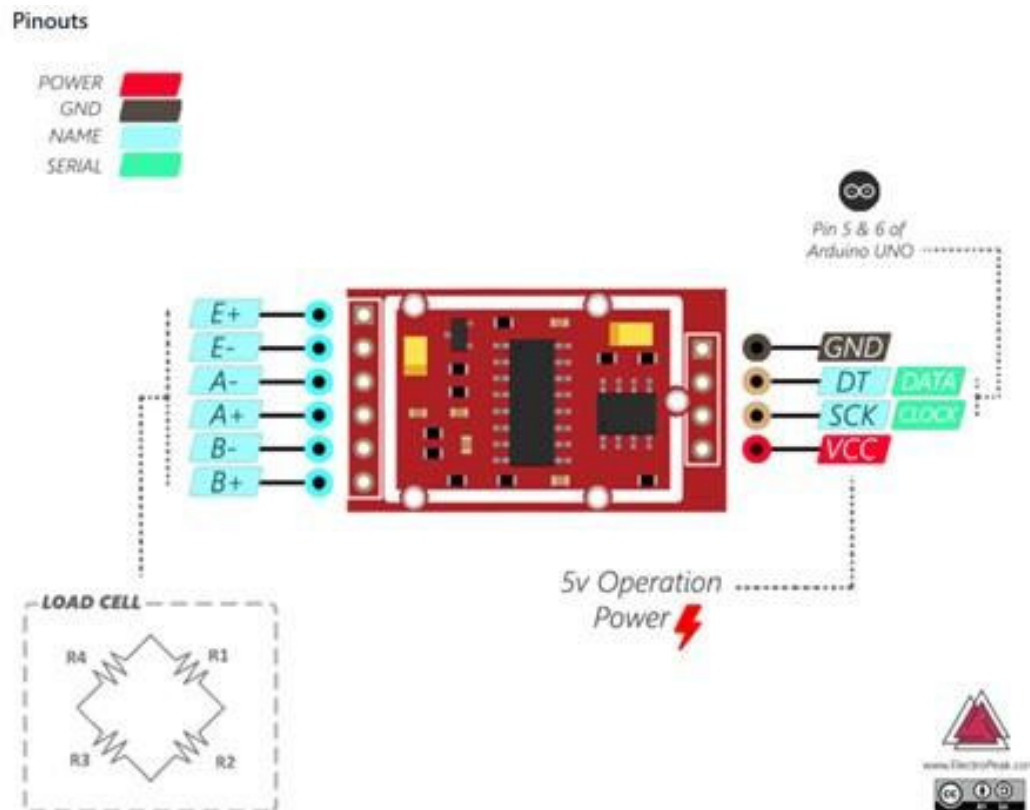


Figura 16. Conexiones convertidor analógico-digital HX711

3.3.8. Radar.

El radar instalado es un Dickey John, modelo II. Es un sensor de velocidad de avance que calcula la velocidad utilizando una señal de onda cuadrada y el principio de desplazamiento Doppler que mide los cambios en la frecuencia del reflejo de la señal. El radar nos proporciona una señal de salida con una frecuencia determinada en función de la velocidad (27.45 Hz/Km/h) y con un divisor de tensión se conecta a una entrada digital del microcontrolador, si bien no ha sido posible su calibración

Para el montaje en el ángulo y posición adecuados ha sido necesario construir un soporte de chapa de acero al enganche frontal del tractor.



Figura 17. Detalle de instalación del radar doppler

3.3.9. RECEPTOR GNSS.

Para geolocalizar el vehículo la opción más fiable ha sido adquirir un receptor GNSS con puerto USB, este va conectado a la Raspberry para indicar la posición del vehículo y referenciar puntos en las pasadas por diferentes suelos.



Figura 18. Módulo GNSS y montaje en tractor

Para la realización de este trabajo ha sido necesario diseñar un programa para cada uno de los Arduino y otro programa para que lo ejecute Raspberry pi 3. En los microcontroladores tipo Arduino, mediante un código de líneas y librerías se automatizan las lecturas de los sensores y se crea un proyecto en el cual se recoge la información y se ejecuta cíclicamente. Raspberry pi 3 es un mini-ordenador de gran versatilidad, su programación se realiza mediante lenguaje Python, tiene la ventaja de permitir correr en tiempo real las líneas de código programadas, ejecutar trozos de código y ver resultados en el mismo entorno de desarrollo. Este dispositivo permite la creación de una interface para visualizar la trayectoria de la unidad ensayada en Google Maps. También se ha creado un dashboard para visualizar en tiempo real las señales y velocidades de GPS y radar desde cualquier dispositivo.

3.4. FICHEROS Y ARCHIVOS GENERADOS.

Las lecturas de las señales de la célula de carga, el radar y el GNSS se registran en archivos CSV, este tipo de almacenamiento de la información nos facilita el uso de los paquetes de datos en los distintos programas para la creación de las hojas de cálculo y gráficos para su posterior estudio.



Lectura célula de carga LC_temp.csv	Lectura radar VR_temp.csv
...	...
2022-02-09T11:15:39.031Z,223045	2022-02-09T11:02:11.965Z,4.64
2022-02-09T11:15:39.130Z,293048	2022-02-09T11:02:11.983Z,4.62
2022-02-09T11:15:39.238Z,280737	2022-02-09T11:02:12.000Z,4.60
2022-02-09T11:15:39.332Z,225902	2022-02-09T11:02:12.019Z,4.61
2022-02-09T11:15:39.432Z,231576	2022-02-09T11:02:12.037Z,4.60
2022-02-09T11:15:39.535Z,251141	2022-02-09T11:02:12.054Z,4.60
2022-02-09T11:15:39.634Z,259568	2022-02-09T11:02:12.074Z,4.59
2022-02-09T11:15:39.735Z,298238	2022-02-09T11:02:12.090Z,4.60
2022-02-09T11:15:39.835Z,287653	2022-02-09T11:02:12.108Z,4.61
2022-02-09T11:15:39.935Z,187710	...
2022-02-09T11:15:40.036Z,144613	
2022-02-09T11:15:40.137Z,305812	
2022-02-09T11:15:40.243Z,324244	
2022-02-09T11:15:40.339Z,254999	
2022-02-09T11:15:40.442Z,200729	
2022-02-09T11:15:40.540Z,183424	
...	

Figura 19. Formato de los ficheros csv generados por el sistema. Izquierda, célula de carga,, derecha, velocidad

```

Lectura GPS
GPS_temp.csv

...
{"class":"TPV","device":"/dev/ttyACM0","status":2,"mode":3,"time":"2022-02-09T10:59:47.000Z","ept":0.005,"lat":42.582800346,"lon":-5.589375204,"alt":822.791,"epx":1.946,"epy":2.723,"epv":8.97,"track":242.2605,"speed":1.846,"climb":-0.04,"eps":0.18,"epc":17.94}
{"class":"TPV","device":"/dev/ttyACM0","status":2,"mode":3,"time":"2022-02-09T10:59:48.000Z","ept":0.005,"lat":42.582792662,"lon":-5.58939489,"alt":822.862,"epx":1.946,"epy":2.733,"epv":8.97,"track":240.7333,"speed":1.826,"climb":-0.063,"eps":0.15,"epc":17.94}
{"class":"TPV","device":"/dev/ttyACM0","status":2,"mode":3,"time":"2022-02-09T10:59:49.000Z","ept":0.005,"lat":42.582784818,"lon":-5.589414745,"alt":822.865,"epx":1.947,"epy":2.726,"epv":8.97,"track":241.9346,"speed":1.839,"climb":-0.034,"eps":0.17,"epc":17.94}

```

Figura 20. Formato del paquete de datos protocolo NMEA enviado por el módulo GNSS

3.5. TRACTOR UNIDAD DE ENSAYO.

Se ha dispuesto de un tractor, marca CASE, modelo Farmall 85C, de 8 años de antigüedad y 1180 h de uso, al cual se le han instalado los equipos de medida y acoplamientos necesarios



para realizar el experimento. Por otro lado, se ha utilizado otro tractor para remolcar el primero con un cable de acero de 5 m de longitud y con una barra rígida para las pruebas con apero. Para saber el peso real del tractor, con fecha 02/07/2021 se realiza pesaje en una báscula industrial, tanto del peso bruto como el peso por ejes y del cultivador utilizado. En la figura 22 están representadas las dimensiones del tractor.

Tabla 1. Características del tractor utilizado en el ensayo

Marca	CASE	Reparto peso
Modelo	Farmall C85	
Peso total (kg)	4232	
Peso adherente con apero (kN)	41,52	
Eje delantero (kg)	1916	45,27%
Eje trasero (kg)	2292	54,16%
Cultivador	646	
Peso adherente con apero (kN)	47,85	



Figura 21. Pesaje del tractor en báscula industrial

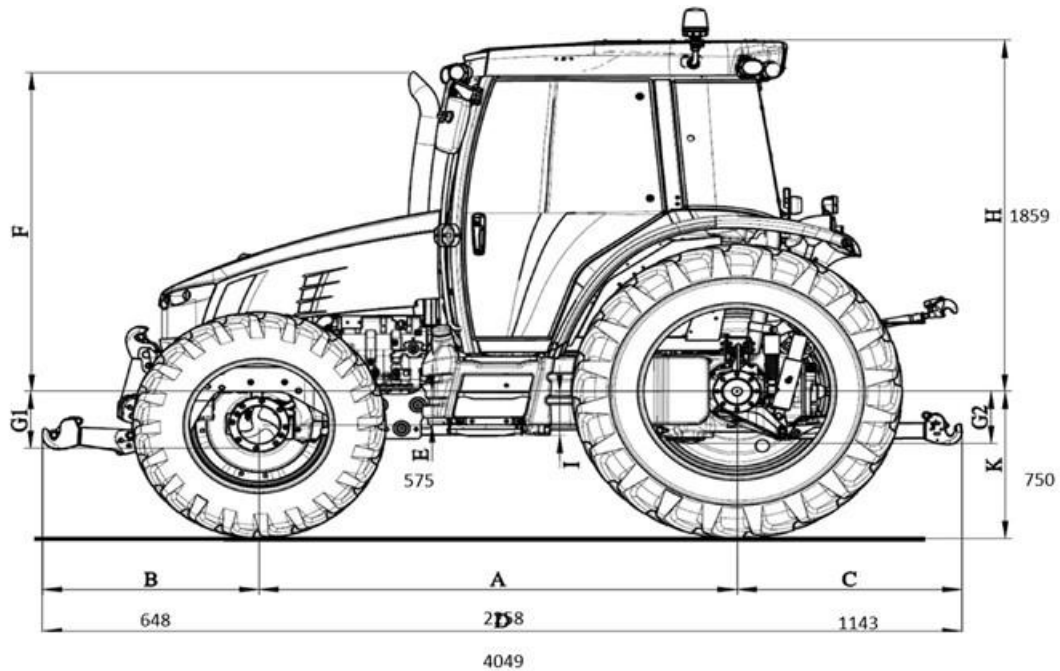


Figura 22. Dimensiones y cotas del tractor CASE Farmall 85C

Los neumáticos del tractor equipado con los sistemas de medida tienen un desgaste aproximado del 20% y sus principales características son los siguientes:

Tabla 2. Neumáticos equipados en el tractor CASE

	Fabricante	Modelo	Medidas	Diámetro (mm)
Neumáticos delanteros	Continental	HC70	380/70 R24	1191
Neumáticos traseros	Continental	HC70	480/70 R34	1593

Los valores de capacidad de carga a diferentes presiones y velocidades dados por el fabricante de neumáticos figuran en las siguientes tablas:



Tabla 3. Capacidad de carga del neumático 380/70 R24.

Velocidad (km/h)	0,4 bar	0,6 bar	0,8 bar	1 bar	1,2 bar	1,4 bar	1,6 bar	2 bar
65				1240	1385	1520	1650	
50			1160	1300	1455	1595	1735	
40		1050	1210	1355	1520	1660	1800	
30	930	1100	1270	1425	1595	1745	1900	
25	960	1135	1310	1465	1640	1800	1955	
20	995	1175	1360	1520	1705	1865	2030	
10	1105	1305	1510	1690	1890	2070	2250	2475

Tabla 1.

Tabla 4. Capacidad de carga del neumático 480/70 R34.

Velocidad (km/h)	0,4 bar	0,6 bar	0,8 bar	1 bar	1,2 bar	1,4 bar	1,6 bar	2 bar
65				2045	2290	2505	2725	
50			1915	2145	2405	2630	2860	
40		1730	2000	2240	2505	2745	3000	
30	1535	1820	2100	2350	2630	2885	3135	
25	1580	1875	2165	2420	2710	2970	3230	
20	1640	1945	2245	2515	2815	3085	3350	
10	1820	2155	2490	2785	3120	3420	3715	4090

Dadas las especificaciones del neumático, y las masa por eje del tractor, se decide fijar como presión mínima utilizable en el ensayo, 0,8 bar.

3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la adquisición de datos de los diferentes ensayos, se ha diseñado un circuito en la Escuela de Ingeniería Agrícola de León para evaluar la resistencia a la rodadura en cuatro tipos de suelo; asfalto, suelo arado, suelo sin laboreo y con laboreo superficial. Se combinan los cuatro tipos de suelo con tres presiones de inflado y tres velocidades distintas. Las presiones y velocidades de trabajo para la realización del ensayo son 0.8 bar, 1.6 bar y 2 bar y entre 5 y 15 km/h dependiendo de las condiciones del ensayo.

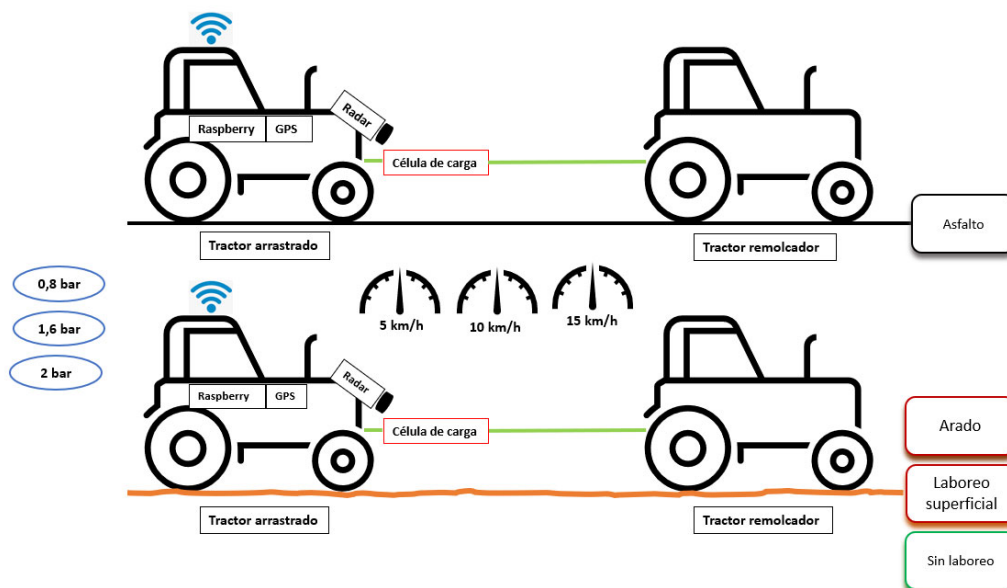


Figura 23. Esquema general de los ensayos previstos.

Para obtener medidas fiables, se ha elegido tramos en los que fuera posible mantener una velocidad estable teniendo en cuenta que con el patinamiento de la unidad que tracciona la velocidad real obtenida para medidas estables de la fuerza resultó al final variable, como se ve en el apartado de resultados.

En la tabla 5 se describe las condiciones de cada ensayo, al que se ha adjudicado una referencia descriptiva y en la figura 24 el emplazamiento de cada pasada.



Tabla 5. Condiciones iniciales de cada ensayo.

Ensayo	Suelo	Presión (bar)	Velocidad (km/h)
E22	Arado	0,8	5
E26	Arado	0,8	10
E4	Arado	1,6	5
E8	Arado	1,6	10
E13	Arado	2	5
E17	Arado	2	10
E19	Asfalto	0,8	15
E20	Asfalto	0,8	5
E24	Asfalto	0,8	10
E1	Asfalto	1,6	15
E2	Asfalto	1,6	5
E6	Asfalto	1,6	10
E10	Asfalto	2	15
E11	Asfalto	2	5
E15	Asfalto	2	10
E21	L. Superficial	0,8	5
E25	L. Superficial	0,8	10
E3	L. Superficial	1,6	5
E7	L. Superficial	1,6	10
E12	L. Superficial	2	5
E16	L. Superficial	2	10
E23	Sin Laboreo	0,8	5
E27	Sin Laboreo	0,8	10
E5	Sin Laboreo	1,6	5
E09	Sin Laboreo	1,6	10
E14	Sin Laboreo	2	5
E18	Sin Laboreo	2	10



Durante cada trayecto, se trató de mantener la velocidad predefinida evitando tirones y manteniendo las rodadas separadas de cada tractor para que las rodadas del tractor remolcador no afecten a la medición.



Figura 24. Circuito de ensayos en la Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal

El suelo fue transitado con una sola pasada por un tractor convencional que remolcaba el tractor con los equipos de medida en punto muerto y evitando la huella precedente. La idea fue buscar las condiciones mecánicas del suelo arado, con laboreo superficial, sin laboreo y asfalto y realizar los 4 ensayos en un solo circuito y con una presión determinada en los neumáticos para posteriormente variar la presión y repetir el circuito de prueba.



3.7. ENSAYO DE EFICIENCIA EN TRACCIÓN.

Para la realización de los ensayos de tracción se ha utilizado el mismo sistema de adquisición de datos. Se ha instalado un cultivador de brazos en la unidad arrastrada y se realizan ensayos a 0.8 bar y a 1.6 bar, en asfalto y en laboreo superficial. El peso total del conjunto unidad arrastrada y apero es de 4878 kg.

Este ensayo se corresponde con el segundo objetivo, el de obtener fuerzas de tiro, velocidades reales y teóricas con fines docentes. La velocidad considerada teórica en la marcha seleccionada en la transmisión (4ª grupo intermedio) se obtiene con la medida de velocidad sobre asfalto. Esto se sabe que no es exactamente la velocidad teórica, pero se tiene que admitir un error despreciable ya que el deslizamiento en esta superficie y a baja velocidad se puede considerar prácticamente cero.

Durante el ensayo se prevé alcanzar una profundidad de 20 cm. El régimen del motor en la fase de trabajo será de 2000 r/min). De este modo es posible calcular el patinamiento de la unidad a distintas presiones ya que en la fase de trabajo se obtendrá la velocidad real influyendo el correspondiente patinamiento.

En este caso ha sido necesario además disponer de un tractor proporcionado por un agricultor colaborador de mayor potencia (74 kW) para poder arrastrar al que porta los elementos de medida con suficiente margen de fuerza de arrastre.

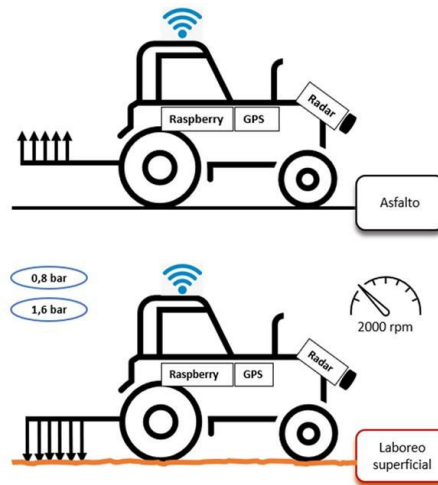


Figura 25. Esquema de ensayo para obtener deslizamiento. Arriba, velocidad teórica y abajo, velocidad real en cada presión de inflado

El otro bloque de pruebas para obtener datos para el ensayo en tracción se realiza en suelo con laboreo superficial tratando de mantener una velocidad en el remolcador de 5- 6 km/h. Se utilizaron dos presiones diferentes (0.8 bar y 1.6 bar). Se esquematiza en la figura 26.

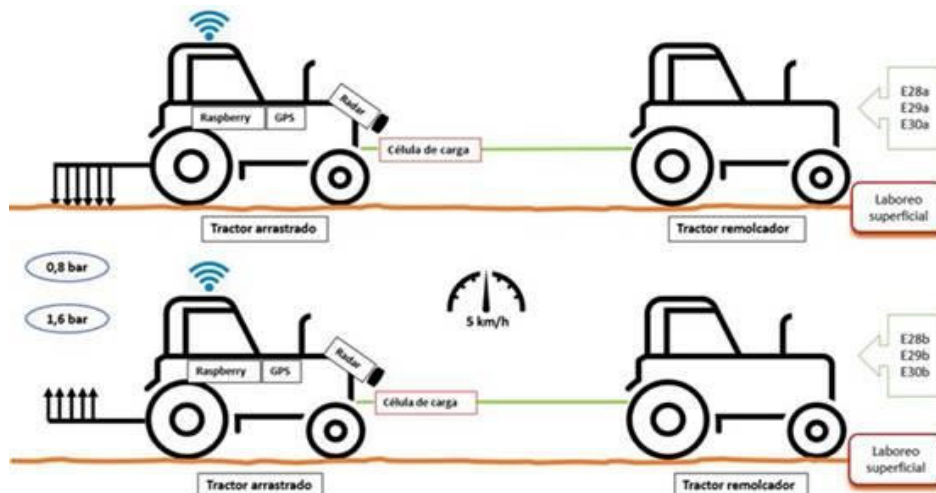


Figura 26. Esquema de ensayos en tracción en suelo con laboreo superficial



Una vez recopilados los datos de los dos bloques de ensayos es posible realizar los cálculos oportunos para el análisis de rendimiento, ya que dispondremos de fuerzas de tiro y de rodadura, y velocidades reales y teóricas.

3.8. MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE CONO.

El Índice de Cono (IC) es el parámetro aceptado para la determinación teórica de la resistencia a la rodadura.

La toma de datos para obtener el índice de cono se llevó a cabo con un penetrómetro Eijklkamp, que consiste en una barra con una punta cónica en la base y un eje graduado con un dial que indica la fuerza que se precisa para introducir la punta cónica en el suelo.



Figura 27. Penetrómetro Eijklkamp

Para el caso que el suelo a transitar fuera excesivamente deformable el método de Wismer y Luth sugiere no utilizar el valor de resistencia a la penetración antes del tráfico. En su lugar



que aconsejan hacerlo con el valor de índice de cono dentro de la huella después del pasaje del tractor, coincidiendo en este consejo con Mc Allister (1983) y GEE Glough et.

Se pretende comprobar la validez de este método de medida en la huella una vez se dispondrá de los valores experimentales de k .

Del producto entre (k), coeficiente de rodadura y el peso adherente en cada eje del tractor ($Qadh$), se obtiene el esfuerzo de resistencia a la rodadura (Fk).

3.9. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y CLIMA.

Los ensayos han sido realizados en el Campo de prácticas de la Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal de la Universidad de León, situado en Armunia a una altitud de 914 m y las características de suelo y clima se indican en la siguiente tabla:



Tabla 6. Características generales de suelo y clima.

Clima	Mediterráneo templado (Papadakis 1966).
Clasificación suelo	Fluvisol Gléico (FAO 1998)
Historial de Laboreo	Laboreo tradicional basado en vertedera para cultivos herbáceos anuales hasta 1998.
Topografía	Pendiente despreciable.
Textura 0-20 cm	Franco arcilloso (34% arena, 34% limo, 32% arcilla)

Para determinar el contenido de agua en el suelo se utilizó el método tradicional de secado en estufa, de las muestras obtenidas la humedad media es de 22.4%.

Se han obtenido datos de compactación del suelo a 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 cm de profundidad, con la utilización de utilizado un penetrógrafo calibrado de la marca Eijkelkamp, estos datos nos dan información de los distintos estados del perfil de compactación del suelo del ensayo y de su posible variabilidad en este aspecto. Se ha utilizado el cono normalizado de 1 cm².



Tabla 7. Resistencia a la penetración suelo sin laboreo. Valores en Mpa.

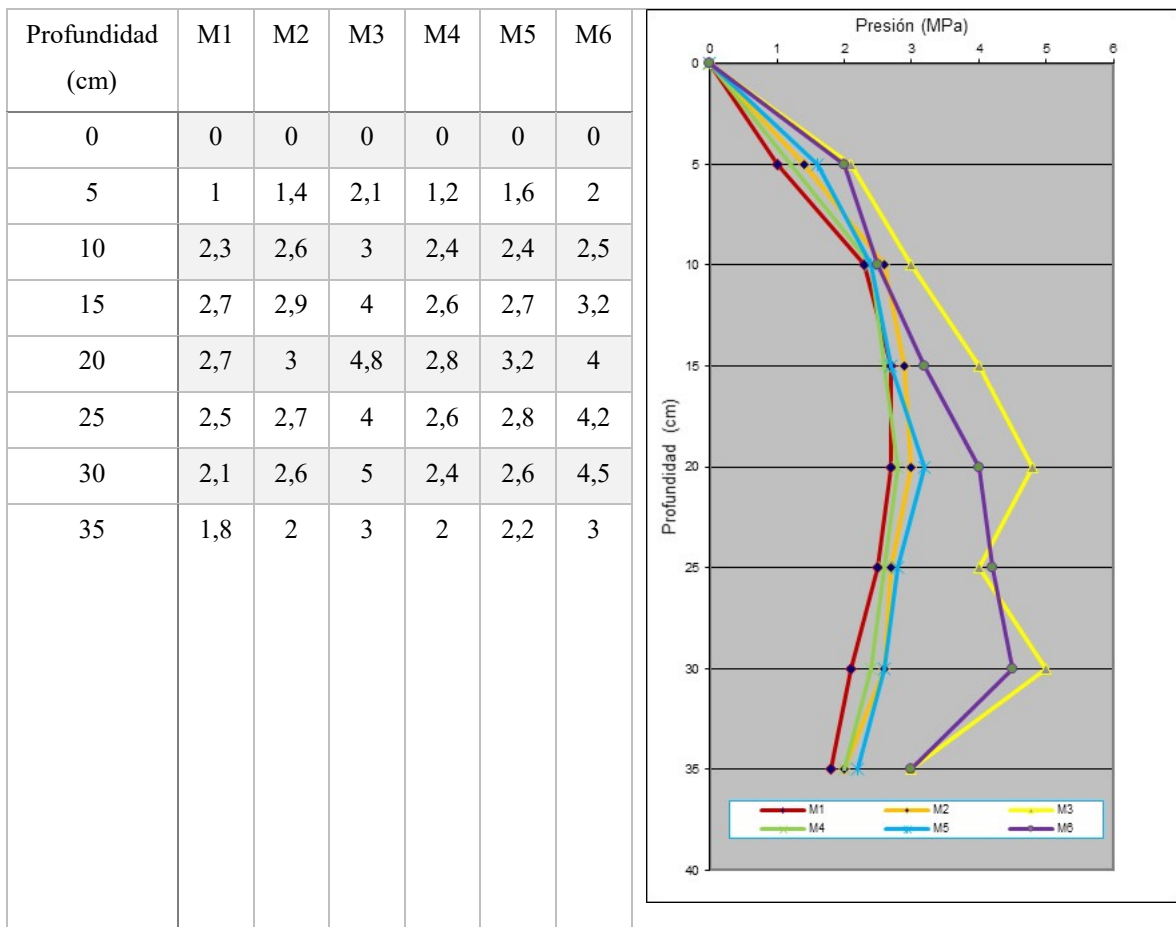




Tabla 8. Resistencia a la penetración suelo con laboreo superficial. Valores en Mpa.

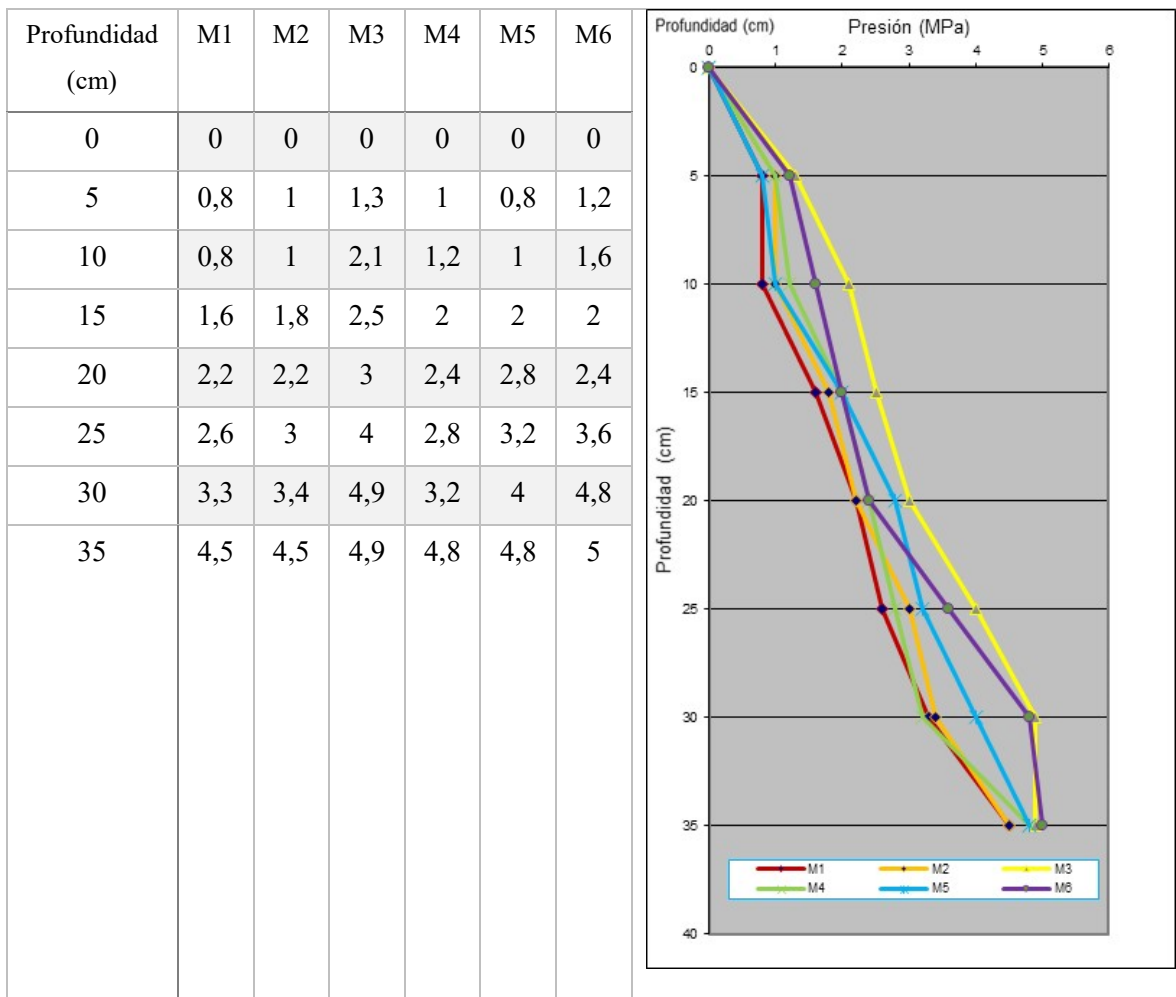
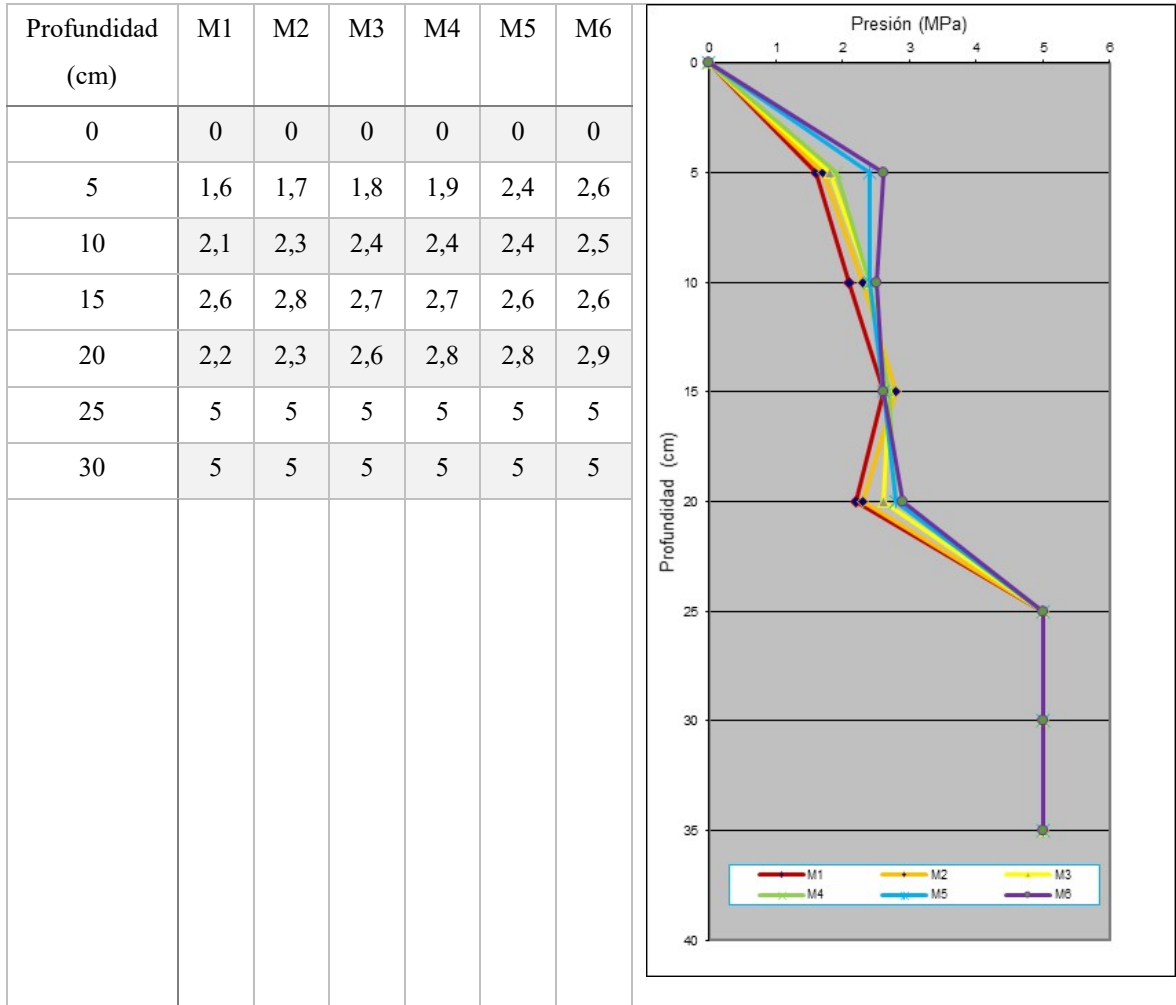




Tabla 9. Resistencia a la penetración suelo con suelo arado. Valores en Mpa.





4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Después de realizar varias pruebas para poner en marcha los equipos, se realizan los ensayos los días 8 y 9 de enero de 2022. Los ensayos se realizan a una presión inicial de 1.6 bar y primero se circula en un tramo de asfalto a una velocidad de 15 km/h, para, posteriormente pasar a suelo con laboreo superficial y después a suelo arado y por último al suelo sin laboreo realizando varias pasadas con las velocidades seleccionadas. Se repite el mismo circuito 2 veces más variando la presión de los neumáticos a 2 bar y a 0.8 bar. Al finalizar las pruebas es necesario descargar los datos obtenidos de la memoria RAM del equipo.

La trayectoria de los ensayos nos genera una primera visión general del circuito en el que se puede apreciar el recorrido en todo momento del tractor y las paradas para cambio de presiones.



Figura 28. Imagen del recorrido total del ensayo suministrada por el sistema.



En la siguiente gráfica se visualizan los datos recogidos por el sistema durante toda la prueba. Se divide en tres bloques:

Lectura en bruto de los valores de la célula de carga y su valor medio (kN).

Lectura de velocidad GNSS, velocidad del radar y velocidad media del radar (km/h).

Lectura valor medio de la célula de carga y velocidad media radar.

En este último bloque, es donde se realizará la selección de cada ensayo con los diferentes suelos, presiones y velocidades para analizar los resultados por separado.

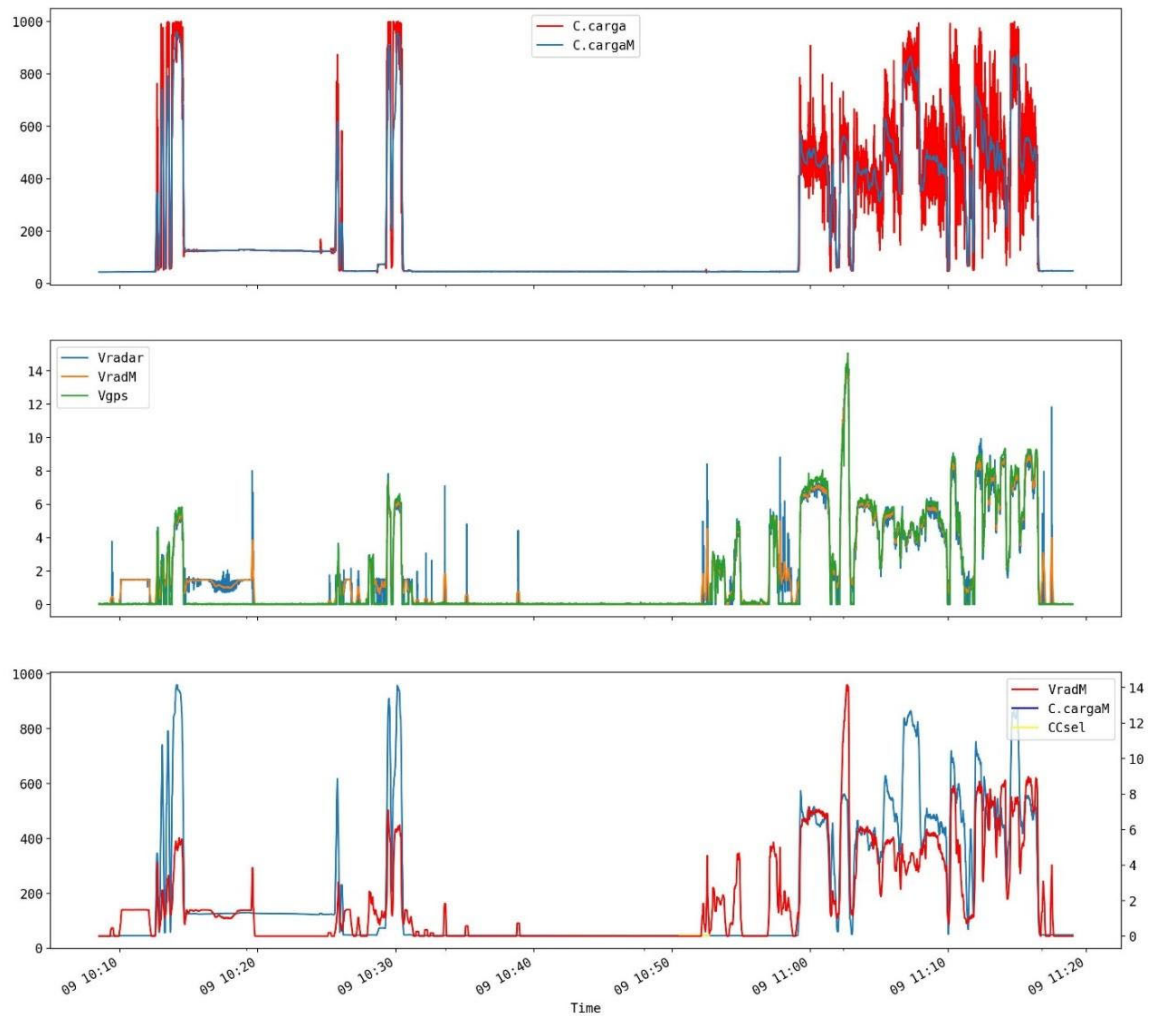


Figura 29. Gráfica del recorrido total de un ensayo.



4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA RODADURA.

4.1.1. Consideraciones previas

Se han seleccionado de todo el recorrido cada uno de los 27 ensayos, dando como resultado un paquete de datos por cada ensayo. En la siguiente imagen se puede ver un ejemplo de una de ellas. La línea azul representa inicio/fin de trazo seleccionado y la línea amarilla representa inicio/fin registro de datos para análisis.

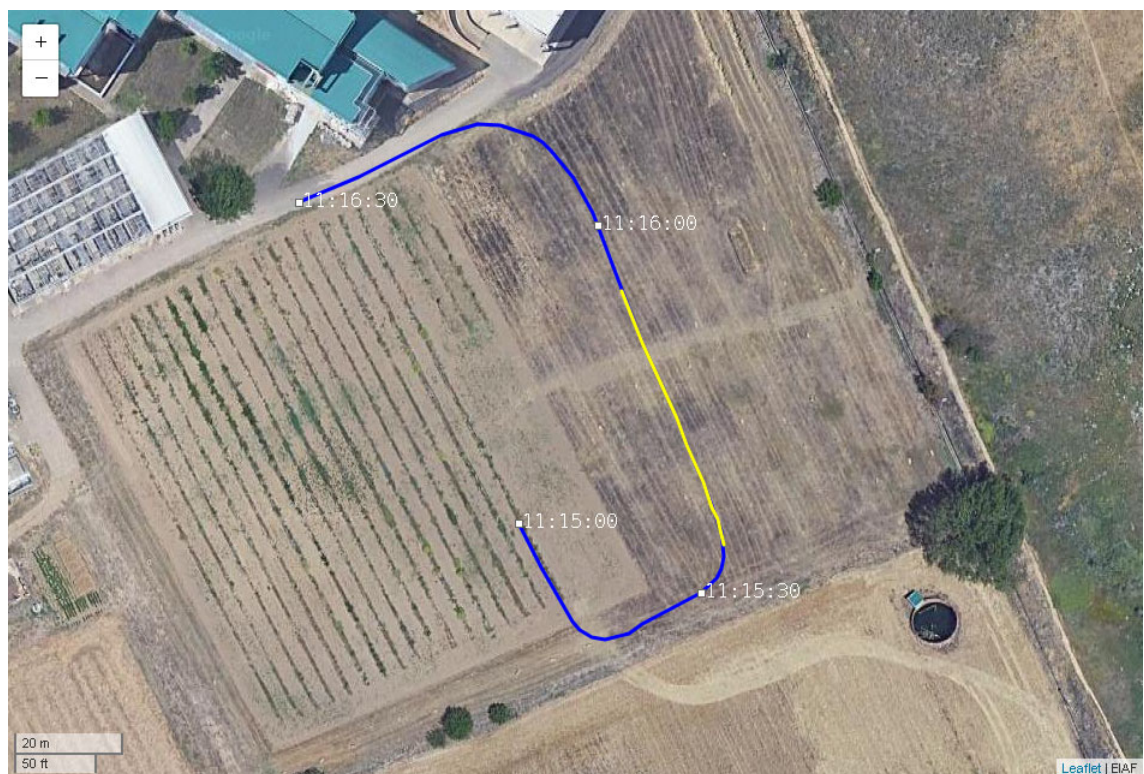


Figura 30. Imagen del recorrido seleccionado en uno de los ensayos. En color amarillo, selección de la zona de toma de datos

En la gráfica se pueden visualizar las señales de los diferentes sensores. Para eliminar vibraciones en las señales se generan valores medios de la célula de carga velocidad del radar y velocidad GNSS, acotamos el tramo del ensayo en el cual tenemos una lectura constante de las variables y así obtener datos fiables de cada ensayo.

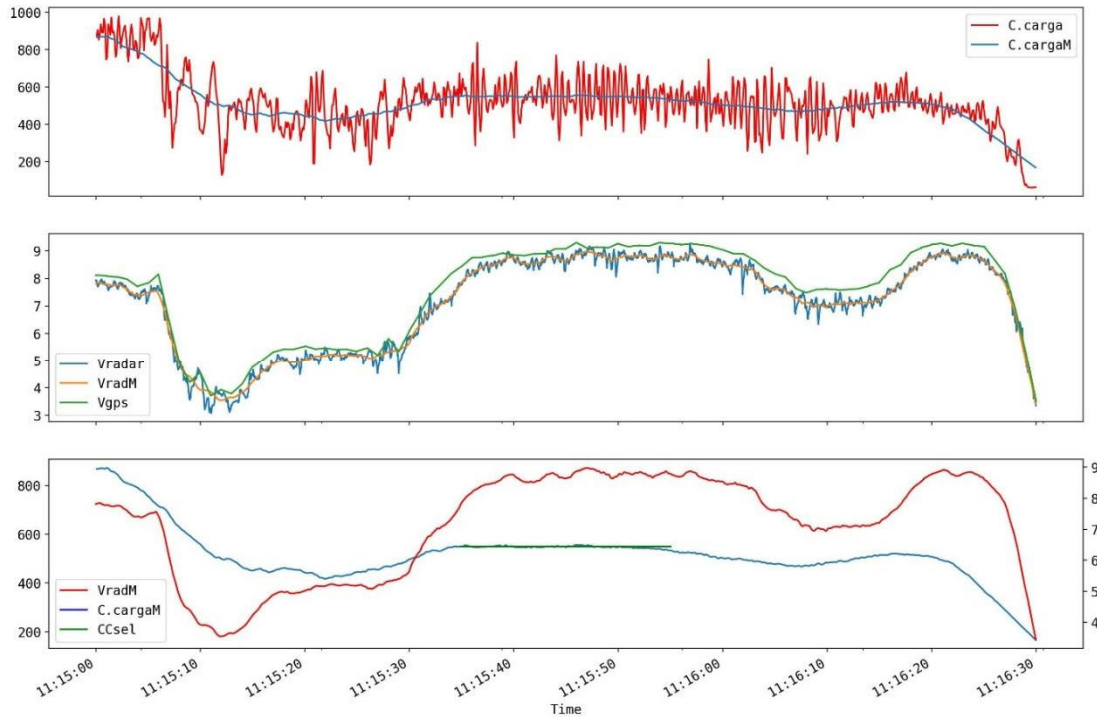


Figura 31. Gráfica de resultados de uno de los ensayos. En línea recta verde (CCsel) se indica el método de marcaje que se visualiza en la figura anterior en color amarillo en la trayectoria

Como puede verse en la figura 29, las lecturas de la célula de carga, debido a la sensibilidad ante un esfuerzo a baja velocidad, presentan picos o altibajos constantes normales en este tipo de sensores. Para obtener un dato suavizado, y una vez seleccionados un mínimo de 50 datos en cada pasada, se ha programado el sistema de adquisición de datos para que proporcione un valor con media móvil.

Otra observación del experimento tuvo que ver con los valores de velocidad radar y GNSS, entre los que se constató una diferencia media de un 4,36% por defecto en la medida del radar, que condujo, tras la comprobación pertinente, a descartar las medidas realizadas con el sensor de radar aunque el porcentaje no supero en ningún caso el 6%.

4.1.2. Datos adquiridos

Las tablas 10 y 11 muestran los resultados globales de los ensayos. Debido a la dificultad del tractor remolcador para obtener velocidades altas estables, hubo que hacer algunas



repeticiones de algunos de los recorridos, por lo que aparecen en las tablas con los subíndices a y b.

Las velocidades obtenidas han sido diferentes a las previstas debido a la falta de potencia en la unidad remolcadora, principalmente en los ensayos de arado y laboreo superficial a más de 9 km/h. No obstante, se ha observado que trabajando en este rango de velocidades y en las condiciones de suelo ensayadas, la velocidad no es un factor que afecte al coeficiente de rodadura, como se demuestra más adelante.

En las dos últimas columnas de la derecha de las tablas 10 y 11 se indican los dos valores de coeficiente de variación (calculados a partir de la desviación estándar y la media proporcionada por el software, como $CV = \text{Desv } F/F \text{ media}$). La diferencia entre ambas indica la intensidad el efecto de suavizado y la pequeña diferencia entre fuerzas medias con y sin suavizado indica la simetría de los picos de medición. No se ha indicado esa diferencia par ano agrandar la tabla innecesariamente. No obstante, para el posterior cálculo de la fuerza de resistencia a la rodadura, se adopta le valor suavizado para el cálculo.



Tabla 10. Resumen de datos adquiridos por el sistema con comparación de coeficientes de variación en los intervalos de medida para 1,6 y 2 bar.

Ensayo				Mediciones sensores							Cálculos del sistema			
N	Código ensayo	Suelo	Presión (bar)	Hora Inicio	Hora Fin	VRAD (km/h)	VGNSS (km/h)	N	F media (kg)	DESV F	Fs media (kg)	DESV Fs	CV	CVs
0	E01	Asfalto	1,6	08/02 11:18:15	08/02 11:18:24	16,38	16,81	89	275,16	57,40	277,40	8,06	21%	2,9%
1	E02	Asfalto	1,6	08/02 11:21:35	08/02 11:22:00	6,06	6,20	248	244,79	35,93	244,79	9,75	15%	4,0%
2	E03	L. Superficial	1,6	08/02 11:23:35	08/02 11:24:05	5,59	5,91	298	451,01	63,59	450,65	19,54	14%	4,3%
3	E04	Arado	1,6	08/02 11:25:15	08/02 11:26:00	4,65	4,82	447	763,51	68,44	763,76	15,88	9%	2,1%
4	E05	Sin Laboreo	1,6	08/02 11:26:40	08/02 11:27:15	5,78	6,05	347	322,10	79,34	320,46	15,51	25%	4,8%
5	E06	Asfalto	1,6	08/02 11:30:03	08/02 11:30:10	9,38	9,79	70	283,60	32,46	280,26	7,84	11%	2,8%
6	E07	L. Superficial	1,6	08/02 11:31:28	08/02 11:31:36	9,17	9,62	79	439,38	70,28	443,18	5,79	16%	1,3%
7	E08	Arado	1,6	08/02 11:33:05	08/02 11:33:20	4,57	4,78	149	757,70	42,59	755,92	6,22	6%	0,8%
8	E09	Sin Laboreo	1,6	08/02 11:35:55	08/02 11:36:12	9,33	9,84	167	359,89	95,08	356,80	4,27	26%	1,2%
9	E10	Asfalto	2	08/02 12:22:50	08/02 12:22:54	16,64	16,50	40	302,44	46,30	298,39	2,51	15%	0,8%
10	E11	Asfalto	2	08/02 12:24:05	08/02 12:24:35	5,89	6,13	298	241,07	33,31	240,51	8,25	14%	3,4%
11	E12	L. Superficial	2	08/02 12:25:55	08/02 12:26:30	5,73	6,03	348	427,72	73,66	426,70	10,23	17%	2,4%
12	E13	Arado	2	08/02 12:27:50	08/02 12:28:30	4,96	5,11	397	798,91	71,32	800,59	18,33	9%	2,3%
13	E14	Sin Laboreo	2	08/02 12:29:20	08/02 12:29:40	5,90	6,24	199	334,80	70,84	338,33	5,13	21%	1,5%
14	E17 a	Arado	2	08/02 12:35:13	08/02 12:35:33	6,15	6,44	199	598,45	66,81	600,26	17,79	11%	3,0%
15	E15	Asfalto	2	08/02 12:38:15	08/02 12:38:30	9,31	9,90	149	263,58	43,66	265,95	5,55	17%	2,1%
16	E18	Sin Laboreo	2	08/02 12:39:20	08/02 12:39:38	9,26	9,77	179	377,42	97,20	377,54	4,15	26%	1,1%
17	E16	L. Superficial	2	08/02 12:41:35	08/02 12:41:53	8,73	9,20	179	501,43	107,28	503,27	8,10	21%	1,6%
18	E17 b	Arado	2	08/02 12:43:13	08/02 12:43:25	7,86	8,240	119	739,21	125,58	738,40	27,25	17%	3,7%

Fmedia: fuerza medida, valor promedio del intervalo seleccionado en cada recorrido; VRAD = velocidad media del sensor de radar; VGNSS = velocidad media del sensor satelital; N = número de datos recogido por el sistema; Fs media = fuerza una vez suavizados los datos con la media móvil; DESV F = desviación estándar de la población de los N valores de fuerza; DESV Fs = desviación estándar de los valores suavizados y CV y CVs = coeficientes de variación obtenidos antes y después suavizado respectivamente.



Tabla 11. Resumen de datos adquiridos por el sistema con comparación de coeficientes de variación en los intervalos de medida para presiones de 0,8 bar.

Ensayo				Mediciones sensores							Cálculos del sistema			
N	Código ensayo	Suelo	Presión (bar)	Hora Inicio	Hora Fin	VRAD (km/h)	VGNSS (km/h)	N	F media (kg)	DESV F	Fs media (kg)	DESV Fs	CV	CVs
19	E19	Asfalto	0,8	09/02 11:02:32	09/02 11:02:42	13,71	14,060	99	540,17	28,87	541,90	6,98	5%	1,3%
20	E20	Asfalto	0,8	09/02 11:03:30	09/02 11:04:00	5,98	6,190	298	423,21	40,02	423,80	5,94	9%	1,4%
21	E21	L. Superficial	0,8	09/02 11:05:30	09/02 11:06:00	5,35	5,630	299	558,92	62,82	559,31	21,49	11%	3,8%
22	E22	Arado	0,8	09/02 11:06:50	09/02 11:07:45	4,14	4,300	546	823,78	56,97	823,57	25,65	7%	3,1%
23	E23	Sin Laboreo	0,8	09/02 11:08:30	09/02 11:09:10	5,71	6,050	398	477,45	80,50	478,08	4,95	17%	1,0%
24	E24	Asfalto	0,8	09/02 11:13:54	09/02 11:14:04	8,52	9,030	99	444,13	72,77	443,29	4,99	16%	1,1%
25	E25 a	L. Superficial	0,8	09/02 11:10:12	09/02 11:10:25	8,15	8,650	129	677,50	84,00	686,78	12,55	12%	1,8%
26	E25 b	L. Superficial	0,8	09/02 11:12:04	09/02 11:12:21	8,34	8,850	168	690,21	103,68	691,10	11,09	15%	1,6%
27	E26	Arado	0,8	09/02 11:14:38	09/02 11:15:02	7,40	7,800	237	852,26	65,70	850,38	8,95	8%	1,1%
28	E27	Sin Laboreo	0,8	09/02 11:15:35	09/02 11:15:55	8,68	9,010	199	548,37	96,44	548,10	4,40	18%	0,8%

Fmedia: fuerza medida, valor promedio del intervalo seleccionado en cada recorrido; VRAD = velocidad media del sensor de radar; VGNSS = velocidad media del sensor satelital; N = número de datos recogido por el sistema; Fs media = fuerza una vez suavizados los datos con la media móvil; DESV F = desviación estándar de la población de los N valores de fuerza; DESV Fs = desviación estándar de los valores suavizados y CV y CVs = coeficientes de variación obtenidos antes y después suavizado respectivamente.



4.1.3. Valores del coeficiente de resistencia a la rodadura k

La tabla siguiente muestra los valores calculados del coeficiente de resistencia a la rodadura k. Con los datos obtenidos una aproximación al valor de k global del conjunto del tractor es la relación entre la fuerza medida por el dinamómetro y el peso adherente, que en este caso es el peso medido en báscula, de 43,14 kN. Utilizando el valor de fuerza suavizada, Fs media obtenemos los coeficientes que se relacionan en la tabla 12.

Tabla 12. Coeficientes k calculados con los ensayos. $K = F_s \text{ media} / 41,52$ (peso adherente total)

N	Código ensayo	Suelo	Presión (bar)	Fs media (kN)	k
0	E01	Asfalto	1,6	2,83	0,066
1	E02	Asfalto	1,6	2,50	0,058
2	E03	L. Superficial	1,6	4,59	0,106
3	E04	Arado	1,6	7,79	0,180
4	E05	Sin Laboreo	1,6	3,27	0,076
5	E06	Asfalto	1,6	2,86	0,066
6	E07	L. Superficial	1,6	4,52	0,105
7	E08	Arado	1,6	7,71	0,179
8	E09	Sin Laboreo	1,6	3,64	0,084
9	E10	Asfalto	2	3,04	0,071
10	E11	Asfalto	2	2,45	0,057
11	E12	L. Superficial	2	4,35	0,101
12	E13	Arado	2	8,16	0,189
13	E14	Sin Laboreo	2	3,45	0,080
14	E17 a	Arado	2	6,12	0,142
15	E15	Asfalto	2	2,71	0,063
16	E18	Sin Laboreo	2	3,85	0,089
17	E16	L. Superficial	2	5,13	0,119
18	E17 b	Arado	2	7,53	0,174
19	E19	Asfalto	0,8	5,52	0,128
20	E20	Asfalto	0,8	4,32	0,100
21	E21	L. Superficial	0,8	5,70	0,132
22	E22	Arado	0,8	8,40	0,195
23	E23	Sin Laboreo	0,8	4,87	0,113
24	E24	Asfalto	0,8	4,52	0,105
25	E25 a	L. Superficial	0,8	7,00	0,162
26	E25 b	L. Superficial	0,8	7,04	0,163
27	E26	Arado	0,8	8,67	0,201
28	E27	Sin Laboreo	0,8	5,59	0,130



Como resultado esperado se encuentra la independencia de los valores de k según velocidad. No se ha encontrado ninguna correlación, pero si la esperada vinculación a la presión de inflado y al tipo de suelo. Una vez agrupados los datos, excluyendo el factor velocidad, se reagrupan los datos en la tabla 13, en la que se presenta un sencillo análisis estadístico.

Tabla 13. Datos de k calculado según suelo y presión de inflado. CV es el coeficiente de variación de todos los datos a distintas velocidades.

Suelo	Presión (bar)	k	CV	k medio
Arado	0,8	0,20	2%	
Arado	1,6	0,18	1%	
Arado	2	0,17	14%	0,18
Asfalto	0,8	0,11	19%	
Asfalto	1,6	0,06	24%	
Asfalto	2	0,06	11%	0,08
L. Superficial	0,8	0,15	12%	
L. Superficial	1,6	0,11	1%	
L. Superficial	2	0,11	12%	0,13
Sin Laboreo	0,8	0,12	10%	
Sin Laboreo	1,6	0,08	8%	
Sin Laboreo	2	0,08	8%	0,10

Gráficamente, los datos de esta tabla se pueden ver en la figura 32. Solamente en el caso de las pruebas en asfalto se obtienen valores elevados del CV, lo que indica una dispersión elevada en las mediciones. Sobre todo, en velocidades altas, se obtuvieron en asfalto variaciones debidas probablemente a la oscilación del esfuerzo de tracción, habiéndose utilizado además un cable de cierta elasticidad. En el resto de medidas, las dispersiones son muy bajas considerando una gran dispersión en las velocidades.

En la gráfica puede apreciarse las tendencias en la reducción de la resistencia a la rodadura con el aumento de la presión de inflado en todos los suelos. En el intervalo de trabajo entre 1,6



y 2 bar únicamente en el suelo con labor de arada se mantiene una tendencia clara a seguir descendiendo la resistencia al aumentar la presión.

En suelos con poco laboreo, y más claramente en suelos más o menos consolidados superficialmente, no se reduce más la resistencia a la rodadura a partir de una determinada presión, en las condiciones del ensayo y tipo de neumático estudiados.

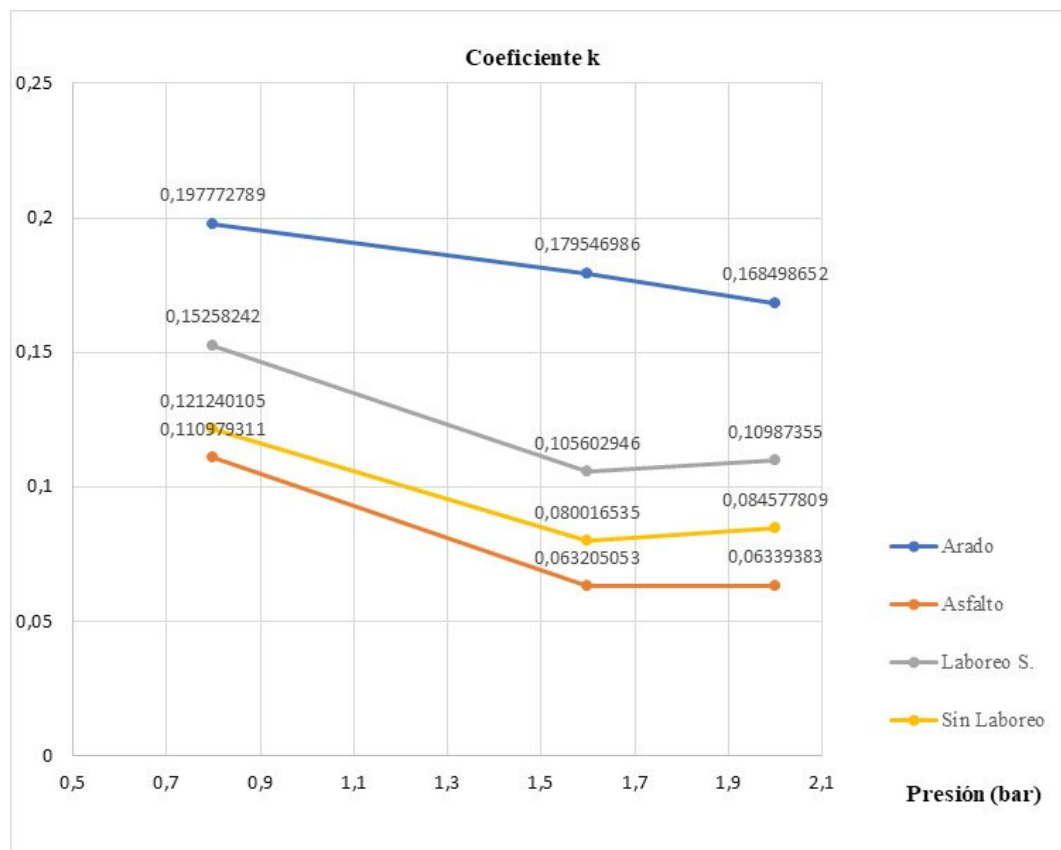


Figura 32. Resultados del coeficiente k en los distintos suelos según presión de inflado de los neumáticos



4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA EL BALANCE DE TRACCIÓN.

Los ensayos para obtener fuerzas de tracción y deslizamientos se llevaron a cabo el día 10 de junio de 2022 solamente sobre suelo con laboreo superficial. La humedad del suelo en el ensayo fue de solo un 12% y se encontraba muy disgregado ya que se realizó una pasada previa para acondicionar la superficie. Se utilizó un tractor remolcador de mayor potencia (74 kW) que en el ensayo de rodadura y se utilizó una barra rígida para la conexión entre ambos.



Figura 33. Ensayo de tracción en suelo con laboreo superficial.

En la figura 31 puede verse el recorrido en el que la célula mide la fuerza total de arrastre con el apero trabajando, con el tractor remolcado en punto muerto. En una siguiente pasada, el tractor remolcado levanta al apero para determinar solo la fuerza de rodadura.



En las dos pasadas sucesivas, una de ellas el tractor del ensayo, trabaja con el cultivador en funcionamiento para medir la velocidad real de trabajo correspondiente, y finalmente, en la última pasada, se determina la velocidad en vacío sobre asfalto para tomar esa velocidad como velocidad teórica.

Se pretende con este ensayo simplemente valorar la viabilidad de utilizar el sistema de medida para, en cuatro fases consecutivas y en apenas unos minutos (salvo por el cambio de presión), poder obtener unos valores básicos para un balance de tracción.

En la tabla 14 se indican los resultados obtenidos en las pasadas con tractor remolcador para determinar fuerzas. Debido a la premura y al estado del suelo, algo compactado, se encontró un dato incoherente de coeficiente de resistencia a la rodadura más elevado con la presión de inflado de 0,8 bar. Se repitió la pasada a 1,6 bar, pero ya no se dispuso de espacio suficiente para repetir la pasada a 0,8 bar sin pisar zonas ya afectadas por huellas anteriores.

Tabla 14. Balance de fuerzas. (Fs media)k corresponde a la pasada con el apero levantado. FT es la fuerza de tiro demandada por el apero ($FT = F - F_k$).

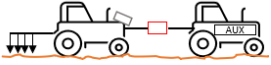
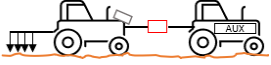
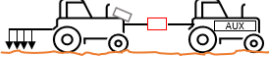
	N	Código ensayo	Presión	Fs media	(Fs media)k	F (kN)	k	Fk (kN)	FT (kN)
	29	E28a	1,6	1309,89	651,05	12,85	0,133	6,38	6,46
	31	E29a	1,6	1306,96	592,52	12,82	0,121	5,81	7,01
	33	E30a	0,8	1390,02	559,64	13,63	0,115	5,49	8,14

Tabla 15. Velocidades obtenidas en el ensayo con y sin tracción (velocidades real y teórica respectivamente).





	N	Código ensayo	Suelo	Presión	VGNSS (km/h)
	35	E31	Labor sup.	1,6	5,469 (Vr)
	36	E32	Asfalto	1,6	6,213 (Vt)
	37	E33	Labor sup.	0,8	5,513 (Vr)
	38	E34	Asfalto	0,8	6,168 (Vt)



Tabla 16. Composición de balance de tracción:

Presión	Fk (kN)	FT (kN)	δ	Reparto de potencias					Carga motor estimada	CT
				P δ (kW)	Pk(kW)	Papero (kW)	Ptransm (kW)	Ptotal (kW)		
Promedio 1,6	6,10	6,73	0,12	1,39	9,26	10,23	7,08	27,96	0,47	0,16
0,8	5,49	8,14	0,11	1,46	8,62	11,56	7,08	28,72	0,49	0,20

δ = patinamiento: $0,12 = 1 - (5,465/6,213)$. Ver tabla 15.

$$P\delta = FT \cdot (Vt - Vr).$$

$$Pk = Fk \cdot vr.$$

$$Papero = FT \cdot Vr$$

Ptransm = $0,12 \cdot Pmotor$. (59 kW). Se aplican unas pérdidas en la transmisión del 12% de la potencia máxima.

P total = suma de potencias

$$Carga\ motor = Ptotal / 59$$

CT = coeficiente de tracción. $CT = FT / \text{Peso adherente}$ (41,52 kN)



En la tabla 16 se presenta la realización de un balance de tracción simplificado. Se deduce de los datos adquiridos, que el nivel de carga del motor es bajo (menor del 50%) lo que está en consonancia con un coeficiente de tracción bajo. Las pérdidas por rodadura son mucho mayores que las pérdidas por deslizamiento, lo que deriva de la escasa potencia demandada y, por ende, bajo nivel de carga y bajo coeficiente de tracción. Aunque no se ha planteado en el cálculo, sería posible estimar, utilizando un valor medido de radio en carga del neumático, la eficiencia en tracción calculando con dicho radio el valor de la fuerza periférica de cada eje.

La adquisición de datos y la tabla presentada indican la viabilidad de utilizar este equipo para balances de tracción en ámbito docente.

Como comentario de los resultados ya apuntados a 0,8 bar, las pérdidas por rodadura son menores que a 1,6 bar, resultado incoherente con lo observado en el ensayo de rodadura, en el que las presiones más bajas proporcionan mayores valores de k (ver tabla 15). Es sin duda un dato mal recogido que necesitaría repetición del ensayo.

4.3. ÍNDICE DE CONO Y DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE K.

Para la toma de datos en laboreo superficial y arado se han realizado medidas de IC con el cono normalizado de 5 cm². Durante la toma de datos se comprobó que el cono de mayor tamaño disponible arrojaba los valores más fiables, con menor dispersión entre los datos en campo.

La tabla 17 muestra los resultados de k obtenidos a partir de las medidas en suelo sin laboreo. El valor medio final, con una variación muy baja (6%) es de 0,06, frente a un valor medio a 1,6 bar medido en el experimento de rodadura de 0.08. Una diferencia considerable en nuestro caso.



Tabla 17. Valores de Índice de Cono obtenidos en el suelo sin laboreo. Cn = valor numérico de neumático de Wismer y Luth.

Cono de	5	cm ²				
F medida (N)	IC (kPa)	Cn tras	Cn del	k tras	k del	k
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
190	380	25,84	18,07	0,046	0,066	0,056
160	320	21,76	15,22	0,055	0,079	0,067
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
160	320	21,76	15,22	0,055	0,079	0,067
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
Media						0,0606
CV						6%

En el caso de suelos labrados, es inviable realizar medidas con los conos normalizados.

Siguiendo la recomendación de los autores mencionados, se indica en las tablas 18 y 19, los valores calculados para suelos con laboreo superficial y suelo arado.

Tabla 18. Valores de Índice de Cono obtenidos en el suelo con laboreo superficial medidos en la huella del tractor. Cn = valor numérico de neumático de Wismer y Luth.

Cono de	5	cm ²				
F medida (N)	IC (kPa)	Cn tras	Cn del	k tras	k del	k
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
160	320	21,76	15,22	0,055	0,079	0,067
160	320	21,76	15,22	0,055	0,079	0,067
240	480	32,64	22,83	0,037	0,052	0,045
142	284	19,31	13,51	0,062	0,089	0,075
120	240	16,32	11,41	0,073	0,105	0,089
220	440	29,92	20,93	0,040	0,057	0,049
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
200	400	27,20	19,02	0,044	0,063	0,053
240	480	32,64	22,83	0,037	0,052	0,045
Media						0,0608
CV						23%

En ambos casos, se observa que el cálculo de k difiere absolutamente de los datos medidos experimentalmente y además se obtiene una elevada dispersión en los mismos.



Tabla 19. Valores de Índice de Cono obtenidos en el suelo con laboreo superficial medidos en la huella del tractor. Cn = valor numérico de neumático de Wismer y Luth.

Cono de	5	cm ²				
F medida (N)	IC (kPa)	Cn tras	Cn del	k tras	k del	k
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
100	200	13,60	9,51	0,088	0,126	0,107
240	480	32,64	22,83	0,037	0,052	0,045
180	360	24,48	17,12	0,049	0,070	0,059
100	200	13,60	9,51	0,088	0,126	0,107
80	160	10,88	7,61	0,110	0,157	0,133
160	320	21,76	15,22	0,055	0,079	0,067
240	480	32,64	22,83	0,037	0,052	0,045
120	240	16,32	11,41	0,073	0,105	0,089
160	320	21,76	15,22	0,055	0,079	0,067
Media						0,0778
CV						38%



5. CONCLUSIONES.

El dispositivo diseñado para la adquisición de datos de rodadura utilizado es válido para la función buscada. Los sensores son de fácil manejo y permiten obtener en tiempo real y grabar los datos a distancia. Los resultados son coherentes con la literatura científica y con medidas tabuladas en distintas publicaciones referentes a los valores de coeficiente de resistencia a la rodadura en distintos suelos con neumáticos agrícolas.

Ante el resultado de variación del coeficiente de resistencia a la rodadura en función de la presión en distintos suelos, se concluye que, en este tipo de tractores y neumáticos, no es interesante seguir aumentando la presión de inflado a partir de un determinado valor, que en nuestro caso ha coincidido con la presión media recomendada por el fabricante del tractor.

El dispositivo es válido para la función de obtener datos para el balance de tracción. Aunque requiere cuatro mediciones para cada ensayo que se pretenda realizar, para obtener patinamiento, estos requieren unos pocos minutos para su obtención.

El modelo de cálculo de Wismer y Luth (1973), no es válido para determinar el valor de Índice de Cono en suelos labrados. La medida de este dato en estos suelos, incluso con laboreo superficial es muy imprecisa y requeriría distintos tipos de cono para su medición.

Como propuestas de siguientes investigaciones, aprovechando que el sistema admite mas entradas de datos, se propone mejorar el sistema de adquisición añadiendo sensores individuales en cada rueda que permitan determinar el patinamiento en tiempo real cuando el tractor tracciona.



6. BIBLIOGRAFÍA.

Blanco Roldán, G. y Marcos Álvarez, N. (2006) Características y comportamiento de los neumáticos agrícolas. *Vida Rural* pp. 56-60.

Blanco Roldán, G.L. y Gil Ribes, G.I. *Mecanización y Tecnología Rural*. Dpto. de Ingeniería Rural. ETSI. Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba.

Botta, G., Jorajuría, D. y Draghi, L. (1998). Predicción del esfuerzo de rodadura en un tractor agrícola. En: *Ingeniería Agrícola y Mecanización en el Marco Latinoamericano*. ISBN: 950-34-0125-9. Editores Responsables: Balbuena, Benez, Jorajuría. (Ex aequo) Editorial de la UNLP, La Plata, Argentina, 612 páginas. Pag: 36-42.

Botta, G., Tourn, M., Pozzolo, O., Soza, E., Rivero, D., Tolon Becerra, A., Agnes D., Bellora Melcon, F. y Bomben, M. (2007). *Estudio del esfuerzo de rodadura en tractores articulados (4WD) y de tracción delantera asistida (FWA)*.

Boto Fidalgo, J.A. (2006) *La mecanización agraria Principios y aplicaciones*. 2ª ed. rev. Salamanca. Kadmos.

<https://www.claas.es/noticias-actualidad/actual/noticias/claas-integra-terranimo--en-cemos-para-tractores-/2668452>

Continental (2013). *Guía Técnica de Neumáticos Agrícolas 2014/2015*. Disponible en: Continental Specialty Tires - Agricultural Tires (continental-tires.com).

Draghi, L. y Hilber, J. (2006) *El tráfico agrícola y la respuesta mecánica del suelo*. Ediciones INTA.

<https://www.innovagri.es/investigacion-desarrollo-innovacion/caracteristicas-de-los-neumaticos-para-aplicaciones-agricolas.html>

Ferrari, H.J. y Ferrari, M.C. (2016). *Técnica simple y eficaz para determinar la presión adecuada para los neumáticos agrícolas*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Concepción del Uruguay. En https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/879/CR%20Entre%20Rios_EE_A%20Concepcion_Ferrari_H_T%C3%A9cnica%20simple%20y%20eficaz%20para%20determinar%20la%20presi%C3%B3n%20de%20inflado%20adecuada.pdf?sequence=2

González Correa, A. (2007). *Diseño de un dispositivo para medición de patinaje en tractores agrícolas utilizando un controlador lógico programable (PLC)*. Tesis doctoral. Universidad Antonio Narro, México.

García Ramos, F. J., Vidal, M. y Boné, A. (2012) Tendencias técnicas y recomendaciones de uso de los neumáticos de los tractores. *Vida Rural* pp. 22-26.



Juanós, B.C. (1999). Los neumáticos Agrícolas. *Vida Rural* pp. 56.
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_vrural/Vrural_1999_97_56_56.pdf

Márquez, L. (2008) Capacidad de tracción y confort de marcha. *Agrotec* pp. 98-106.

Renius Theodor, K., *Fundamentals of tractor design*. Springer Nature, Switzerland (2020).

Wismer, R. D. y Luth, H. J. (1973) Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics* vol. 10 nº 2, p. 49-61. Pergamon Press. Great Britain.