



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

TRAYECTORIA DE UN TRACTOR CON
GUIADO AUTOMÁTICO

T E S I S

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE



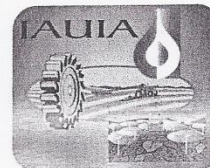
DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

PRESENTA

M.I. JOSÉ ANTONIO YAM TZEC

Chapingo Texcoco, Estado de México



TRAYECTORIA DE UN TRACTOR CON GUIADO AUTOMÁTICO

Tesis realizada por M.I. JOSÉ ANTONIO YAM TZEC, bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

COMITÉ ASESOR

DIRECTOR:



DR. EUGENIO ROMANTCHIK KRIUCHKOVA

ASESORES:

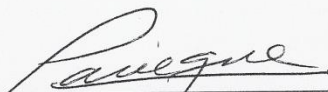


DR. GILBERTO DE JESÚS LOPEZ CANTEÑS



DR. LUCIANO PEREZ SOBREVILLA

LECTOR EXTERNO:



DR. PEDRO PANEQUE RONDON

Chapingo, México 2014

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

A la Universidad Autónoma Chapingo

Al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola

Al Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova

Al Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs

Al Dr. Luciano Pérez Sobrevilla

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor de la presente tesis realizó la licenciatura en la Universidad Autónoma Chapingo, obtuvo el título de Ingeniero Mecánico Agrícola en el año 2007. Su estancia profesional la realizó en la Universidad Tecnológica de Costa Rica, San José de Costa Rica, como asistente en Producción del Programa de Producción Agropecuaria en el marco del Convenio México-Costa Rica en Transferencia de Tecnología.

La Maestría en Ingeniería Agrícola y uso integral del agua la realizó en el posgrado del mismo nombre en la Universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el grado académico en el año 2008.

Ha colaborado como asesor de tesis de licenciatura en la elaboración de softwares para el área administrativa del Departamento de Maquinaria Agrícola y Ciencias Forestales. Participó en temas de investigación sobre daños mecánicos para frutos de manzana en el Departamento de Estadística y Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Ha asistido a diversos Congresos Nacionales y de la Asociación Mexicana de Ingeniería Agrícola.

A la fecha, es colaborador en el área administrativa de la Universidad Autónoma Chapingo.

TRAYECTORIA DE UN TRACTOR CON GUIADO AUTOMÁTICO

TRAJECTORY OF A TRACTOR WITH AUTOMATIC GUIDANCE

Jose Antonio Yam Tzec¹, Eugenio Romantchik Kriuchkova²

RESUMEN

Los tractores agrícolas guiados automáticamente son tractores convencionales que se encuentran equipados con sistemas de geo-posicionamiento, sensores y actuadores que permiten programar su trayectoria. Se modeló un conjunto agrícola, se simuló la trayectoria y se realizaron pruebas en campo con un tractor Massey Ferguson 592T, al cual le fue instalado el sistema de guiado automático EZ-Steer 250 de Trimble® con el objetivo de comparar la precisión del modelo y evaluar la eficiencia del sistema de autoguiado en campo. Los resultados obtenidos en la modelación reporta una media del error en la trayectoria de 0.087 y una Desviación estándar de 0.18, con relación a las trayectorias realizadas con el tractor Massey Ferguson 592T se obtiene que con el uso del sistema de guiado EZ-Steer® en trayectoria lineal y con un sistema de corrección diferencial, se reportan errores promedio de 2.2 cm sobre la trayectoria predeterminada. Las características de las trayectorias obtenidas en campo mostraron que los errores o desviaciones laterales en la trayectoria lineal aumentaron de 4 hasta 10 cm al cambiar la velocidad de 5 a 9 km h⁻¹; y para el caso de la trayectoria en pivote central las desviaciones laterales variaron de 6 hasta 15 cm, sin diferencias significativas estadísticamente ($P \leq 0.05$). Los tratamientos que corresponden a las trayectorias sin corrección diferencial presentaron errores de hasta 90 cm, encontrando diferencias significativas con el tratamiento testigo sin implemento agrícola ($P \leq 0.05$). Se encontró una trayectoria óptima con un error de 7.5 cm cuando el tractor circula a velocidades de 5 km h⁻¹ con implemento agrícola.

Palabras clave: Tractor agrícola, guiado automático, error de trayectoria, corrección diferencial.

ABSTRACT

The agricultural tractors with automatic guidance are conventional tractors equipped with global position systems, sensors and actuators which allow programming its trajectory. An agricultural joint was modeled, the trajectory was simulated and field tests were performed with a tractor Massey Ferguson 592T, to which it was installed automatic guidance system EZ-Steer 250 Trimble® order to compare the accuracy of the model and evaluate the efficiency of automatic steering system in the field. The results reported in the modeling error averaged path 0087 and a standard deviation 0.18, relative to the paths at the Massey Ferguson 592T is obtained with the use of the guidance system in EZ-Steer® linear and differential correction system path, average errors of 2.2 cm on the predetermined trajectory are reported. The characteristics of the field trajectories obtained showed that lateral deviations or errors in the linear path increased from 4 to 10 cm by changing the speed of 5-9 km h⁻¹; and in the case of the path in central pivot lateral deviations ranged from 6-15 cm, with no statistically significant ($P \leq 0.05$) differences. Treatments that correspond to paths without differential correction had errors of up to 90 cm, finding significant differences with the control treatment without agricultural implement ($P \leq 0.05$). Optimum trajectory with an error of 7.5 cm was found when the tractor driven at a speed of 5 km h⁻¹ with agricultural implement.

Keywords: Agricultural tractor, automatic guidance, trajectory error, differential correction.

¹Autor de tesis

²Director de tesis

¹Thesis author

²Thesis advisor

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo General	2
2.2 Objetivos particulares.....	2
3. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Agricultura y Sistemas de Guiado	3
2.1.1 Sistemas de guiado en tractores agrícolas	4
2.1.2 Adopción de los sistemas de guiado automático en México	8
2.1.3. El sistema de posicionamiento global y corrección diferencial	11
2.2 Elementos del Sistema de guiado	13
2.2.1 Conjunto agrícola	13
2.2.2 Principales trayectorias del Sistema de guiado EZ-Steer.....	14
2.3 Trayectoria del tractor agrícola.....	15
2.3.1 Cinemática de la trayectoria.....	16
2.3.2 Dinámica de la trayectoria	22
4.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
4.1 Material y equipo	31
4.1.1. Características del tractor.....	32
4.1.1.1Potencia del tractor.	32
4.1.1.2. Distribución del peso del tractor.	32
4.1.1.3 Distancias del tractor.....	33

4.1.1.4 Centro de gravedad del tractor.	34
4.1.2. Características del Sistema de Guiado.....	35
4.1.2.1 Pantalla.....	35
4.1.2.2 Antena.	35
4.1.2.3 Controlador compensador.	36
4.1.2.4 Motor eléctrico.....	36
4.2. Metodología.....	37
4.2.1 Modelación del conjunto agrícola	37
4.2.2 Diseño experimental.....	43
4.2.2.1 Lugar del experimento	45
4.2.2.2 Calibración del sistema de guiado	45
4.2.2.3. Configuración de la agresividad del motor instalado en el volante	46
4.2.2.4 Activación y desactivación del sistema de guiado	46
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
5.1. Simulación de las principales características del tractor	47
5.2 Análisis estadístico de las trayectorias en campo	49
5.2.1 Comparación de las velocidades.....	61
5.2.2 Comparación por el tipo de la trayectoria.....	61
5.2.3 Comparación por el tipo de corrección	63
6. CONCLUSIONES	64
7. RECOMENDACIONES	65
8. LITERATURA CITADA.....	66

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PRINCIPALES ELEMENTOS DE UN TRACTOR AGRÍCOLA ESTÁNDAR	14
FIGURA 2. PRINCIPALES TRAYECTORIAS DE LOS SISTEMAS DE GUIADO.....	15
FIGURA 3. GIRO GEOMÉTRICO.....	16
FIGURA 4. DIFERENCIAL DE DIRECCIÓN.....	17
FIGURA 5. CINEMÁTICA DEL MOVIMIENTO LATERAL DEL TRACTOR.....	18
FIGURA 6. DIAGRAMA GENERAL DE UN TRACTOR 4X4.....	23
FIGURA 7. MODELO DE BICICLETA DE 3 RUEDAS	28
FIGURA 8. COMPONENTE DEL EQUIPO EZ-STEER®	31
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DEL PESO Y DISTANCIAS DEL TRACTOR.....	33
FIGURA 10. COMPONENTES DEL SISTEMA DE GUIADO EZ-GUIDE 250	35
FIGURA 11. UBICACIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO.....	36
FIGURA 12. SISTEMA DE GUIADO MONTADO EN EL TRACTOR.....	37
FIGURA 13. MODELO DEL CONJUNTO AGRÍCOLA	38
FIGURA 14. UBICACIÓN DE LUGAR DEL EXPERIMENTO.....	45
FIGURA 15. CARACTERÍSTICAS PARA LA CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE GUIADO.....	46
FIGURA 16. CONFIGURACIÓN DE LA AGRESIVIDAD DEL SISTEMA DE GUIADO.....	46
FIGURA 17. INDICADOR DE ACOPLAMIENTO Y DESACOPAMIENTO DEL TRACTOR	47
FIGURA 18. TRAYECTORIA DEL CONJUNTO AGRÍCOLA SIMULADO.....	48
FIGURA 19. DESVIACIÓN PROMEDIO DE LA TRAYECTORIA	51
FIGURA 20. DESVIACIÓN LATERAL DE LA TRAYECTORIA LINEAL A 5 KM H ⁻¹	54
FIGURA 21. DESVIACIÓN LATERAL DE LA TRAYECTORIA EN PIVOTE A 5 KM H ⁻¹	55
FIGURA 22. DESVIACIÓN LATERAL DE LA TRAYECTORIA LINEAL A 7 KM H ⁻¹	57
FIGURA 23. DESVIACIÓN LATERAL DE LA TRAYECTORIA EN PIVOTE A 7 KM H ⁻¹	58
FIGURA 24. DESVIACIÓN LATERAL DE LA TRAYECTORIA LINEAL DEL TRACTOR A 9 KM H ⁻¹	59
FIGURA 25. DESVIACIÓN LATERAL DE LA TRAYECTORIA EN PIVOTE A 9 KM H ⁻¹	60
FIGURA 26. COMPARACIÓN DE TRAYECTORIAS CON UN RADIO DE GIRO DE 50 M.....	62

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CORRECCIÓN DIFERENCIAL.....	7
CUADRO 2. PRINCIPALES EQUIPOS DE GUIADO AUTOMÁTICO EN MÉXICO.	9
CUADRO 3. INVESTIGACIONES REALIZADAS EN ESTADOS UNIDOS.	10
CUADRO 4. PRUEBAS DE NAVEGACIÓN DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS EN JAPÓN.	10
CUADRO 5. PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO DE UN TRACTOR 4X4.....	24
CUADRO 6. PARÁMETROS ESPECÍFICOS DEL MODELO DE BICICLETA.....	28
CUADRO 7. DISTRIBUCIÓN DEL PESO DEL TRACTOR UTILIZADO.....	33
CUADRO 8. DISTANCIAS HORIZONTALES Y VERTICALES DEL TRACTOR UTILIZADO.	34
CUADRO 9. COORDENADA LONGITUDINAL DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL TRACTOR.....	34
CUADRO 10. FACTORES Y NIVELES DE LOS TRATAMIENTOS.	43
CUADRO 11. CONFORMACIÓN DE LOS 24 TRATAMIENTOS.....	44
CUADRO 12. DESVIACIÓN DE LA TRAYECTORIA PARA TRES DIFERENTES VELOCIDADES.	61
CUADRO 13.COMPARACIÓN DE MEDIAS ENTRE TRATAMIENTOS POR TIPO DE TRAYECTORIA.....	62
CUADRO 14.COMPARACIÓN DE MEDIAS ENTRE TRATAMIENTOS CON Y SIN CORRECCIÓN.	63

1. INTRODUCCIÓN

Gran relevancia ha cobrado en la actualidad el uso de avances tecnológicos en varios campos del conocimiento. La producción agrícola no se ha quedado atrás y poco a poco a medida que el tiempo y la necesidad de satisfacer alimentos a la población aumentan, se han ido adaptando avances científicos a las prácticas agrícolas.

La Mecanización Agrícola busca aprovechar estos avances y aplicarlos a fin de realizar procesos con mayor precisión, optimizando recursos y haciéndolos más eficientes.

Actualmente la Agricultura de Precisión ha revolucionado la forma de producción tradicional, mejorando técnicas existentes y obteniendo el máximo beneficio y producción de los recursos naturales disponibles.

Existe una adopción creciente de los sistemas de guiado automático en tractores agrícolas, debido principalmente a la necesidad de ahorrar insumos, agua y combustible en las actividades agrícolas.

Sin embargo esta adopción se ve afectada por los altos costos de inversión que representa adquirir los sistemas de guiado aun cuando existe oferta suficiente en el mercado. Aunado al costo de inversión existe uno adicional como el costo por la estación base para corrección RTK o señal diferencial a fin de tener un menor error en las operaciones.

En México, existen pocos datos teóricos sobre sistemas de guiado instalados en conjuntos agrícolas que permitan precisar las ventajas y desventajas de los sistemas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Obtener un modelo del conjunto agrícola, realizar su simulación y evaluar el sistema de guiado automático EZ-Steer® en campo y comparar con una trayectoria pre-establecida el error lateral obtenido, con el fin de poder recomendar el uso del modelo y del sistema de guiado.

2.2 Objetivos particulares

- Modelar el conjunto agrícola a partir de los principales parámetros del mismo
- Simular los parámetros principales del tractor agrícola
- Evaluar el comportamiento del sistema de guiado automático EZ-steer y obtener las características de las trayectorias en campo.
- Comparar el modelo teórico de las trayectorias con los resultados obtenidos en campo.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Agricultura y Sistemas de Guiado

Durante la historia, la agricultura ha pasado de ser una ocupación manual a un negocio altamente industrializado utilizando una amplia variedad de herramientas y máquinas. Los investigadores en la actualidad se están enfocando a la agricultura con tractores agrícolas completamente automatizados, sin embargo, el concepto de plena autonomía de estos vehículos no es un concepto nuevo, ya que las primeras etapas de desarrollo se dieron por la década de 1920, y para los años 50's y 60's ya existían los primeros prototipos de tractores sin conductor, utilizando sistemas de control por cable (Ming *et al.*, 2009).

En la década de los 80's el potencial de las computadoras se integró a los sensores de imagen, propiciando oportunidades para la mejora de los sistemas de orientación de la maquinaria. Para los años 90's la automatización de la agricultura revolucionó completamente con la incursión de la agricultura de precisión. Los beneficios potencializaron la productividad, la precisión de las labores y la mejora de seguridad en el funcionamiento. Además los grandes avances de la electrónica, la informática y la tecnología de la computación inspiraron el desarrollo de sistemas de guiado en vehículos.

Actualmente, existen varias tecnologías como la orientación mecánica, el guiado óptico y la orientación, las cuales se han integrado a la automatización agrícola desarrollándose por todo el mundo. Los sistemas de investigación han logrado grandes

avances ofreciendo alternativas prometedoras en la agricultura como la reducción de la fuerza de trabajo, la eficiencia en la producción y desarrollo de operaciones más seguras (Reid *et al.*, 2000; Murakami *et al.*, 2006).

A pesar de los beneficios que ofrecen estos dispositivos, existen aspectos y circunstancias del entorno agrícola que interfieren en el funcionamiento, los cuales para un robot móvil de laboratorio generalmente no se consideran. Por ejemplo, las superficies del suelo pueden ser desiguales interfiriendo en las operaciones y deslizamiento de las ruedas, las condiciones ambientales (como lluvia, niebla, polvo, etc.) puede afectar las funciones del sensor, o los costos que implican la automatización agrícola. Estas desventajas hacen difícil el desarrollo de la automatización y los agricultores en muchos países generalmente no cuentan con las condiciones para mejorar la tecnología (Hague, 2000).

2.1.1 Sistemas de guiado en tractores agrícolas

Muchas de las actividades agrícolas que se realizan con un tractor requieren de precisión, la cual con el avance de las tecnologías se ha ido mejorando logrando ahorros económicos en diversos factores. Las economías son la justificación principal por la que estos sistemas contribuyen con el ser humano para la producción de alimentos (García *et al.*, 2005; Griffin *et al.*, 2005; Ming *et al.*, 2009).

En México, el sistema de dirección de un tractor es un elemento importante ya que facilita las actividades de los conductores. Durante muchos años una persona ha sido la encargada de conducir por la trayectoria contemplada, el cúmulo de tiempo dedicado a

esta actividad y la exactitud con que se requiere realizar las labores agrícolas, requieren de un conductor con mucha experiencia y capacidad para realizar las mismas trayectorias y que sus pasadas sean exactas.

Existen otros problemas como trabajar de noche y/o con polvo lo que imposible realizar las labores, en este sentido se requiere de un sistema o elemento que apoye al conductor de una máquina agrícola. El trabajo de noche y/o con polvo en ocasiones hace imposible las actividades, por lo que se requiere de un sistema o elemento que apoye al conductor de la maquinaria (Kise *et al.*, 2005; Pedersen *et al.*, 2005).

Los sistemas de posicionamiento geográfico han solucionado parte de los problemas que aquejan a la agricultura, una de ellas es resolver en tiempo real las coordenadas casi exactas de un cuerpo rígido en cualquier punto sobre la tierra, principio que se ha aplicado para poder dirigir el tractor sobre la trayectoria inicial establecida (Tillett, 1991; Reid *et al.*, 2000; Benton y Bevely, 2009)

Los tractores guiados automáticamente son sistemas convencionales que se encuentran equipados con navegación GPS, sensores y actuadores que permiten programar su trayectoria. El autoguiado es ampliamente usado en el sector naval aeronáutico y de transporte, sin embargo, aún no se generaliza su uso en el sector agrícola a pesar de las demandas que este sector requiere en operaciones con largos y monótonos periodos de tiempo. El sistema de guiado rápidamente se ha integrado como una herramienta importante para los agricultores de Norteamérica cuando vieron resultados al tener una posición correcta durante las diferentes labores de cultivo (Griffin *et al.*, 2005; Tyrel *et al.*, 2006; Stombaugh *et al.*, 2006).

Existen otros sistemas como los banderilleros satelitales, las barras de luces y los pilotos automáticos, todos con diferentes nombres, bondades, elementos, salidas o actuadores, dependiendo de la empresa que los fabrique pero siempre con el mismo principio: el uso de sistemas de posicionamiento global con corrección para el control de la dirección, las velocidades y el accionamiento de actuadores. Todos estos sistemas permiten realizar una agricultura precisa, incrementar la productividad y contribuir en la economía de los agricultores (Tyrel *et al.*, 2006).

Un factor importante que se debe tomar en cuenta cuando se habla de estos temas es el beneficio que se logra con el medio ambiente, ya que al realizar labores precisas, se reduce el número de horas de funcionamiento del tractor, y por lo tanto, se dejan de emitir residuos producto de la combustión (Pedersen *et al.*, 2005).

En Europa el nivel de adopción de los sistemas de guiado ha ido en incremento, la principal ventaja que han observado es la eficiencia en la mano de obra además de la facilidad de usar y cambiar de tractores este sistema. Otras ventajas de estos sistemas de guiado es que se puede incrementar las velocidades de operación, así como evitar traslapes que originen gastos. Buick y White (1999) mencionan que es bueno el uso de los sistemas de guiado debido que hay incremento en la productividad de los cultivos, se puede trabajar durante las 24 horas en tiempos críticos, por ejemplo cuando se debe sembrar o trasplantar y que reduce la fatiga del conductor.

Sin embargo, a pesar de las ventajas de estos sistemas éstos dependen en gran medida de los sistemas de geo-referencia, su constelación y de la posición de los satélites,

por tanto es importante contar con correcciones diferenciales. Reid *et al.*, (1998) clasifican las labores agrícolas de acuerdo al grado de precisión: baja precisión para labores como mapeo de suelos, precisión media para laboreo de cultivos y precisión alta para siembra, con valores que van de 1 m, 1 dm y 1 cm, respectivamente.

Se pueden clasificar los sistemas de corrección diferencial por la exactitud en la corrección de la señal original. El Cuadro 1 muestra la clasificación realizada por Stombaugh *et al.*, (1998) a los sistemas de corrección diferencial.

Cuadro 1. Clasificación de los sistemas de corrección diferencial

Precisión	Baja	Media	Alta	Muy alta *
Costo (\$)	100-300	1000-4000	5000-10000	> 25000
Error	1-4.5 m	< 1 m	< 15 cm	< 2.5 cm
Corrección diferencial	WASS	Omnistar XP	Omnistar HP	Definida por el usuario

Fuente: Stombaugh *et al.*, 1998 (* Estación base RTK).

La corrección diferencial libre WAAS (Wide Area Augmentation System) es un sistema de corrección basado en satélites desarrollado en Estados Unidos, permite una precisión en la posición menor a cinco metros. El sistema consta de 24 estaciones de vigilancia, llamadas estaciones de referencia de área amplia, 2 estaciones maestras, 6 antenas para la retransmisión de datos y 3 satélites estacionarios. Las 24 estaciones de vigilancia están instaladas con aproximadamente 800 km de separación a lo largo de los Estado Unidos, Alaska, Hawai y Puerto Rico (Reid *et al.*, 2000).

Los sistemas de alta precisión corresponden a sistemas que además de utilizar las ventajas y los beneficios del sistema de Geoposicionamiento global tienen antenas y estaciones terrestres que permiten realizar corrección de la posición con los errores de localización muy bajos.

2.1.2 Adopción de los sistemas de guiado automático en México

En México, según información recabada en visitas de campo, los sistemas más adoptados por los agricultores son los de nivelación láser, seguidos de los sistemas de guiado automático y semiautomático. Aun cuando no se tiene información exacta de cuantos sistemas existen en el país, sin embargo se ha notado que estos sistemas han ido en crecimiento, encontrándose en tercer y cuarto lugar los sistemas menos tecnificados como la barra de luces y el monitoreo de rendimientos que es un sistema de información.

A nivel mundial se han adoptado los sistemas de guiado automático en el conjunto agrícola con diferentes niveles de tecnología, sin embargo, en México solo se comercializan algunas marcas las cuales van desde los banderilleros satelitales hasta los sistemas de guiado automático que utilizan el sistema hidráulico del tractor agrícola para controlar la dirección del mismo. El cuadro 2 nos muestra las características de los equipos comercializados en México.

Cuadro 2. Principales equipos de guiado automático en México.

Empresa comercializadora	Nombre del equipo	Descripción
Trimble	EZ-Steer	Guiado automático universal por medio de dispositivo que gira el volante cuenta con compensación de terreno, puede tener poca ergonomía, para aumentar la precisión se debe corregir la señal.
Trimble	AutoPilot	Está conectado a la unidad de dirección y puede ser combinado con tres diferentes modelos de monitor, menú de tres botones para configuración del equipo y mando de control de funciones.
John Deere	AutoTrac Universal 200	Utiliza un sistema llamado GreenStar que proporciona 4 funciones en un solo equipo: Guiado, documentación, monitor de rendimiento y funcionalidad. Se obtienen vistas en proyección o en 3D de los tramos en el campo. El conjunto AutoTrac Universal sustituye el volante de dirección original del equipo por un nuevo volante controlado por un motor de dirección.
John Deere	ItecPro	Mediante la combinación de AutoTrac y del sistema de gestión de aperos (IMS) el sistema guía automáticamente el tractor por el campo y también automatiza la maniobra de giro en cabeceos.
AutoFarm	RTK AutoSteer	Control de 5 botones, señal GPS con corrección, actualización a receptor con diferentes precisiones, receptor GPS externo, opera a bajas velocidades, calcula cabeceos, y giros a través de diferentes ejes, permite realizar operaciones ya planeadas o mapeadas.
Agco	Auto-Guide	Receptor GPS con corrección, manejo de datos en tarjeta PCMCIA, algunas marcas de tractores en que se instalan son Fendt, Massey Ferguson, Valtra, AgChem y Challenger, posición de pantalla no ergonómica, velocidad mínima: 1 – 25 km h ⁻¹ .

Fuente: Elaboración propia.

En Estados Unidos (USA) algunas instituciones han realizado investigaciones relacionadas con los sistemas de guiado automático; el cuadro 3 muestra la exactitud que se ha alcanzado en las labores agrícolas realizadas.

Cuadro 3. Exactitud de los sistemas de guiado automático.

Institución	Tractor utilizado	Sistema usado	Exactitud
Universidad de Michigan	CASE 7110	Cámaras	6 cm
Texas A&M	Ford	Cámaras	
Stanford	John Deere 7800	GPS	2.5cm
Universidad de Illinois	CASE 8920	GPS	

Fuente: Reid, *et al.*, 2000.

En Japón se han realizado investigaciones de sistemas de guiado instrumentados en máquinas agrícolas, el cuadro 4 relaciona las principales investigaciones realizadas, el tipo de sistema utilizado, la velocidad de operación y el error observado.

Cuadro 4.. Pruebas de navegación de máquinas agrícolas en Japón.

Instituto	Máquina	Sensor	Velocidad (km h ⁻¹)	Error (m)	Publicación	Avances
Universidad de Tokyo (1998)	Tractor	Visión	0.9	0.02	Torii <i>et al.</i> , (1998)	Continúa
Universidad de Hokkaido (1992)	Tractor	Sensor de imagen uni-dimensional	0.936	0.04	Hata <i>et al.</i> , (1993)	Continúa
Universidad de Hokkaido (1997)	Tractor	Sensor de imagen geo-magnética	1.8	0.4	Noguchi <i>et al.</i> , (1997)	Continúa
Universidad de Kyoto (1998)	Combinado	Sensor ultrasónico	1.98		Iida <i>et al.</i> , (1998)	Continúa
Universidad de Ehime	Tractor de transporte	No usado	1.8	No descrito	Yamashita <i>et al.</i> , (1991)	Continúa
MAFF (NARC) (1997)	Tractor	DGPS y giroscopio de fibra óptica	3.6	0.1	Inoue <i>et al.</i> , (1997)	Continúa

MAFF (NARC) (1997)	Plantador de arroz	Giroscopio de fibra óptica y RTKGPS	2.88	0.15	Nagasaka <i>et al.</i> , (1998)	Continúa
MAFF (NGRI) (1998)	Tractor	Giroscopio de fibra óptica y de velocidad ultrasónico	4.32	1-2	Okado <i>et al.</i> , (1998)	Continúa
BRAIN (1996)	Tractor	Procesador de imagen y sensor laser	1.44	0.05	Yukumoto <i>et al.</i> , (1997)	Continúa
BRAIN (1997)	Roceador de velocidad	Cable guiador	2.52	0.1	Tosaki <i>et al.</i> , (1995)	Practicada
Kubota (1997)	Roceador de velocidad	Sensor laser	2.52	0.05	Yoshida (1996)	Completada
Mitsubishi (1995)	Roceador de velocidad	Sensor de velocidad angular y aceleración	2.52	0.1	Nonami <i>et al.</i> , (1993)	Completada

Fuente: Torii (2000).

2.1.3. El sistema de posicionamiento global y corrección diferencial

Desde la década de los 90's los sistemas de Posicionamiento Global (GPS) se ha usado ampliamente como sensores de guía. Sin embargo, esta tecnología ya se ocupa en muchas otras operaciones de producción agrícola como siembra, labranza, cultivo, deshierbe y cosecha. El GPS es una tecnología de navegación que está disponible para tractores. Los sistemas de guiado GPS proporcionan una guía absoluta y requiere un tipo de sistema de georeferencia.

Sin embargo el sistema de guiado GPS presenta las siguientes limitantes para el guiado de un tractor agrícola:

- 1) el sistema no puede ser usado en áreas protegidas contra microondas,
- 2) no es confiable para el posicionamiento en el rango de precisión de centímetros (por ejemplo para presencia de árboles, terrenos ondulados, interferencia satelital o señales de corrección);
- 3) el tiempo que requiere en procesar la señal y determinar la localización, y
- 4) el alto costo para las labores agrícolas.

A pesar de estas desventajas, se espera que los avances tecnológicos reduzcan estas limitantes en poco tiempo, por lo que la incorporación del GPS es fundamental para los sistemas de guiado (Ming *et al.*, 2009).

Un sistema de corrección diferencial recibe señal de una o más estaciones con coordenadas conocidas. Una base recibe la señal del satélite asignándole a ese punto una coordenada diferente, pero como son conocidas las coordenadas exactas, entonces se calcula el margen de error y se puede transmitir al receptor la señal corregida.

El receptor utiliza cuatro satélites para calcular los parámetros de su posición, los cuales son la latitud, la longitud, la altitud y el tiempo. La distancia de un satélite a un receptor se calcula midiendo el tiempo de viaje de la señal de radio desde la salida del receptor, mediante la Ecuación siguiente:

$$P = ct \tag{1}$$

donde P = es la distancia medida del satélite al receptor; c = es la velocidad de la luz; t = es el tiempo de recorrido de la señal desde el satélite al receptor.

Para determinar la distancia real de cada satélite se debe corregir la distancia de acuerdo a la Ecuación siguiente:

$$R = P - c(\Delta ta + \Delta tu - \Delta ts) \quad (2)$$

donde R = es la distancia real; Δta = es el retraso en la propagación y otros errores; $\Delta tu, \Delta ts$ = es la corrección de reloj del receptor y del satélite a partir del tiempo del sistema de guiado GPS.

2.2 Elementos del Sistema de guiado

El sistema de guiado está compuesto por los elementos del conjunto agrícola, el sistema de recepción de señal, corrección y control, las trayectorias a seguir y la corrección diferencial, como se describe a continuación.

2.2.1 Conjunto agrícola

Los componentes del sistema hidráulico (Figura 1) son las válvulas de guiado (3), el circuito hidráulico (5) y válvulas de control estándar (2). El sistema sensor está compuesto por el sensor de ángulo de la rueda (11) y sensores mecánicos, los cuales están instalados en la parte delantera del tractor (no mostrados en la Figura). Estos se acoplan al conector que forma parte del tercer componente del sistema, la unidad controladora (6), que tiene una tensión proporcional a la desviación, es decir, la desviación de la trayectoria (Keicher *et al.*, 2000).

El controlador compara esta tensión con el potencial del sensor de ángulo de la rueda y utiliza la diferencia como tensión de salida para cambiar el ángulo de la dirección a través de la válvula hidráulica (Keicher *et al.*, 2000).

El piloto automático es un sistema automático fiable con orientación perfeccionada para muchos tipos de máquinas agrícolas. Desde su introducción la aceptación ha estado en constante aumento. Información de 1999, indicó que la empresa Claas de Europa ya vendía alrededor del 15% de las cosechadoras equipadas con sistema de dirección y transmisión hidráulica automática, esto significa cerca de 2500 sistemas vendidos al año. Este tipo de sistema de orientación es el más común que se puede encontrar en Europa (Keicher *et al.*, 2000).

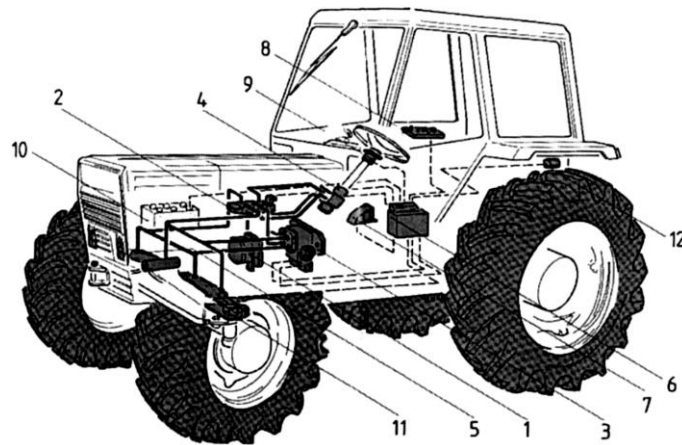


Figura 1. Principales elementos de un tractor agrícola estándar .

2.2.2 Principales trayectorias del Sistema de guiado

El sistema de guiado proporciona, al menos, seis tipos de trayectorias (Figura 2) que pueden adaptarse a diferentes formas de campos irregulares. El acoplamiento de las trayectorias facilita las labores y promueve ahorro para diversas actividades como

aplicación de agroquímicos, fumigaciones, ahorro en combustible y tiempo ya que proporcionan ahorro en vueltas y tiempo de operación.

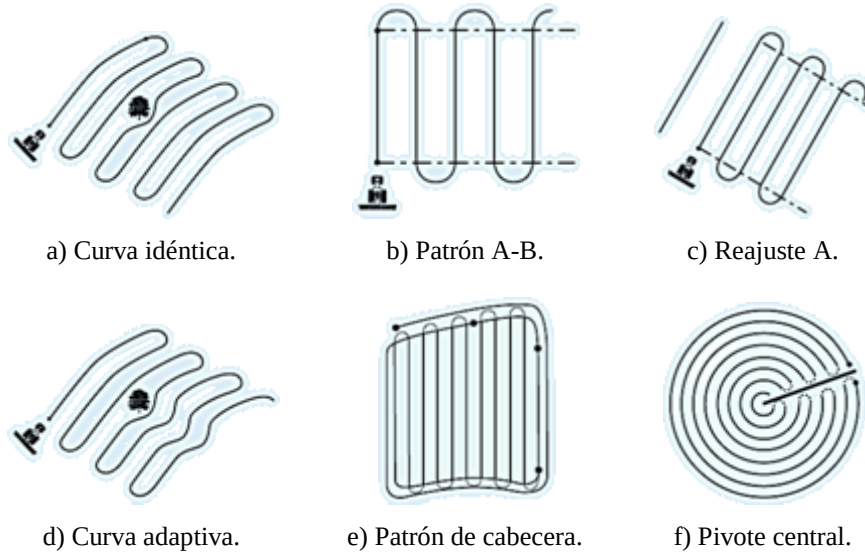


Figura 2. Principales trayectorias de los sistemas de guiado.

2.3 Trayectoria del tractor agrícola

Para conocer la trayectoria del tractor es importante conocer los parámetros principales y las características físicas del mismo. Además es importante modelar el conjunto agrícola que permita simplificar y obtener la trayectoria y velocidades de operación.

2.3.1 Cinemática de la trayectoria

Para comprender el estudio dinámico del tractor agrícola, es necesario iniciar con la modelación básica de los parámetros físicos del tractor, se muestra la figura 3 que permite definir las características principales de un tractor al realizar un giro.

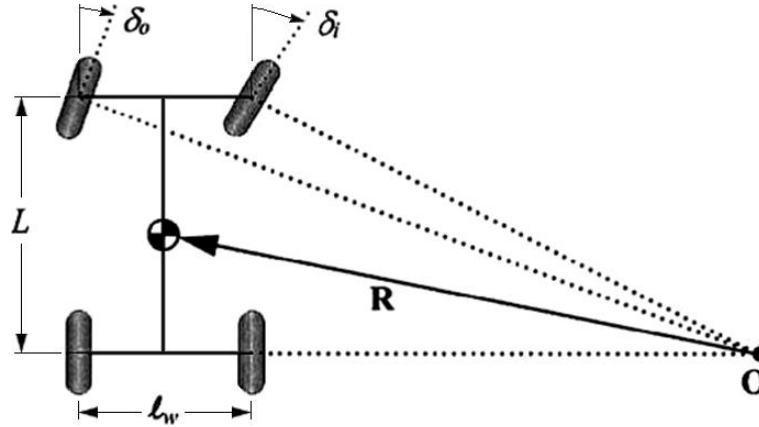


Figura 3. Giro geométrico.

Donde δ_i, δ_o = son los ángulos de dirección de las ruedas delanteras interior y exterior, L = es la distancia entre los ejes del tractor, l_w = es el ancho de vía del tractor, O = es el centro instantáneo de rotación del tractor, es la intersección de las líneas de los ejes de las ruedas delanteras y traseras, R es el radio de giro del tractor, es la distancia del centro de gravedad al centro de rotación.

Si el ángulo de deslizamiento es pequeño, la relación entre el radio de giro y la distancia entre los ejes puede ser aproximada con la Ecuación siguiente:

$$\frac{\dot{\psi}}{V} \approx \frac{1}{R} = \frac{\delta}{L}$$

$$\delta = \frac{L}{R}$$

(3)

Los ángulos de dirección de las ruedas interior y exterior, se calculan con las Ecuaciones siguientes:

$$\delta_i = \frac{L}{R - l_w/2} \quad (4)$$

$$\delta_o = \frac{L}{R + l_w/2} \quad (5)$$

El ángulo de dirección promedio de las ruedas delanteras se calcula :

$$\delta = \frac{\delta_o + \delta_i}{2} \cong \frac{L}{R} \quad (6)$$

La diferencia entre los ángulos de dirección de las ruedas delanteras se calcula con la Ecuación:

$$\delta_i - \delta_o = \left(\frac{L}{R^2}\right) l_w = \delta^2 \left(\frac{l_w}{L}\right) \quad (7)$$

De esta forma, la diferencia en los ángulos de dirección de las dos ruedas delanteras es proporcional al cuadrado del ángulo promedio de la dirección. Tal diferencial de dirección puede obtenerse a partir de una varilla con unión trapezoidal, en la cual para los giros a la izquierda como a la derecha, la rueda interior siempre presenta el ángulo de dirección más grande (Figura 4).

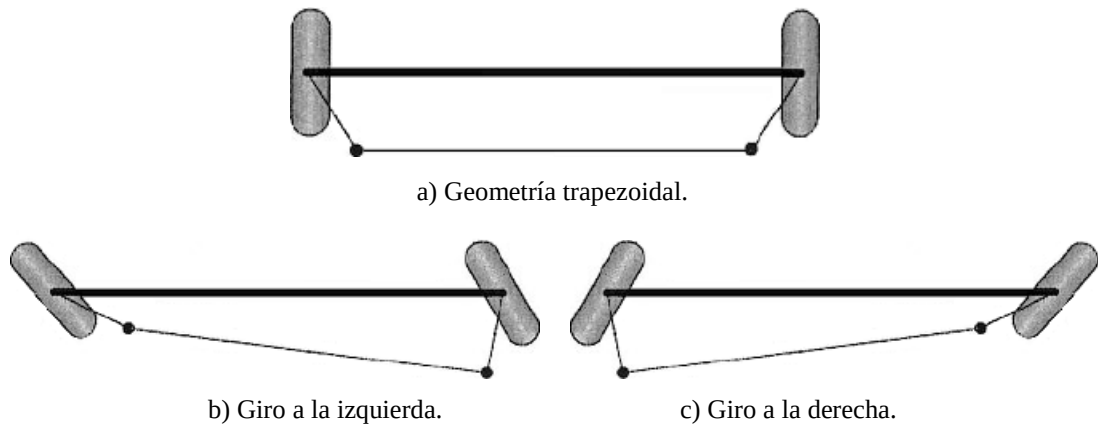


Figura 4. Diferencial de dirección.

Con base en lo anterior, el movimiento lateral del tractor puede ser desarrollado bajo ciertos supuestos descritos en modelos que proporcionan una descripción matemática del movimiento sin tener en cuenta las fuerzas que afectan el movimiento. Las ecuaciones para modelarlo, se basan puramente en relaciones geométricas que rigen el sistema. En la Figura 5 se muestra un modelo de bicicleta del tractor (Wang y Qi, 2000).

En el modelo de bicicleta las dos ruedas del eje delantero son representadas por una sola rueda en el punto A. Del mismo modo las ruedas traseras están representadas por una rueda en el punto B (Figura 5).

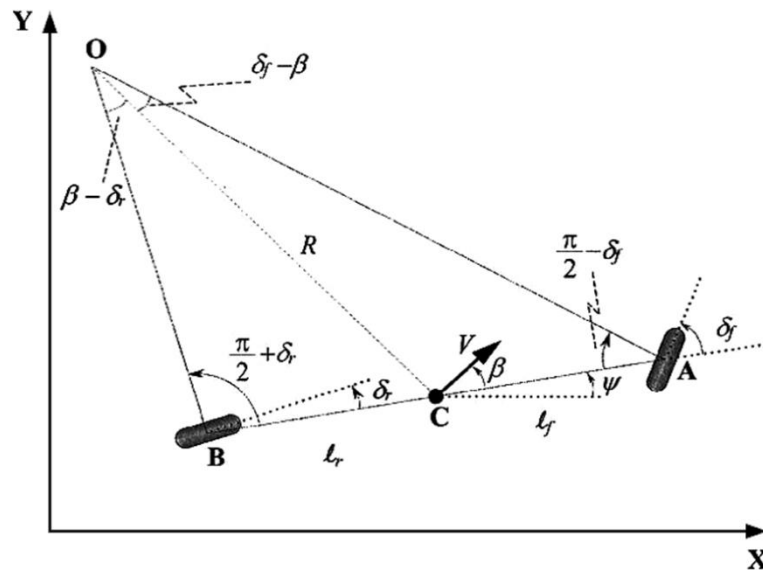


Figura 5. Cinemática del movimiento lateral del tractor.

donde δ_f, δ_r = son los ángulos de giro de las ruedas delanteras y traseras, C = es el centro de gravedad del tractor, l_f, l_r = son las distancias del centro de gravedad a los

puntos A y B, L = es la distancia entre los ejes del tractor ($L = l_f + l_r$), β = es el ángulo de deslizamiento de la trayectoria del tractor, el ángulo entre el vector velocidad y el eje longitudinal, O = es el centro instantáneo de rotación del tractor, es la intersección de las líneas de los ejes de las ruedas delanteras y traseras. R = es el radio de la trayectoria del tractor, se define por la distancia del centro de gravedad al centro de rotación, V = es la velocidad del tractor en el centro de gravedad, la dirección de la velocidad es perpendicular a la línea que describe el radio de giro, X, Y = son las coordenadas inerciales de la ubicación del centro de gravedad del tractor, ψ = es el ángulo de orientación o cabeceo del tractor, γ = es el ángulo de rumbo del tractor, es la suma del ángulo de orientación y el ángulo de deslizamiento ($\gamma = \psi + \beta$).

El supuesto más importante utilizado en el desarrollo del modelo cinemático es que los vectores de velocidad en las ruedas delanteras y trasera forman los ángulos (δ_f) y (δ_r) respecto a la dirección longitudinal del eje del tractor, respectivamente. Cuando solamente las ruedas delanteras son directrices, el ángulo direccional de las ruedas traseras es nulo ($\delta_r = 0$) y se asume que los ángulos de deslizamiento en ambas ruedas son iguales a cero. Un tractor al conducir en un camino circular, la fuerza lateral total de las ruedas interior y exterior se calcula con la Ecuación 8:

$$F_L = \frac{mV^2}{R} \quad (8)$$

donde F_L = es la fuerza lateral total de las dos ruedas, m = es la masa del tractor, V = es la velocidad de avance, R = es el radio de curvatura del camino.

Cuando las fuerzas laterales son pequeñas, es adecuado suponer que el vector velocidad de cada rueda está en dirección de la misma rueda. Aplicando el Teorema del Seno al triángulo OCA (Figura 5), para las ruedas delanteras y traseras se obtienen las Ecuaciones 9 y 10 , respectivamente:

$$\frac{\sin(\delta_f - \beta)}{l_f} = \frac{\sin(\pi/2 - \delta_f)}{R} \quad (9)$$

$$\frac{\sin(\beta - \delta_r)}{l_r} = \frac{\sin(\pi/2 - \delta_r)}{R} \quad (10)$$

Utilizando identidades trigonométricas se obtienen las Ecuaciones :

$$\frac{\sin \delta_f \cos \beta - \sin \beta \cos \delta_f}{l_f} = \frac{\cos \delta_f}{R} \quad (11)$$

$$\frac{\sin \beta \cos \delta_r - \sin \delta_r \cos \beta}{l_r} = \frac{\cos \delta_r}{R} \quad (12)$$

Multiplicando por $(l_f / \cos \delta_f)$ y (7) por $(l_r / \cos \delta_r)$, se obtienen las Ecuaciones 13 y 14, respectivamente:

$$\tan \delta_f \cos \beta - \sin \beta = \frac{l_f}{R} \quad (13)$$

$$\sin \beta - \tan \delta_r \cos \beta = \frac{l_r}{R} \quad (14)$$

Sumando (13) y (14) se obtiene la Ecuación 15:

$$\cos \beta (\tan \delta_f - \tan \delta_r) = \frac{L}{R} \quad (15)$$

Si se asume que el radio de la trayectoria cambia lentamente debido a la baja velocidad del tractor, entonces la tasa de cambio de la orientación del tractor es igual a la velocidad angular del tractor, la cual es V/R , y se calcula con la Ecuación 16:

$$\dot{\psi} = \frac{V}{R} \quad (16)$$

donde $\dot{\psi}$ = es la tasa de cambio de la orientación del tractor.

Substituyendo, se obtiene la tasa de cambio de la orientación del tractor en función de la geometría y la cinemática de giro, con la Ecuación 17:

$$\dot{\psi} = \frac{V \cos \beta}{L} (\tan \delta_f - \tan \delta_r) \quad (17)$$

El movimiento de las coordenadas inerciales del centro de gravedad del tractor se describe por las Ecuaciones 18y 19:

$$\dot{X} = V \cos(\psi + \beta) \quad (18)$$

$$\dot{Y} = V \sin(\psi + \beta) \quad (19)$$

donde $\dot{X}$ = es la coordenada inercial longitudinal del centro de gravedad, $\dot{Y}$ = es la coordenada inercial lateral del centro de gravedad, ψ = es el ángulo de orientación, β = es el ángulo de deslizamiento de la trayectoria del tractor.

En este modelo las variables de entrada son los ángulos de giro de las ruedas y la velocidad del tractor (δ_f, δ_r, V): La velocidad es una variable externa y es una función de la variación del tiempo que puede ser obtenido a partir de un modelo longitudinal del tractor.

El ángulo de deslizamiento de la trayectoria del tractor se calcula con la Ecuación

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{l_r \tan \delta_f + l_f \tan \delta_r}{L} \right) \quad (20)$$

2.3.2 Dinámica de la trayectoria

La trayectoria del tractor con un implemento agrícola es representada por un modelo de bicicleta, donde las dos primeras ruedas corresponden al tractor y la tercera rueda es el implemento. El modelo de la trayectoria del agregado agrícola es un modelo dinámico, porque además de la geometría considera los efectos de la fuerza de resistencia que opone implemento agrícola acoplado al tractor, y puede representar de forma precisa la dinámica del tractor con un implemento agrícola.

El diagrama general del modelo se muestra en la Figura 6, en la cual los vectores y ángulos presentan un signo positivo, y relaciona las fuerzas positivas con los ángulos de deslizamiento negativos. El diagrama representa un tractor con tracción en las cuatro ruedas (4x4) con un implemento acoplado en el enganche de la barra de tiro. El implemento es modelado como un eje de dos ruedas donde las condiciones en las ruedas izquierda y derecha, pueden ser diferentes.

El deslizamiento lateral que produce la aceleración lateral del tractor, se calcula con la Ecuación 21:

$$m \cdot V \cdot r \cdot \cos \beta \quad (21)$$

Las Ecuaciones 22 23 y 24 representan las ecuaciones dinámicas del movimiento del tractor, las cuales son derivadas a partir del diagrama general asumiendo que todas las fuerzas y momentos actúan en el tractor.

Para obtener las ecuaciones de movimiento es necesario recurrir a la segunda ley de Newton, de tal forma que con base en las fuerzas que caracterizan al conjunto agrícola, las cuales están expresadas en la figura 6, se deduce:

Suma de fuerzas en el eje X

$$\Sigma F_x = F_{Trl} + F_{Trr} - F_{xhl} - F_{xhr} + F_{Tfl} \cdot \cos \delta_l + F_{Tfr} \cdot \cos \delta_r = m\ddot{x} \quad (22)$$

Suma de fuerzas en el eje Y

$$\begin{aligned} \Sigma F_y &= m \cdot a_y = F_{yhl} + F_{yhr} + F_{yrl} + F_{yrr} + F_{Tfl} \cdot \sin \delta_l \\ &+ F_{Tfr} \cdot \sin \delta_r + F_{yfl} \cdot \cos \delta_l + F_{yfr} \cdot \cos \delta_r = m\dot{V}_y + m \cdot V \cdot r \cdot \cos \beta \end{aligned} \quad (23)$$

Suma de momentos en el CG

$$\begin{aligned} \Sigma M_{CG} &= a(F_{Tfl} \cdot \sin \delta_l + F_{Tfr} \cdot \sin \delta_r + F_{yfl} \cdot \cos \delta_l + F_{yfr} \cdot \cos \delta_r) \\ &+ \frac{t}{2}(F_{Tfl} \cos \delta_l - F_{Tfr} \cos \delta_r + F_{Trl} - F_{Trr} - F_{yfl} \sin \delta_l + F_{yfr} \sin \delta_r) \\ &- (b + c)(F_{yhl} + F_{yhr}) - b(F_{yrl} - F_{yrr}) - L_1(F_{xhl} - F_{xhr}) = I_z \cdot \dot{r} \end{aligned} \quad (24)$$

donde I_z = es el momento de masa de inercia del tractor e implemento.

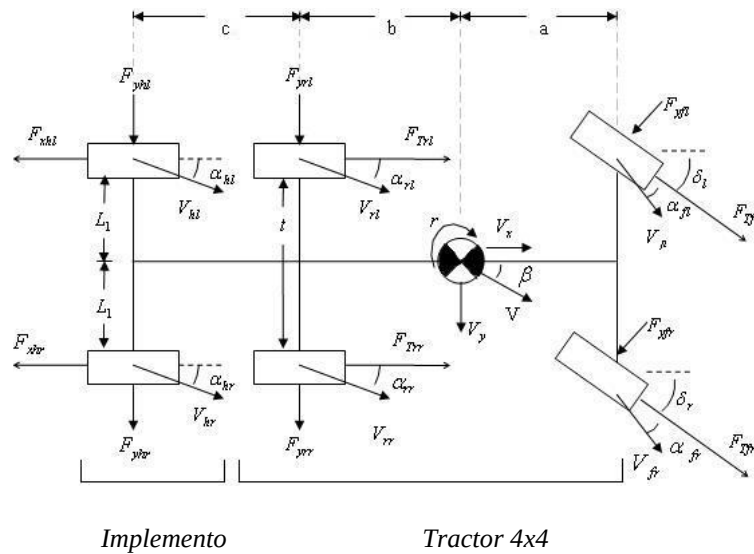


Figura 6. Diagrama general de un tractor 4x4.

El modelo de bicicleta es desarrollado con las siguientes simplificaciones: el ángulo de deslizamiento lateral de la rueda se define como el ángulo entre el eje longitudinal de la rueda y el vector de velocidad en la rueda. Sin embargo, los ángulos de deslizamiento de la rueda pueden ser calculados a partir de las velocidades longitudinal y lateral de la rueda como se muestra en las ecuaciones siguientes:

$$\alpha_{fl} = \tan^{-1} \left(\frac{V_y + a \cdot r}{V_x - 0.5 \cdot t \cdot r} \right) - \delta_l \quad (25)$$

$$\alpha_{fr} = \tan^{-1} \left(\frac{V_y + a \cdot r}{V_x + 0.5 \cdot t \cdot r} \right) - \delta_r \quad (26)$$

$$\alpha_{rl} = \tan^{-1} \left(\frac{V_y - b \cdot r}{V_x - 0.5 \cdot t \cdot r} \right) \quad (27)$$

$$\alpha_{rr} = \tan^{-1} \left(\frac{V_y - b \cdot r}{V_x + 0.5 \cdot t \cdot r} \right) \quad (28)$$

Cuadro 5. Parámetros del movimiento de un tractor 4x4

F_{yfl}, F_{yfr} = Fuerzas laterales de las ruedas delanteras izquierda y derecha,

F_{yrl}, F_{yrr} = Fuerzas laterales de las ruedas traseras,

F_{yhl}, F_{yhr} = Fuerzas laterales del implemento,

F_{Tfl}, F_{Tfr} = Fuerzas de tracción de las ruedas delanteras,

F_{Trl}, F_{Trr} = Fuerzas de tracción de las ruedas traseras,

F_{xhl}, F_{xhr} = Fuerzas de resistencia de tracción del implemento,

δ_l, δ_r = Ángulos de la dirección,

α_{fl}, α_{fr} = Ángulos de deslizamiento de las ruedas delanteras,

α_{rl}, α_{rr} = Ángulos de deslizamiento de las ruedas traseras,

α_{hl}, α_{hr} = Ángulos de deslizamiento del implemento enganchado,

V_{fl}, V_{fr} = Velocidades de las ruedas delanteras,

V_{rl}, V_{rr} = Velocidades de las ruedas traseras,

V_{hl}, V_{hr} = Velocidades del punto de enganche,

V = Velocidad del tractor,

V_x = Velocidad longitudinal del tractor,

V_y = Velocidad lateral del tractor,

β = Ángulo de deslizamiento lateral del tractor,

r = Tasa de cambio del ángulo de orientación,

a, b = Distancias del centro de gravedad a las ruedas delanteras y traseras,

c = Distancia del punto de enganche a las ruedas traseras,

t = Distancia entre las ruedas traseras del tractor,

L_1 = Distancia entre las ruedas del implemento.

$$\alpha_{hl} = \tan^{-1} \left(\frac{V_y - (b + c) \cdot r}{V_x - 0.5 \cdot t \cdot r} \right) \quad (29)$$

$$\alpha_{hr} = \tan^{-1} \left(\frac{V_y - (b + c) \cdot r}{V_x + 0.5 \cdot t \cdot r} \right) \quad (30)$$

Si ($V_x \gg 0.5 \cdot t \cdot r$) y se asume que los ángulos de dirección de las ruedas izquierda y derecha son iguales ($\delta_l = \delta_r$), entonces se transforman en las Ecuaciones 31-33:

$$\alpha_{fl} \approx \alpha_{fr} = \alpha_f = \tan^{-1} \left(\frac{V_y + a \cdot r}{V_x} \right) - \delta \quad (31)$$

$$\alpha_{rl} \approx \alpha_{rr} = \alpha_r = \tan^{-1} \left(\frac{V_y - b \cdot r}{V_x} \right) \quad (32)$$

$$\alpha_{hl} \approx \alpha_{hr} = \alpha_h = \tan^{-1} \left(\frac{V_y - (b + c) \cdot r}{V_x} \right) \quad (33)$$

Si se asume que el ángulo de deslizamiento lateral del tractor es pequeño ($\beta \approx 0$), entonces:

$$\alpha_f = \frac{V_y + a \cdot r}{V_x} - \delta \quad (34)$$

$$\alpha_r = \frac{V_y - b \cdot r}{V_x} \quad (35)$$

$$\alpha_h = \frac{V_y - (b + c) \cdot r}{V_x} \quad (36)$$

Asumiendo que las ruedas izquierdas y derechas del tractor son del mismo tamaño y no hay transferencia de peso de las ruedas izquierdas a las ruedas derechas, entonces las fuerzas laterales por rueda se calculan como sigue:

$$F_{yfl} \approx F_{yfr} = F_{yf_rueda} \quad (37)$$

$$F_{yrl} \approx F_{yrr} = F_{yr_rueda} \quad (38)$$

Las fuerzas laterales por eje se calculan como sigue:

$$F_{yf} = 2 \cdot F_{yf_rueda} \quad (39)$$

$$F_{yr} = 2 \cdot F_{yr_rueda} \quad (40)$$

Asumiendo que las fuerzas de tracción de las ruedas izquierdas y derechas del tractor son iguales, entonces las fuerzas de tracción por rueda se calculan como sigue:

$$F_{Tfl} \approx F_{Tfr} = F_{Tf_rueda} \quad (41)$$

$$F_{Trl} \approx F_{Trr} = F_{Tr_rueda} \quad (42)$$

Las fuerzas de tracción por eje se calculan como sigue:

$$F_{Tf} = 2 \cdot F_{Tf_rueda} \quad (43)$$

$$F_{Tr} = 2 \cdot F_{Tr_rueda} \quad (44)$$

Si las fuerzas de resistencia de tracción en las ruedas izquierdas y derechas del implemento son iguales, las fuerzas de resistencia de tracción por rueda se calculan como sigue:

$$F_{xhl} \approx F_{xhr} = F_{xh_rueda} \quad (45)$$

Esto permite que no se genere ningún momento por la diferencia en las fuerzas de resistencia de tracción en las ruedas del implemento, como se muestra en la Ecuación 46:

$$M_h = F_{xhl} \cdot L_1 - F_{xhr} \cdot L_1 \quad (46)$$

La fuerza total de resistencia de tracción del implemento es definida por la Ecuación 47:

$$F_{xh} = 2 \cdot F_{xh_rueda} \quad (47)$$

Se asume que las fuerzas de resistencia laterales en las ruedas izquierdas y derechas del implemento son iguales, entonces las fuerzas de resistencia laterales por rueda del implemento se calculan como sigue:

$$F_{yhl} \approx F_{yhr} = F_{yh_rueda} \quad (48)$$

La fuerza total de resistencia lateral del implemento, se calcula con la Ecuación 49:

$$F_{yh} = 2 \cdot F_{yh_rueda} \quad (49)$$

La masa del tractor y la ubicación del centro de gravedad se asumen constantes. Como no se considera el momento en el eje del implemento en la modelación del ángulo de orientación, ni se realiza la modelación del movimiento longitudinal, entonces la suma de las fuerzas en el eje longitudinal no es excedida y tampoco se considera.

El modelo de bicicleta de 3 ruedas que considera los efectos de tracción de las ruedas delanteras y traseras, puede ser representado por la Figura 7.

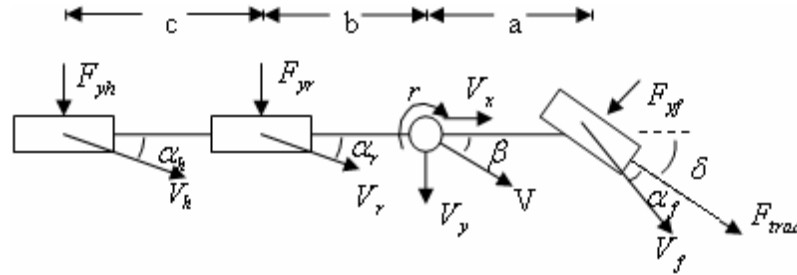


Figura 7. Modelo de bicicleta de 3 ruedas

Sin embargo, si no son tomadas en cuenta las fuerzas de tracción de las ruedas delanteras y traseras, entonces el diagrama de cuerpo libre del modelo de bicicleta de 3 ruedas puede ser representado por la Figura 3.3.

Cuadro 6. Parámetros específicos del modelo de bicicleta

α_h = Ángulo de deslizamiento lateral de la rueda del implemento,

F_{yf} = Fuerza lateral en la rueda delantera,

F_{yr} = Fuerza lateral en la rueda trasera,

F_{yh} = Fuerza lateral en la rueda del implemento,

$C_{\alpha f}$ = Rigidez de curvatura en la rueda delantera, por eje

$C_{\alpha r}$ = Rigidez de curvatura en la rueda trasera, por eje

$C_{\alpha h}$ = Rigidez al dar la vuelta en la rueda del implemento,

α_f = Ángulo de deslizamiento lateral de la rueda delantera,

α_r = Ángulo de deslizamiento lateral de la rueda trasera,

δ = Ángulo de la dirección,

V_f = Velocidad de las ruedas delanteras,

V_r = Velocidad de las ruedas traseras.

Al sumar las fuerzas en los ejes lateral y vertical del tractor, se obtienen las Ecuaciones siguientes:

$$\Sigma F_y = m \cdot a_y = F_{yf} \cdot \cos \delta + F_{yr} + F_{yh} = m\dot{V}_y + m \cdot V \cdot r \cdot \cos \beta \quad (50)$$

$$\Sigma M_{CG} = F_{yf} \cdot \cos \delta (a) - F_{yr}(b) - F_{yh}(b + c) = I_z \cdot \dot{r} \quad (51)$$

Asumiendo valores pequeños del ángulo de deslizamiento lateral del tractor ($\beta \approx 0$), el coseno de este ángulo tiende a la unidad ($\cos \beta \approx 1$), por lo cual las ecuaciones 50 y 51 se transforman en las Ecuaciones 52-53.

$$m\dot{V}_y + m \cdot V \cdot r = m \cdot a_y = F_{yf} + F_{yr} + F_{yh} \quad (52)$$

$$I_z \cdot \dot{r} = F_{yf}(a) - F_{yr}(b) - F_{yh}(b + c) \quad (53)$$

Las Ecuaciones 54-56 representan las fuerzas en las ruedas y son derivadas del modelo lineal de la rueda.

$$F_{yf} = -C_{af} \cdot \alpha_f \quad (54)$$

$$F_{yr} = -C_{ar} \cdot \alpha_r \quad (55)$$

$$F_{yh} = -C_{ah} \cdot \alpha_h \quad (56)$$

donde

$$C_{af} = 2 \cdot C_{af_rueda} \quad (57)$$

$$C_{ar} = 2 \cdot C_{ar_rueda} \quad (58)$$

Substituyendo se obtienen las Ecuaciones :

$$m\dot{V}_y + m \cdot V \cdot r = -C_{af} \cdot \alpha_f - C_{ar} \cdot \alpha_r - C_{ah} \cdot \alpha_h \quad (59)$$

$$I_z \cdot \dot{r} = -C_{af} \cdot \alpha_f(a) + C_{ar} \cdot \alpha_r(b) + C_{ah} \cdot \alpha_h(b + c) \quad (60)$$

Para valores pequeños del ángulo de deslizamiento lateral del tractor ($\beta \approx 0$), se asume que la velocidad longitudinal del tractor tiende a la velocidad del tractor ($V_x \approx V$),

substituyendo y organizando las ecuaciones resultantes en la forma de espacio de estados del modelo de bicicleta de 3 ruedas, se obtiene la Ecuación 61.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-C_{\alpha f} - C_{\alpha r} - C_{\alpha h}}{m \cdot V} & \frac{-C_{\alpha f}(a) + C_{\alpha r}(b) + C_{\alpha h}(b + c)}{m \cdot V} \\ \frac{-C_{\alpha f}(a) + C_{\alpha r}(b) + C_{\alpha h}(b + c)}{I_z \cdot V} & \frac{-C_{\alpha f}(a^2) - C_{\alpha r}(b^2) - C_{\alpha h}(b + c)^2}{I_z \cdot V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_{\alpha f}}{m} \\ \frac{C_{\alpha f} \cdot a}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (61)$$

Este modelo de espacio de estados puede ser transformado usando transformación de Laplace para obtener la función de transferencia dada en la Ecuación 62. Esta función de transferencia tiene como entrada el ángulo de la dirección y como salida la tasa de cambio del ángulo de orientación.

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{C_{\alpha f} \cdot a \cdot s + \frac{C_{\alpha f}(C_1 + a \cdot C_2)}{mV}}{I_z \cdot s^2 + \left[\frac{C_2 \cdot I_z}{mV} + \frac{C_3}{V} \right] s + \left[\frac{C_2 \cdot C_3 - (C_1)^2}{mV^2} + C_1 \right]} \quad (62)$$

donde

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -C_{\alpha f}(a) + C_{\alpha r}(b) + C_{\alpha h}(b + c) \\ C_2 &= C_{\alpha f} + C_{\alpha r} + C_{\alpha h} \\ C_3 &= C_{\alpha f}(a^2) + C_{\alpha r}(b^2) + C_{\alpha h}(b + c)^2 \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

Con base en la información anteriormente descrita, es posible realizar el modelado y la simulación del conjunto agrícola.

4.- MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Material y equipo

El material utilizado en la calibración del equipo de medición y en la realización de las pruebas de campo, se presenta a continuación:

- Tactor Masey Fergusson 592 Turbo
- Equipo EZ-Steer® (Figura 8)
- Parcela de 120x120 m (1.44 ha).
- Cinta métrica, cal, cronómetro.
- Caja de herramienta.



a) Motor eléctrico.



b) Controlador compensador T2 automático.



c) Pantalla EZ guide 250



d) Antena.

Figura 8. Componente del Equipo EZ-Steer®.

4.1.1. Características del tractor

De manera general se puede describir el tractor empleado en el presente estudio como un tractor moderno con motor ecológico TIER II 1104C-44T, versión 4WD, cubriendo los requerimientos de tracción dentro de este rango de potencia. Tractor turbocargado. Su tanque de combustible tiene una capacidad de 100 L, posee también, un tablero de análogo/digital. Con transmisión de uso rudo (HD) con 12 velocidades al frente y 4 de reversa, pudiendo utilizar este equipo en la mayoría de labores, tanto de preparación como de cultivo. Su sistema de dirección es tipo hidrostática balanceada, con bomba de engranes. Sistema eléctrico de 12 volts y alternador de 55 amperes.

4.1.1.1 Potencia del tractor.

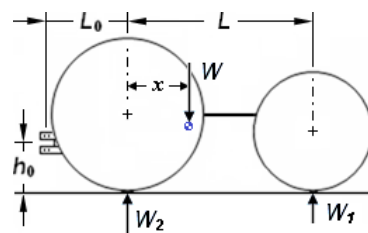
El tractor Massey Ferguson 592 Turbo tiene una potencia a la toma de fuerza de 68.4 kW (91.7 hp).

4.1.1.2. Distribución del peso del tractor.

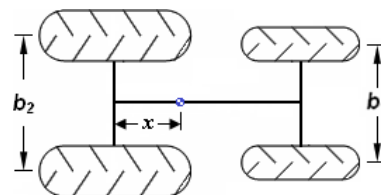
El tractor fue pesado con 6 contrapesos de 35 kg al frente y 4 contrapesos de 50 kg en las ruedas traseras, y la distribución del peso se muestra en el Cuadro 7 (Figura 9).

Cuadro 7. Distribución del peso del tractor utilizado.

	Parámetro	Peso (kN)	Distribución (%)
W	Peso del tractor	47.8	100
W_1	Carga vertical en las ruedas delanteras	17.0	35.5
W_2	Carga vertical en las ruedas traseras	30.8	64.5



a) Vista lateral.



B) Vista superior.

Figura 9. Distribución del peso y distancias del tractor

4.1.1.3 Distancias del tractor.

Fueron medidas en el tractor las distancias horizontales entre los centros de las ruedas y la distancia vertical del punto de enganche de la barra de tiro al suelo (Figura 9, Cuadro 8).

Cuadro 8. Distancias horizontales y verticales del tractor utilizado.

	Distancia	Medición (m)
L	entre los ejes delantero y trasero	2.50
b_1	entre las ruedas delanteras	1.83
b_2	entre las ruedas traseras	1.73
L_0	del eje trasero al enganche de la barra de tiro	0.75
h_0	del enganche de la barra de tiro al suelo	0.43

4.1.1.4 Centro de gravedad del tractor.

La coordenada longitudinal del centro de gravedad del tractor (Figura 9, Cuadro 9), fue calculada como se menciona en el cuadro 9

Cuadro 9. Coordenada longitudinal del centro de gravedad del tractor.

	Distancia	Medición (m)
$x = L \left(\frac{W_1}{W} \right)$	del centro de gravedad al eje trasero	0.8872

4.1.2. Características del Sistema de Guiado

El sistema de guiado para las pruebas de campo estuvo compuesto por una pantalla, controlador, antena, alimentador y motor eléctrico (Figura 10).



Figura 10. Componentes del sistema de guiado EZ-Guide 250

4.1.2.1 Pantalla.

Marca Trimble® a color de 11 cm con barra de luces, puerto USB y receptor GPS integrado. Funciona como interfaz entre el usuario y el sistema de guiado, por medio de este se configuran los principales elementos del sistema y del conjunto agrícola.

4.1.2.2 Antena.

Marca Trimble® de bajo perfil y precisión de 15-20 cm, soporta corrección con los sistemas: EGNOS (Europa), WAAS (Estados Unidos) y MSAS (Japón). El sistema de guiado incluye generalmente una antena mediante el sistema WASS, sin embargo, para

la realización de esta investigación también se empleó una antena receptor AGGPs 252 Trimble® que permite obtener señal de corrección Omnistar XP®.

4.1.2.3 Controlador compensador.

Marca Trimble® T2, con este sistema se regulan las funciones del sistema de guiado, y junto con la pantalla nos permite configurar y controlar los actuadores. Funciona como compensador para evitar los traslapes que se originan por la geografía del terreno.

4.1.2.4 Motor eléctrico.

Marca Trimble®, es el elemento que controla el tractor y va montado a un costado del volante, (figura 11) de tal forma que permite hacer contacto directo con este.



Figura 11. Ubicación del motor eléctrico

La Figura 12 muestra la instalación de los elementos del sistema de guiado EZ-Steer 250 en el tractor utilizado para realizar las diferentes evaluaciones en campo.



a) controlador-compensador.



b) Monitor de control y pantalla.



c) Motor eléctrico fijado en el volante.



d) Base del motor eléctrico.



e) Vista lateral del motor eléctrico.



f) calibración del sistema de guiado.

Figura 12. Sistema de guiado montado en el tractor

4.2. Metodología

4.2.1 Modelación del conjunto agrícola

Consideremos el esquema mostrado en la figura 13 el cual muestra los parámetros principales que se emplearán para el modelado y simulación en el software

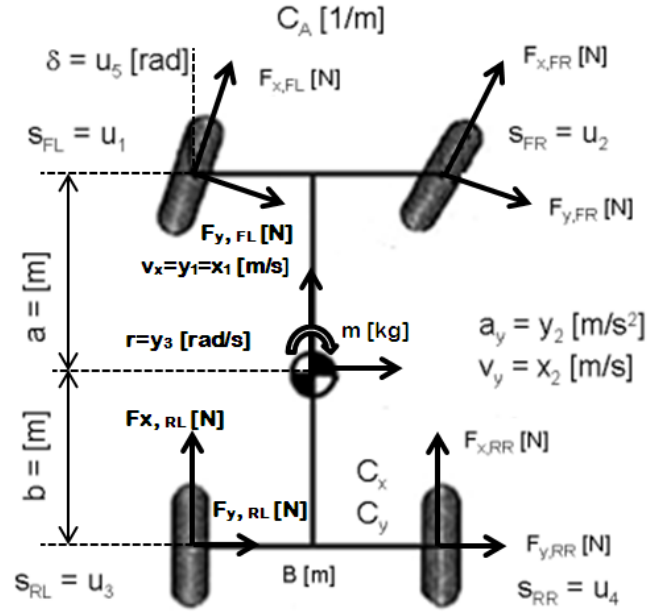


Figura 13. Modelo del conjunto agrícola

Con base en las leyes de Newton de movimiento y algunas relaciones geométricas, la velocidad longitudinal $v_x(t)$, la velocidad lateral $v_y(t)$ y el rango Yaw $r(t)$, medidos alrededor del centro de gravedad del tractor, se puede describir por medio de las siguientes ecuaciones diferenciales.

$$\begin{aligned} \left(\frac{d}{dt}\right) v_x(t) = & v_y(t) * r(t) + \frac{1}{m} * ((F_{x,FL}(t) + F_{x,FR}(t)) * \cos(\delta(t)) - (F_{y,FL}(t) \\ & + F_{y,FR}(t)) * \sin(\delta(t)) + F_{x,RL}(t) + F_{x,RR}(t) - C_A * v_x(t)^2) \end{aligned} \quad (64)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{d}{dt}\right) v_y(t) = & -v_x(t) * r(t) + \frac{1}{m} * ((F_x, FL(t) + F_x, FR(t)) * \sin(\delta(t)) \\ & + (F_y, FL(t) + F_y, FR(t)) * \cos(\delta(t)) + F_y, RL(t) + F_y, RR(t)) \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{d}{dt}\right) r(t) = & \frac{1}{J} * (a * ((F_x, FL(t) + F_x, FR(t)) * \sin(\delta(t)) + (F_y, FL(t) + F_y, FR(t)) \\ & * \cos(\delta(t))) - b * (F_y, RL(t) + F_y, RR(t)) \end{aligned} \quad (66)$$

Donde el subíndice x denota la fuerza F que actúa de manera longitudinal y el subíndice y en dirección lateral. F_L , F_R , R_L y R_R denotan las posiciones de las ruedas frontal izquierda, frontal derecha, trasera izquierda y trasera derecha respectivamente. La primera ecuación denota la aceleración longitudinal y contiene la resistencia al aire y se asumen que es una ecuación cuadrática de la velocidad longitudinal $v_x(t)$. El termino $\delta(t)$ considerado como una variable de entrada es el ángulo de direccionamiento, J es el momento de inercia y a , b , denotan las distancias del centro de gravedad al eje delantero y trasero respectivamente. Se asume que las fuerzas en las ruedas pueden ser modeladas a través de las siguientes aproximaciones lineales

$$\begin{aligned} F_{x,i}(t) &= C_x * s_i(t) \\ F_{y,i}(t) &= C_y * \alpha_i(t) \\ i &= \{FL, FR, RL, RR\} \end{aligned} \quad (67)$$

Donde C_x y C_y denotan la rigidez longitudinal y lateral de las ruedas respectivamente. Se asumen que la rigidez son las mismas para las cuatro ruedas, $s_i(t)$ es el deslizamiento longitudinal de la rueda i $\alpha_i(t)$ es el ángulo de deslizamiento de la rueda. Cuando únicamente las ruedas delanteras son direccionales los deslizamientos $s_{FL}(t)$ y $s_{FR}(t)$ son derivados de forma individual para cada rueda y se asume que $s_{RL}(t) = s_{RR}(t) = 0$. Por tanto, los deslizamientos son parámetros de entrada en la estructura de nuestro modelo. Para las ruedas frontales los ángulos de deslizamiento $\alpha_{Fj}(t)$ son iguales cuando $v_x(t) > 0$

$$\begin{aligned}\alpha_{Fj}(t) &= \delta(t) - \tan^{-1}((v_y(t) + a * r(t))/v_x(t)) \\ \alpha_{Fj}(t) &\sim \delta(t) - (v_y(t) + a * r(t))/v_x(t) \\ \text{Para } j &= \{L, R\}\end{aligned}\tag{68}$$

Para las ruedas traseras, los ángulos de deslizamiento $\alpha_{Rj}(t)$ son derivados de manera semejante al anterior:

$$\begin{aligned}\alpha_{Rj}(t) &= -\tan^{-1}((v_y(t) - b * r(t))/v_x(t)) \\ \alpha_{Rj}(t) &\sim -(v_y(t) - b * r(t))/v_x(t) \\ \text{para } j &= \{L, R\}\end{aligned}\tag{69}$$

Considerando $J = 1/((0.5 * (a + b))^2 * m)$ se puede configurar la estructura de modelo de espacio-estado describiendo la dinámica del vehículo. Se introducen los estados:

$$\begin{aligned} x1(t) &= v_x(t) && \text{Velocidad longitudinal [m/s]} \\ x2(t) &= v_y(t) && \text{Velocidad lateral [m/s]} \\ x3(t) &= r(t) && \text{Rango Yaw [rad/s]} \end{aligned} \quad (70)$$

Las cinco señales de entrada medidos o derivados son

$$\begin{aligned} u1(t) &= s_{FL}(t) && \text{deslizamiento de rueda del izq [razon].} \\ u2(t) &= s_{FR}(t) && \text{deslizamiento de rueda del der [razon].} \\ u3(t) &= s_{RL}(t) && \text{deslizamiento de rueda tras izq [razon].} \\ u4(t) &= s_{RR}(t) && \text{deslizamiento de rueda tras der [razon].} \\ u5(t) &= \delta(t) && \text{Steering angle [rad].} \end{aligned} \quad (71)$$

Y los parámetros del modelo:

$$\begin{aligned} m & \quad \text{Masa [kg].} \\ a & \quad \text{Distancia del eje del al CG [m].} \\ b & \quad \text{Distancia del eje tras al CG [m].} \\ Cx & \quad \text{Rigidez rueda longitudinal [N].} \\ Cy & \quad \text{Rigidez rueda lateral [N/rad].} \\ CA & \quad \text{Coeficiente de Resistencia al aire [1/m].} \end{aligned}$$

Las salidas del sistema son la velocidad longitudinal $y1(t) = x1(t)$, la aceleración lateral $y2(t)$ y el rango Yaw $y3(t) = r(t)$

$$\begin{aligned} y2(t) = a_{y(t)} &= 1/m * ((F_{x,FL}(t) + F_{x,FR}(t)) * \cos(\delta(t)) - (F_{y,FL}(t) \\ &+ F_{y,FR}(t)) * \sin(\delta(t)) + F_{x,RL}(t) + F_{x,RR}(t)) \end{aligned}$$

(72)

Las siguientes ecuaciones representan la estructura del espacio-estado:

$$\begin{aligned} (d/dt) x_1(t) &= x_2(t) * x_3(t) + 1/m * (Cx * (u_1(t) + u_2(t)) * \cos(u_5(t)) - 2 \\ &* Cy * (u_5(t) - (x_2(t) + a * x_3(t))/x_1(t)) * \sin(u_5(t)) + Cx \\ &* (u_3(t) + u_4(t)) - CA * x_1(t)^2 \end{aligned}$$

(73)

$$\begin{aligned} (d/dt) x_2(t) &= -x_1(t) * x_3(t) + 1/m * (Cx * (u_1(t) + u_2(t)) * \sin(u_5(t)) + \\ &2 * Cy * (u_5(t) - (x_2(t) + a * x_3(t))/x_1(t)) * \cos(u_5(t)) + 2 * Cy * (b * \\ &x_3(t) - x_2(t))/x_1(t) \end{aligned}$$

(74)

$$\begin{aligned} (d/dt) x_3(t) &= 1/((0.5 * (a + b))^2 * m) * (a * (Cx * (u_1(t) + u_2(t)) \\ &* \sin(u_5(t)) + 2 * Cy * (u_5(t) - (x_2(t) + a * x_3(t))/x_1(t)) \\ &* \cos(u_5(t))) - 2 * b * Cy * (b * x_3(t) - x_2(t))/x_1(t) \end{aligned}$$

(75)

$$\begin{aligned} y_1(t) &= x_1(t) \\ y_2(t) &= 1/m * (Cx * (u_1(t) + u_2(t)) * \sin(u_5(t)) + 2 * Cy * (u_5(t) - (x_2(t) \\ &+ a * x_3(t))/x_1(t)) * \cos(u_5(t)) + 2 * Cy * (b * x_3(t) \\ &- x_2(t))/x_1(t) \\ y_3(t) &= x_3(t) \end{aligned}$$

(76)

Dichas ecuaciones representan el comportamiento dinámico del sistema modelado.

4.2.2 Diseño experimental

El diseño empleado para el análisis de los datos fue un arreglo factorial $3 \times 2 \times 2 \times 2$, donde los factores estudiados fueron la velocidad de avance ($V_1 = 5$, $V_2 = 7$, $V_3 = 9$ km h^{-1}), corrección diferencial activada (A) y desactivada (D), trayectoria lineal (l) y en pivote central (p), tipo de guiado Ez-Steer 250[®] (Ez) y barra de luces (Bl). Se trabajó un total de 24 tratamientos (Cuadro 11) con 3 repeticiones, los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente con el programa SAS versión 6.12. También se realizaron pruebas de Tukey con $\alpha = 0.05$.

Considerando los factores de velocidad, tipo de corrección, trayectoria y sistema de guiado con sus diferentes niveles (cuadro 10), se evaluaron 24 tratamientos como se muestra en el cuadro 11.

Cuadro 10. Factores y niveles de los tratamientos.

Niveles	Factores			
	Velocidad (km h^{-1})	Corrección	Trayectoria	Tipo de guiado
1	5 (V1)	Activada (A)	Lineal (l)	EZ-Steer (Ez)
2	7 (V2)	Desactivada (D)	Pivote (p)	Barra de luces (Bl)
3	9 (V3)	---	---	---

Cuadro 11. Conformación de los 24 tratamientos.

Velocidad 1 (5 km h ⁻¹)		Velocidad 2 (7 km h ⁻¹)		Velocidad 3 (9 km h ⁻¹)	
Tratamiento	Niveles	Tratamiento	Niveles	Tratamiento	Niveles
T1	A-l-Ez	T9	A-l-Ez	T17	A-l-Ez
T2	A-l-Bl	T10	A-l-Bl	T18	A-l-Bl
T3	A-p-Ez	T11	A-p-Ez	T19	A-p-Ez
T4	A-p-Bl	T12	A-p-Bl	T20	A-p-Bl
T5	D-l-Ez	T13	D-l-Ez	T21	D-l-Ez
T6	D-l-Bl	T14	D-l-Bl	T22	D-l-Bl
T7	D-p-Ez	T15	D-p-Ez	T23	D-p-Ez
T8	D-p-Bl	T16	D-p-Bl	T24	D-p-Bl

A = corrección activada

B = corrección desactivada

l = trayectoria lineal

p = trayectoria en pivote

Ez = guiado EZ-Steer[®]

Bl = guiado con barra de luces

Se instaló el sistema de guiado en el tractor, se calibró y se realizaron pruebas preliminares. Se trazó una línea definida AB con ayuda del sistema de corrección y se midió el error de la trayectoria seguida respecto al centro de gravedad configurado en el sistema de medición.

Se realizaron tres recorridos por cada tratamiento y se descargó la información de las trayectorias por medio del enlace del sistema con la computadora. Una vez realizado este proceso se analizaron estadísticamente los errores obtenidos

4.2.2.1 Lugar del experimento

Se realizaron pruebas del sistema de guiado en el campo experimental “Las Texas” del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA) de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado en las coordenadas $19^{\circ} 49' N$ y $98^{\circ} 89' W$, a 2250 msnm (Figura 14). Las pruebas se realizaron el 17 de Noviembre a partir de las 12:30 h, con una media de 6 satélites, rango de giro vertical de 0.45° y un tiempo de corrección de 2s.



Figura 14. Ubicación de lugar del experimento.

4.2.2.2 Calibración del sistema de guiado

Durante la calibración del sistema de guiado se requiere ingresar los parámetros del tractor utilizado, los cuales son la distancia entre las ruedas delanteras y traseras, las posiciones de la antena, de las ruedas y del controlador, mismas que se pueden apreciar en la figura 15.

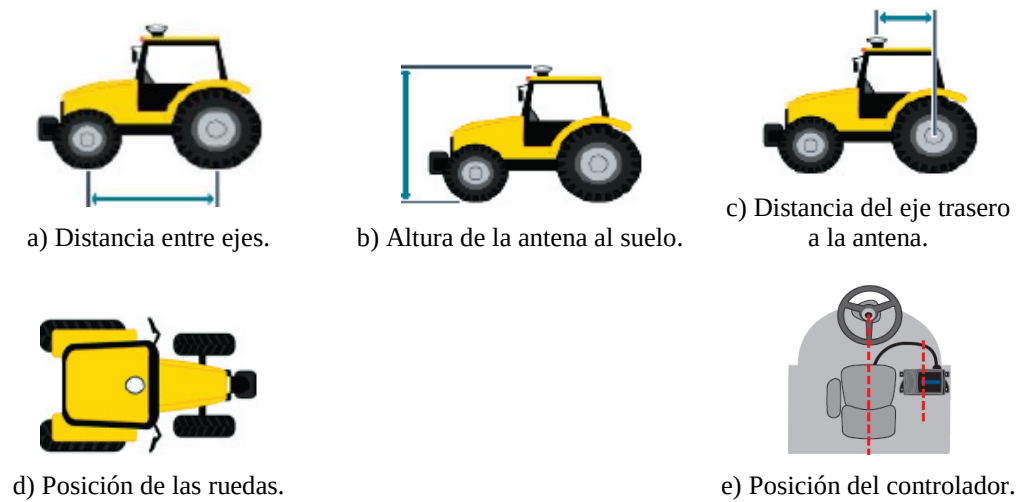


Figura 15. Características para la calibración del sistema de guiado.

4.2.2.3. Configuración de la agresividad del motor instalado en el volante

Se determinó el valor de agresividad del sistema de guiado para que el tractor permanezca en línea recta. La Figura 16 muestra los tipos niveles de agresividad que presentó el sistema. Si el valor es muy bajo, el tractor no permanecerá en línea recta, pero si el valor es muy alto, el tractor hará sobre correcciones y giros de tipo S.

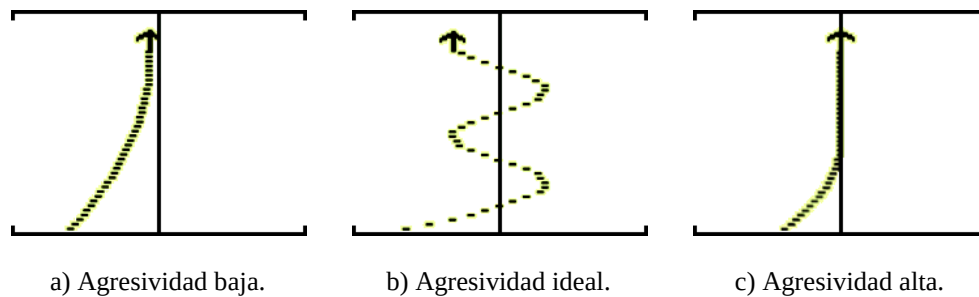


Figura 16. Configuración de la agresividad del sistema de guiado.

4.2.2.4 Activación y desactivación del sistema de guiado

El tractor se acopla al sistema de guiado cuando existe una línea recta AB previamente definida, y se desactiva cuando se realiza una pausa, cuando se esté fuera

de los límites configurados o cuando no alcance la precisión configurada. Una vez que el sistema fue configurado, la pantalla indicó las características del trabajo que se estuvo realizando (Figura 17).



Figura 17. Indicador de acoplamiento y desacoplamiento del tractor

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Simulación de las principales características del tractor

Derivado de la modelación realizada anteriormente, mediante el uso del programa Matlab ® versión gratuita R 2011 se obtuvieron los siguientes gráficos que los representan: Los siguientes parámetros fueron los utilizados para la simulación del modelo

p_1	Masa del vehículo [kg]	4782.00
p_2	distancia del eje delantero al CG [m]	1.62
p_3	distancia del eje trasero al CG [m]	0.88

p ₄	Rigidez longitudinal de la rueda [N]	150000.00
p ₅	Rigidez lateral de la rueda [N/rad]	40000
p ₆	Coefficiente de Resistencia al aire [1/m]	1

El grafico 18 muestra la salida del sistema simulado. El modelo utilizado y simulado que se ilustra, reporta una media del error de 0.087 y una Desviación estándar de 0.18

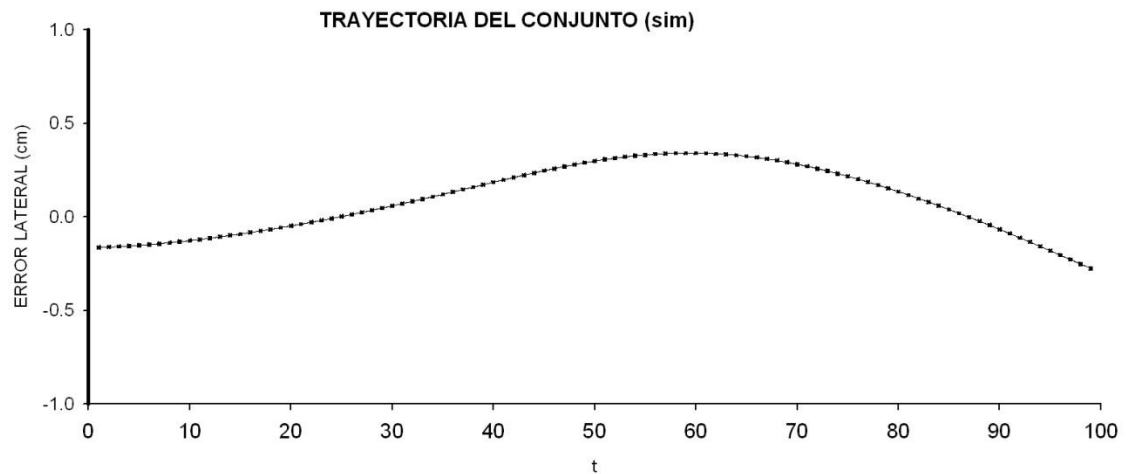


Figura 18. Trayectoria del conjunto agrícola simulado

Con la utilización de los parámetros referidos se obtuvo la curva que se ilustra en la figura 18, cabe mencionar que dicho comportamiento es ideal que puede contrastarse con las trayectorias obtenidas en campo.

5.2 Análisis estadístico de las trayectorias en campo

Se muestra la trayectoria realizada por el tractor agrícola a través de 120 m de distancia en línea recta AB (tratamiento testigo T_0), establecida al inicio del experimento como referencia. La desviación que se presentó en el ensayo correspondió al desplazamiento del tractor hacia un lado o hacia el otro de la línea establecida, la cual fue identificada como positiva hacia el oeste y negativa hacia el este. En todos los tratamientos se inició la medición de datos después de 10 m de iniciada la labor, para garantizar el geo-posicionamiento el tractor agrícola y encontrar la trayectoria propuesta, por tal motivo la mayoría de las trayectorias no iniciaron en el origen.

La Figura 19 muestra las desviaciones o errores promedio en los 24 tratamientos estudiados, se observa que los tratamientos T_1 - T_4 cuyas medias oscilan entre 2.20 y 7.85 cm, según el Análisis de Varianza con un $\alpha = 0.05$, no existen diferencia significativas. Estos tratamientos se caracterizan por tener señal de corrección diferencial para los dos tipos de trayectorias y ambos sistemas de guiado. Esto no representa alguna diferencia que permita elegir entre un tratamiento u otro, sin embargo, aun cuando la media de la desviación del tratamiento T_1 es 2.20 cm, en algunos momentos se alcanza la precisión de 0 cm. Esto coincide con Benson *et al.*, (1998) quienes obtuvieron errores menores a 1 cm a velocidades de avance de 4 km h⁻¹.

Aun cuando no existen diferencias estadísticas, el tratamiento T_3 con una desviación media de 7.85 cm es el de mayor valor del error con relación al grupo. Este tratamiento corresponde a una combinación de trayectoria en pivote con motor eléctrico accionando el volante, cuyo resultado coincide con Qiu *et al.*, (1999), quienes mencionan que los

sistemas de guiado automático con actuadores basados en partes mecánicas son efectivos a velocidades de 10 km h^{-1} , este estudio fue aplicado en cultivos de maíz.

Con respecto a los tratamientos T_5 - T_8 cuyas medias de error en la trayectoria oscilan de 21.74 a 23.05 cm, no existen diferencias significativas, pero si presentan diferencias significativas si son comparados diferenciados con los primeros 4 tratamientos. Estos tienen como característica que la señal de posición no usa la corrección diferencial, como si sucede en el primer bloque de tratamientos. Durante la prueba, se empleó una antena la cual no realiza corrección de la posición del tractor, por esta razón estos tratamientos tuvieron valores superiores y coinciden con lo reportado por Stombaugh *et al.*, (1998) quienes obtuvieron errores laterales de 4.5 a 16 cm al buscar la mejor posición de la antena receptora.

Los tratamientos T_1 - T_8 se realizaron con velocidad de trabajo de 5 km h^{-1} encontrando diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos que tienen corrección diferencial y los que no la tienen, sin importar la variación en el tipo de sistema de guiado empleado. La media de error para estos tratamientos es de 13.61 cm, valor que se encuentra dentro de lo reportado por Noguchi *et al.*, (1998) quienes integraron una combinación de sensores con cámaras de video. La cámara escanea los obstáculos, el sistema de Geo-posicionamiento obtiene la posición exacta del tractor en campo al mismo tiempo que un sensor obtiene el movimiento del tractor y calcula la trayectoria realizada, en tanto que el sistema de guiado controla la dirección mediante la orden de la computadora. El error máximo obtenido fue de 8.4 cm.

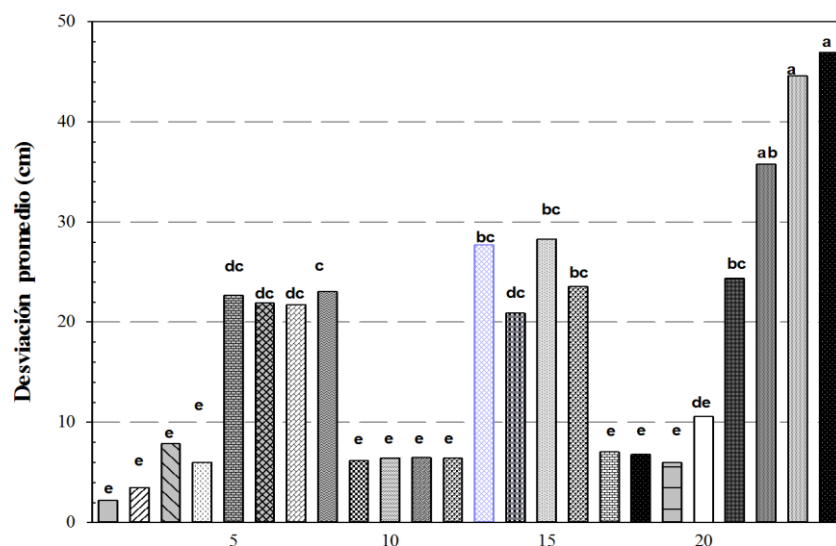


Figura 19. Desviación promedio de la trayectoria

Por otra parte, de los tratamientos T₉-T₁₂, cuya principal variación entre estos es la velocidad (5 y 7 km h⁻¹, respectivamente), la corrección diferencial y el tipo de sistema de guiado empleado. El error máximo observado en la trayectoria es de 15.74 cm, donde no existen diferencias significativas con respecto a la velocidad, es decir, el operador puede elegir cualquier rango de 5 a 7 km h⁻¹ sin que la trayectoria reporte errores considerables.

Las medias de las desviaciones para estos tratamientos van del rango de 6.18 a 6.47 cm, y se observa de acuerdo a la significancia estadística, que cualquier combinación en trayectoria y sistema de guiado a seguir no influye, siempre y cuando se realice la corrección diferencial. Estos promedios de las desviaciones coinciden con los obtenidos por Van (1999), quien reportó errores que van de ± 12 cm con un tractor circulando en 50 m en una trayectoria establecida.

Los tratamientos T_{13} - T_{16} comprenden el bloque cuya velocidad es de 7 km h^{-1} sin corrección diferencial y combinando tipos de trayectoria con sistema de guiado. Durante estos recorridos se obtuvieron errores máximos hasta 60 cm. Los tratamientos T_{14} - T_{16} reportan las medias más bajas en errores, esto se debe a que coinciden en el sistema de guiado (barra de luces) y tienen como actuador a un operador en función de las luces que puede corregir la trayectoria de forma instintiva. Estos tratamientos no son estadísticamente diferentes entre si.

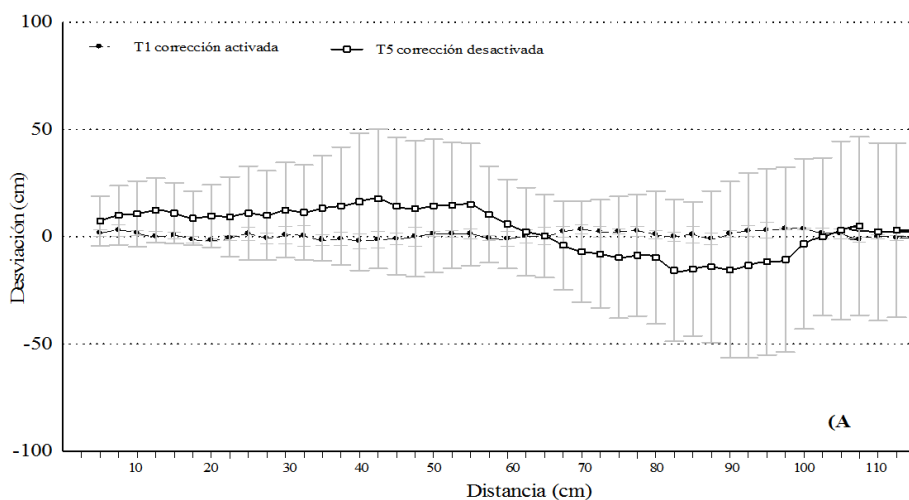
Para los tratamientos T_{17} - T_{20} presentaron medias de las desviaciones entre 6.0 y 10.57 cm, y son estadísticamente diferentes con los tratamientos T_1 - T_4 y T_9 - T_{12} , los cuales coinciden en la corrección diferencial. Si consideramos la velocidad como factor decisivo en la realización de las labores agrícolas, existe diferencia estadística al realizarlos con velocidad de 9 km h^{-1} contra aquellos realizados a velocidades menores de 7 km h^{-1} , obteniendo una media del error de 22.76 cm con 9 km h^{-1} y de 15.74 cm con 7 km h^{-1} .

Los tratamientos T_{21} - T_{24} , cuya característica es la corrección diferencial pero igual velocidad que el bloque anterior, reporta diferencias significativas con medias de 24.38 a 46.93 cm. En éste bloque de tratamientos se obtuvieron errores máximos en la trayectoria de hasta 90 cm, muy por debajo de lo que reporta Zhang *et al.*, (1999) quienes obtuvieron errores máximos de hasta 1.56 m en las trayectorias de un tractor a velocidades de 4 a 6.4 km h^{-1} en ángulos de giro de $\pm 20^\circ$. Tales errores ocurrían justo cuando el tractor circulaba por una curva al dar la vuelta al final del recorrido en línea

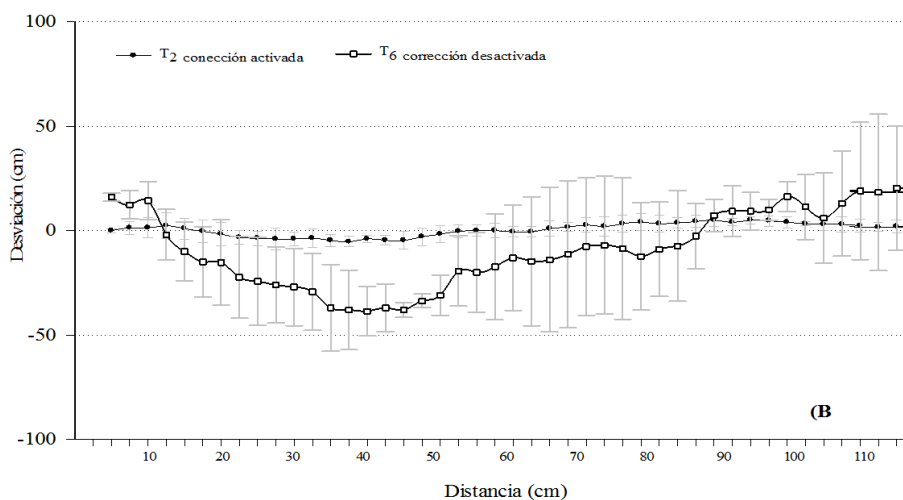
recta. Sin embargo los resultados que reporta Zang *et al.*, (1999) coinciden en las trayectorias lineales donde se obtuvieron errores máximos de 60 cm.

La diferencia del error promedio entre las trayectorias caracterizadas con los sistemas de guiado Ez-steer® y barra de luces es de 20 cm aproximadamente; se observa que para la misma velocidad de 5 km h⁻¹ no existe diferencia significativa al utilizar cualquiera de los dos tipos de sistema guiado considerados. El valor promedio del error observado para el tratamiento T₁ se encuentra por abajo de lo reportado Inoue *et al.*, (1997) para un sistema de corrección con DGPS. En los gráficos, cada punto representa la media de 3 observaciones y la barra la desviación estándar.

La figura 20, muestra la trayectoria seguida por el conjunto agrícola durante una trayectoria lineal, la media del error para el tratamiento T₁ y T₂ fueron de 2.2 cm y 3.5cm respectivamente, contra medias de 22.69cm y 21.8cm en tratamientos T₅ y T₆



a) Sistema de guiado Ez-Steer.



b) Sistema de guiado de barra de luces.

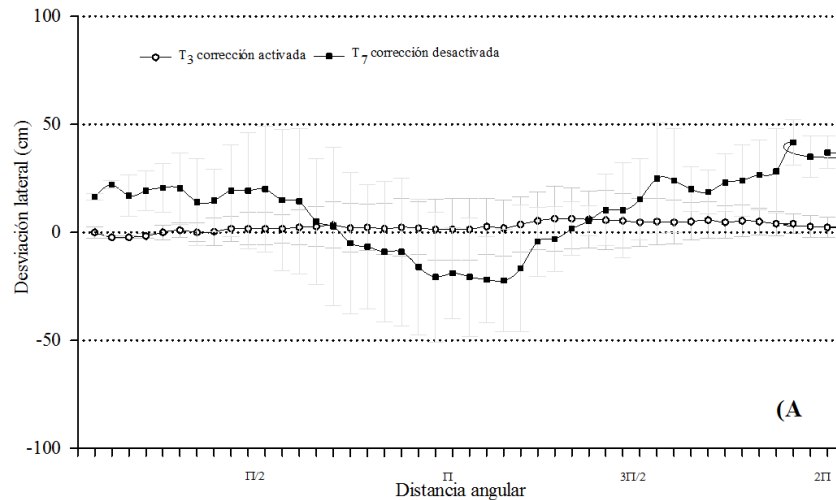
Figura 20. Desviación lateral de la trayectoria lineal a 5 km h^{-1} .

Los tratamientos T_5 y T_6 cuyas medias son 22.69 y 21.89 cm corresponden a tratamientos sin corrección únicamente empleando la posición de los satélites del GPS.

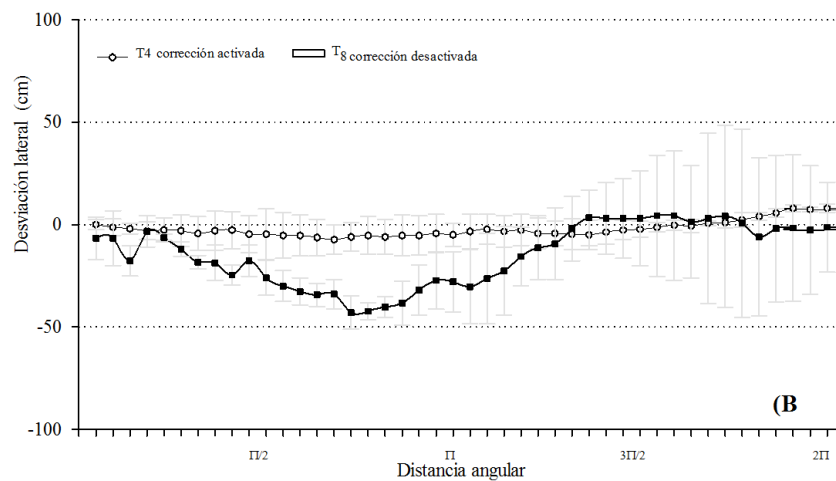
Goense (2003) reporta que para sistemas de guiado automático pueden trabajar durante todo el día sin problemas, por lo que en situaciones de trabajos nocturnos y condiciones extremas como neblina o polvo es factible realizar las labores agrícolas con la combinación propuesta en este tratamiento.

Para la prueba de trayectoria en pivote, se realizó una trayectoria o vuelta inicial como prueba para permitir que el tipo de trayectoria se acoplara al sistema, razón por la cual en algunos tratamientos el inicio corresponde a valores diferentes a lo establecido al origen. Se puede apreciar en la figura 21 que los tratamientos T_3 y T_4 reportan medias de desviaciones de 7.85 y 6.01 cm contra 21.74 y 23.05 cm de los tratamientos T_7 y T_8 , lo que hace evidente apreciar la precisión que se logra al usar el sistema de corrección en

el guiado. Los promedios de error obtenidos para estos tratamientos se encuentran dentro de lo reportado por Stombaugh *et al.*, (1998), quienes indican errores laterales 16 cm para velocidades de 16 km h^{-1} . Por lo tanto, la magnitud del error o desviación lateral es proporcional a la velocidad de trabajo.



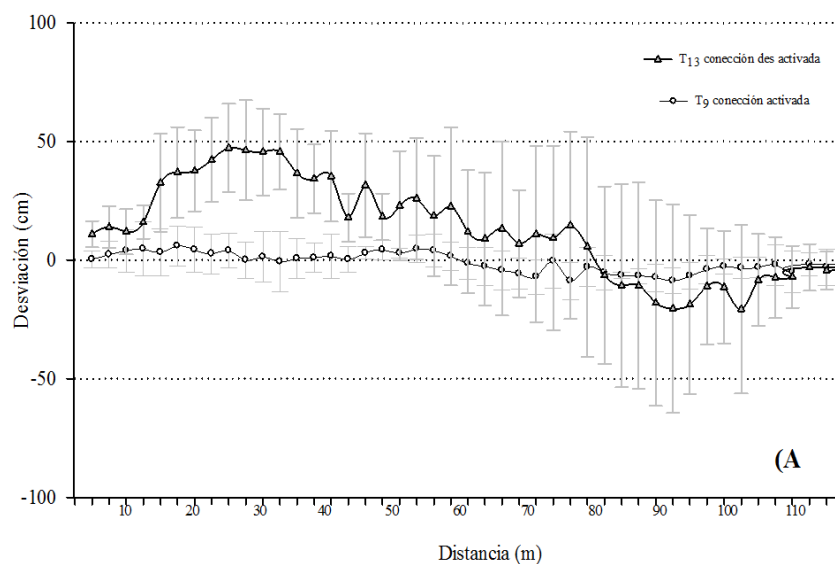
a) Sistema de guiado Ez-Steer.



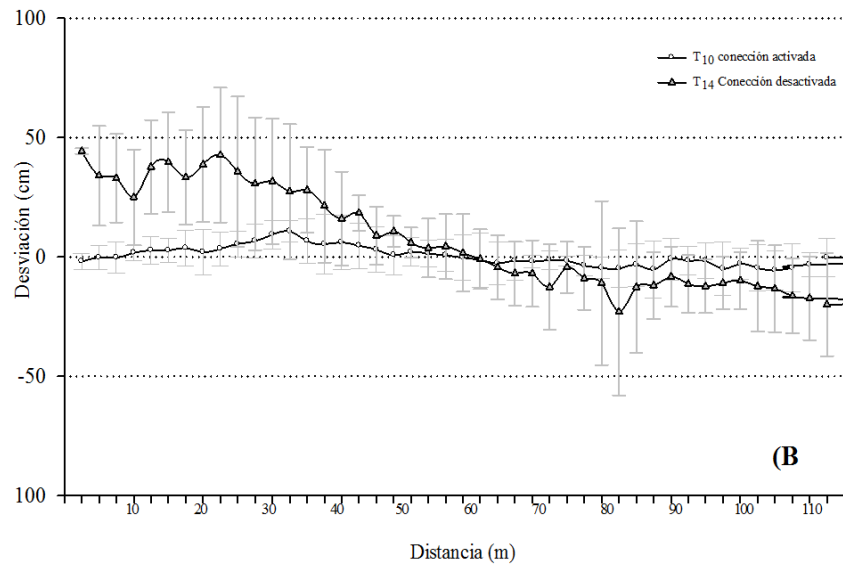
b) Sistema de guiado de barra de luces.

Figura 21. Desviación lateral de la trayectoria en pivote a 5 km h^{-1} .

Las Figuras 22 y 23 corresponden a las combinaciones de trayectorias lineal y en pivote con corrección y sin corrección realizadas a una velocidad de 7 km h^{-1} . Se puede observar que no existe diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$) que permita diferenciar entre la velocidad de 5 o 7 km h^{-1} , cabe mencionar que los tratamientos a los que se hace referencia reportan los valor de desviación estándar mayores para la trayectoria sin corrección, esto se debe a que la precisión que se logra con los sistemas GPS dependen en gran medida de la cantidad de satélites, y éstos a su vez de la posición geográfica y la hora del día.

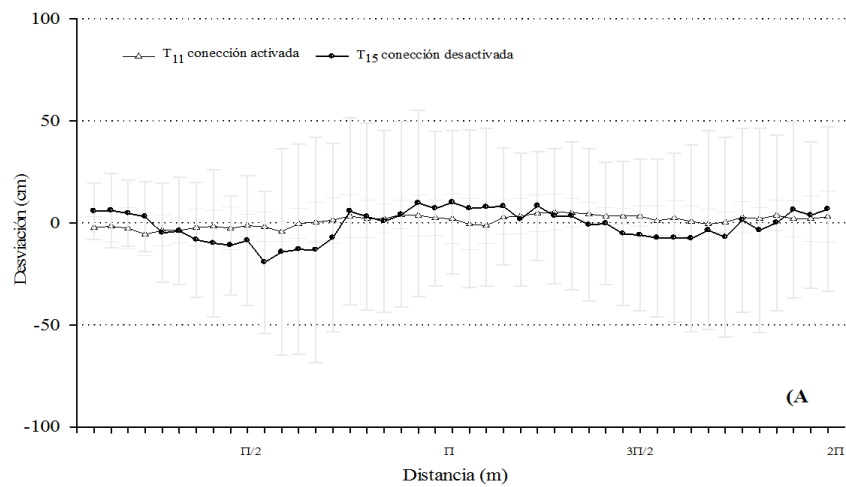


a) Sistema de guiado Ez-Steer.

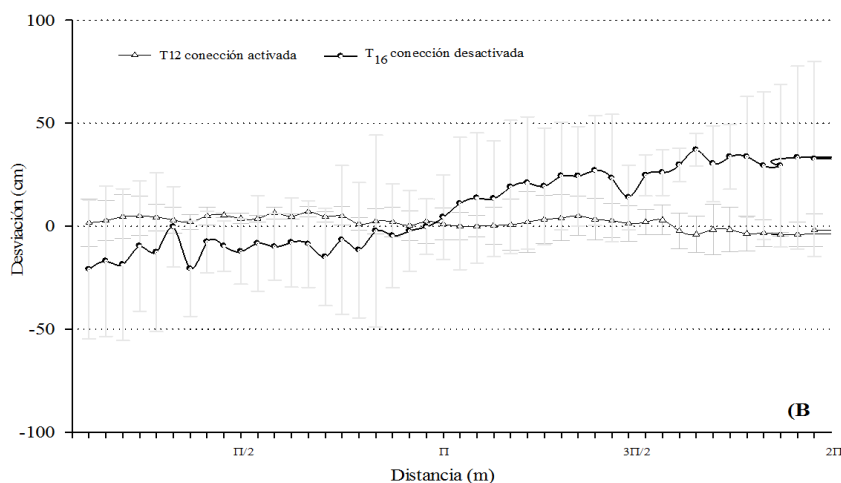


b) Sistema de guiado de barra de luces.

Figura 22. Desviación lateral de la trayectoria lineal a 7 km h^{-1} .



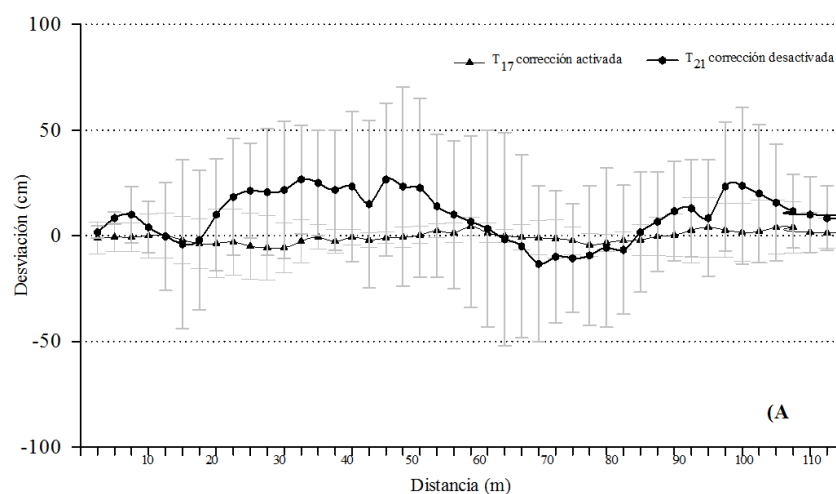
a) Sistema de guiado Ez-Steer.



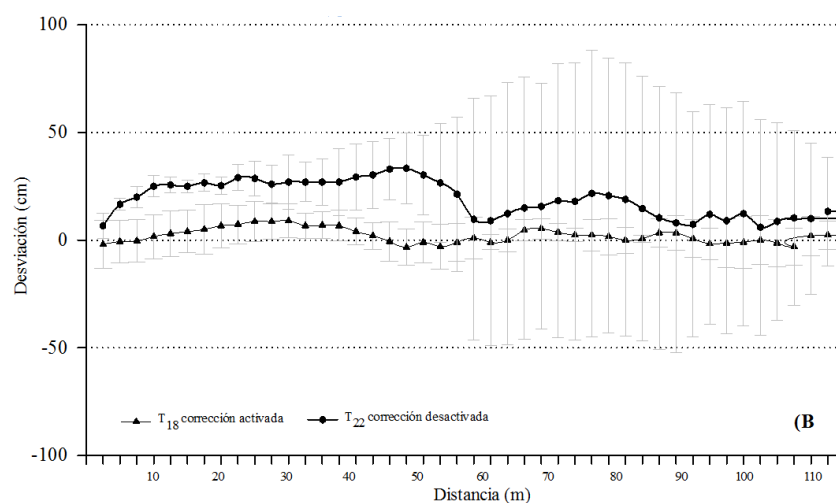
b) Sistema de guiado de barra de luces.

Figura 23. Desviación lateral de la trayectoria en pivote a 7 km h^{-1} .

La Figura 24 muestra el comportamiento en una trayectoria lineal del tractor agrícola a una velocidad de 9 km h^{-1} con los dos sistemas de guiado considerados y utilizando corrección diferencial y sin ella. La velocidad es el factor característico de los tratamientos T_{17} al T_{24} . Se observa que para los tratamientos T_{17} y T_{18} cuyas medias de las desviaciones son de 6.79 y 7.03 cm respectivamente, están dentro de los rangos permitidos para que no causen daños a los cultivos según Abidine (2002), no así para los tratamientos T_{21} y T_{22} cuyas medias de desviación lateral son de 24.38 y 35.78 cm. El tratamiento T_{17} muestra errores laterales máximos de 15 cm hacia ambos lados.



a) Sistema de guiado Ez-Steer.

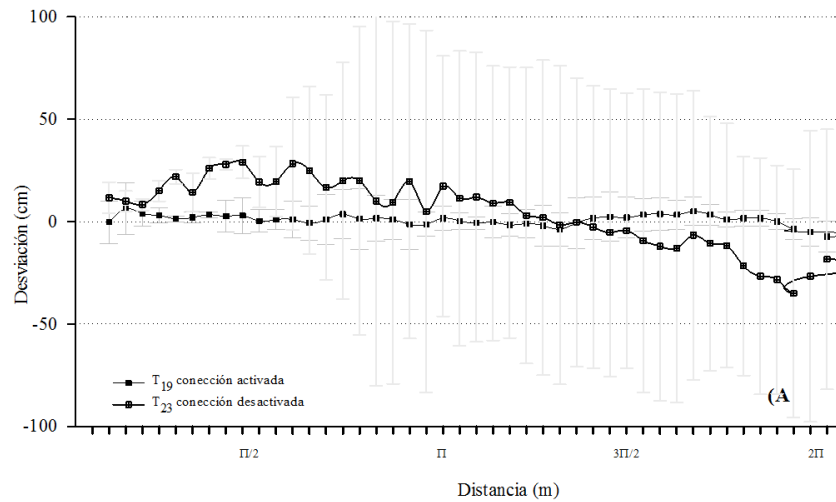


b) Sistema de guiado de barra de luces.

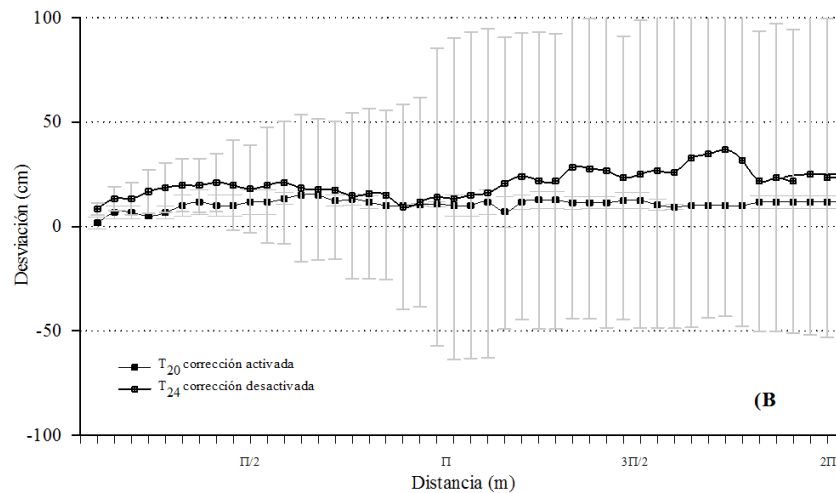
Figura 24. Desviación lateral de la trayectoria lineal del tractor a 9 km h^{-1} .

Al comparar los tratamientos T_{19} - T_{20} y T_{23} - T_{24} en la figura 25, se observa que la distancia angular recorrida por la trayectoria en pivote muestra errores máximos de desviación lateral hasta de 90 cm para los tratamientos que no tienen corrección diferencial. La desviación lateral media del tratamiento T_{24} fue de 46.93 cm con valores

inferiores a lo que reportan Tyrel *et al.*, (2006), los cuales son de 60 y 10 cm con los sistemas de corrección WASS y RTK, respectivamente.



a) Sistema de guiado Ez-Steer.



b) Sistema de guiado de barra de luces.

Figura 25. Desviación lateral de la trayectoria en pivote a 9 km h^{-1} .

5.2.1 Comparación de las velocidades

Con un $P \leq 0.05$, no existen diferencias significativas entre los tratamientos con velocidades de 5 y 7 km h⁻¹, pero a velocidades de 9 km h⁻¹ reportan diferencias con respecto a los dos anteriores, lo que indica que durante el primer rango de velocidades, los errores no son considerables en la trayectoria por lo que ambas se pueden emplear para las labores agrícolas. Sin embargo, al incrementar la velocidad a 9 km h⁻¹ el error aumenta como se puede apreciar en el cuadro 12 de 13.61cm a 22.76cm.

Cuadro 12. Desviación de la trayectoria para tres diferentes velocidades.

Velocidad (km h ⁻¹)	Desviación lateral promedio (cm)
5	13.619b
7	15.748b
9	22.764a

Letras diferentes representan diferencia significativa ($P \leq 0.05$) con prueba de Tukey.

5.2.2 Comparación por el tipo de la trayectoria

Se muestra la comparación de medias en el cuadro 13 de las trayectorias lineal y en pivote. La información nos indica que las labores agrícolas que en su mayoría se realicen en trayectoria lineal permitirá obtener un error significativamente menor ($P \leq 0.05$) en comparación con las que se realicen en trayectoria pivote o circular.

Cuadro 13. Comparación de medias entre tratamientos por tipo de trayectoria

Tipo de trayectoria	Desviación lateral promedio (cm)
En pivote	19.292a
Trayectoria lineal	15.462b

Letras diferentes representan diferencia significativa ($P \leq 0.05$) con prueba de Tukey entre tratamientos.

La Figura 26 muestra un ejemplo de la comparación de las trayectorias medida y modelada con el tractor Massey Ferguson 592T en un recorrido circular con un radio de giro de 50 m. Este tipo de trayectoria se realizó para los tratamientos T_3 - T_4 , T_7 - T_8 , T_{11} - T_{12} , T_{15} - T_{16} , T_{19} - T_{20} y T_{23} - T_{24} .

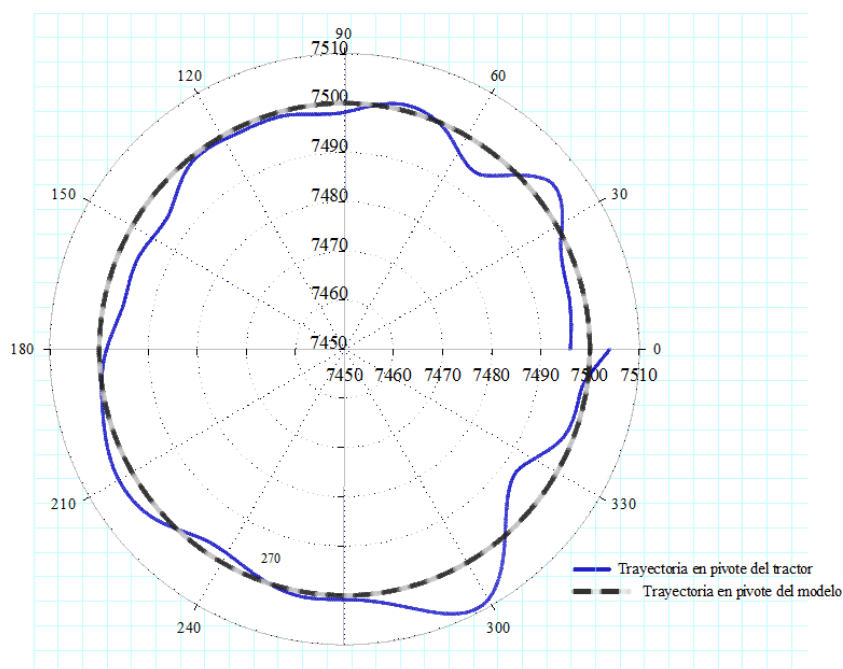


Figura 26. Comparación de trayectorias con un radio de giro de 50 m.

5.2.3 Comparación por el tipo de corrección

El Cuadro 14 muestra la comparación de medias obtenidas para los tratamientos por el tipo de corrección empleada. Se observan diferencias muy altas que permiten afirmar que las trayectorias realizadas con el sistema de corrección empleada Omnistar XP[®] contra el sistema de GPS (incluido en el sistema) realizan una labor con muy bajo error. A pesar que el promedio de las desviaciones laterales de las trayectorias contempladas en los tratamientos T₁-T₄, T₉-T₁₂ y T₁₇-T₂₀ es de 6.29 cm, algunos de estos reportan medias aun menores, lo que garantiza la exactitud durante la realización de las labores agrícolas.

Cuadro 14. Comparación de medias entre tratamientos con y sin corrección.

Corrección diferencial	Desviación lateral promedio (cm)
Sin corrección	28.463a
Con corrección	6.291 b

Letras diferentes representan diferencia significativa ($P \leq 0.05$) con prueba de Tukey entre tratamientos.

6. CONCLUSIONES

Se simularon las trayectorias teóricas de un tractor mediante el uso de un software y utilizando ecuaciones simplificadas pudiendo obtener las trayectorias teóricas ideales de un conjunto agrícola considerando el movimiento de un cuerpo rígido. Esta trayectoria teórica fue el modelo sobre el que se compararon las desviaciones laterales de las pruebas realizadas en campo.

Se evaluó el sistema de guiado automático EZ-Steer[®] y barra de luces en campo y se observaron diferencias significativas que permiten decidir acertadamente sobre el tipo de sistema de guiado a emplear. Los resultados obtenidos en las trayectorias realizadas con el tractor Massey Ferguson 592T muestran que el uso del sistema de guiado EZ-Steer[®] en trayectoria lineal y con un sistema de corrección diferencial, reporta errores promedio de 2.2 cm sobre la trayectoria predeterminada (tratamiento testigo). Este error encontrado permite realizar las labores agrícolas necesarias para la producción. Desde la preparación del terreno hasta la cosecha sin que el error observado interfiera sobre el producto esperado, o se dejen áreas sin aprovechar. Cabe mencionar que dicho error representa menos del 1% de la superficie que se destine a alguna labor agrícola.

Las características de las trayectorias obtenidas en campo mostraron que los errores o desviaciones laterales en la trayectoria lineal aumentaron de 4 hasta 10 cm al cambiar la velocidad de 5 a 9 km h⁻¹; y para el caso de la trayectoria en pivote central las desviaciones laterales variaron de 6 hasta 15 cm, sin diferencias significativas estadísticamente ($P \leq 0.05$).

Los tratamientos que corresponden a las trayectorias sin corrección diferencial presentaron errores de hasta 90 cm, encontrando diferencias significativas con el tratamiento testigo sin implemento agrícola ($P \leq 0.05$). Se encontró una trayectoria óptima con un error de 7.5 cm cuando el tractor circula a velocidades de 5 km h^{-1} con implemento agrícola, con relación al tratamiento testigo.

7. RECOMENDACIONES

Es recomendable que exista visibilidad suficiente para cuando se desee realizar labores agrícolas sin corrección, de tal forma que permita obtener el error mínimo posible de uso del sistema de geo-posicionamiento global.

Se recomienda que las labores se hagan con velocidades menores a 7 km h^{-1} , lo que permitirá que el error se reduzca en comparación con velocidades superiores a lo señalado, logrando su disminución aún más si se opera en trayectorias lineales.

La investigación se realizó en sistemas de guiado automático de tractores agrícolas de la Universidad Autónoma Chapingo, sin embargo se recomienda realizar investigaciones posteriores con otros sistemas de guiado y en condiciones geográficas diferente a las imperantes en el centro del país, y con otros sistemas hidráulicos utilizando corrección RTK, DGPS además de otros tipos de conjuntos agrícolas.

8. LITERATURA CITADA

- Abidine A. Z.; Heidman B. C.; Upadhyaya S. K.; Hills D. J. 2002. Application of RTK GPS based auto-guidance system in agricultural production. ASAE Paper No. O21152. ASAE, St. Joseph, MI.
- Ampatzidis Y.; Vougioukas S.; Bochtis B. 2006. A decomposition framework for the autonomous navigation of agricultural vehicles. Proceedings of the International Conference of Information Systems in Sustainable Agriculture, Agro-environment and Food Technology, Volos, Greece September 20-23.
- Auernhammer H.; Muhr T. 1991: GPS in a basic rule for environment protection in agriculture. Proceedings Symposium Automated Agriculture for the 21st Century: 394-402, ASAE Publication 11-91, Chicago.
- Bell T. 1999 Precision robotic control of agricultural vehicles on realistic farm trajectories. Ph.D. Dissertation, Stanford University, June 1999.
- Benson E., Stombaugh T., Noguchi N., Will J., Reid. J. F. 1998. An evaluation of a geomagnetic direction sensor for vehicle guidance in precision agriculture applications. ASAE Paper 983203. ASAE. St. Joseph, MI.
- Bevly D. M.; Gerdes J. C.; Parkinson B. 2002, A new yaw dynamic model for improved high speed control of a farm tractor. J. Dyn. Syst., Meas., Control, 124(4), pp. 659-667.
- Bevly D. M. High speed, dead reckoning and towed implement control for automatically steered farm tractors using GPS, Ph.D. Dissertation, Stanford University, August 2001.

- Bongiovanni R., Lowenberg, D. B. J. 2006. Precision agriculture and sustainability. *Journal of Precision Agriculture*. 5:359–387.
- Bosch P. P. J.; Klauw A. C. Modeling, identification and simulation of dynamical systems. CRC Press, London.
- Buick R.; White E. 1999. Comparing GPS guidance with foam marker guidance. *En: Precision Agricultural Systems, Precise Positioning*. P. C. Robert, R. H. Rust and W. E. Larson (ed.) ACSESS DL, Madison, WI, USA. pp: 1035-1045.
- Bukta A. J. 1998. Nonlinear dynamics of traveling tractor-implement system generated by free play in the linkage. *J. Japanese Society of Agric. Machinery* 60(4):45-53.
- Chudakov D. A. 1977. Fundamentos de la teoría y cálculo de tractores y automóviles. Editorial MIR, Moscú, URSS. 435 pp.
- Derrick B. J.; Bevely D. M. 2009. Adaptive steering control of a farm tractor with varying yaw rate properties. *Journal of field robotics* 26(6):519–536.
- Ellis J. R. Vehicle dynamics. London Business Books Ltd., 1969.
- Feng L.; He Y.; Zhang Q. 2005. Dynamic trajectory model of a tractor-implement system for automated application. *Proceedings of 3th International Conference on Information Technology and Applications, ICITA 2005*. 1:330-335, IEEE.
- Figiola R. S.; Beasley D. E. Theory and design for mechanical measurements. 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- Gan-Mor S.; Clark R. L.; Upchurch B.L. 2007. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Computer and Electronics in Agriculture* (59):51-38.

- García-Alegre L; García-Pérez A.; Ribeiro A.; Guinea D. 2005. Sensor-actuator integration in a commercial tractor for safe tele-operation and autonomous navigation. En: Precision Agriculture'05. Stafford J.V. Wageningen Academic Publishers the Netherlands (eds.). Editorial Stafford, A. E., Wageningen, Netherlands. pp: 637-644.
- Gillespie T. 1992, Fundamentals of vehicle dynamics. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA.
- Goense, D. 2003. The economics of autonomous vehicles. Proceedings of the VDI-MEG Conference on Agricultural Engineering in Hanover.
- Griffin T.; Lamber D.; Lowenberg-DeBoer. 2005. Economics of light-bar and auto-guidance GPS navigation technologies. En: Precision Agriculture'05. Stafford J.V. Wageningen Academic Publishers the Netherlands (eds.). Editorial Stafford, A. E., Wageningen, Netherlands. pp: 581-587.
- Hague T, Marchant J A, Tillet N. D. 2000. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles. Computers and Electronics in Agriculture 25(1-2):11-28.
- Heraud J.; Lange A. 2009. Agricultural automatic vehicle guidance from horses to GPS, how we got here and where we are going? For presentation at the 2009 Agricultural Equipment Technology Conference, Louisville, Kentucky, USA 9-12 February.
- INEGI. 2010. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de México. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/estadistica/default.aspx>. Fecha de consulta 13 de marzo de 2014.

- Inoue, K., Otsuka, K., Sugimoto, M., Murakami, N. 1997. Estimation of place of tractor and adaptive control method of autonomous tractor using INS and GPS. *En: BIO-ROBOTICS*. Juste, F., Andrew, G., Valiente, J. M., Benlloch, J.V. (Eds.). Gandia, Valencia, EurAgEngand IFAC, pp. 27–32.
- Karimi, D., Ehsani, R. 2006. A new methodology for evaluating guidance system for agricultural vehicles. Proc Canadian Society for Bioengineering, Société Canadienne de Genie Agroalimentaire et de Bioengénierie. Annual Conference, Edmonton Alberta. Paper 6-148, pp. 1-9.
- Kiencke, U., Nielsen, L. 2000. Automotive Control Systems for Engine, Driveline and Vehicle. SAE International, ISBN 0-7680-0505-1.
- Kise M.; Zhang Q.; Rovira M. F. 2005. A stereovision-based row detection method for tractor-automated guidance. *Biosystems Engineering* 90(4):357-367.
- Lara-López, A. 2000. Situación de la mecanización agrícola en México. Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola CLIA 2000, AMIA 2000, pp. 53-62.
- Liang-Kuan, C., Galip, U. 2001. Identification of a driver steering model and model uncertainty, from driving simulator data, *Journal of dynamic systems, measurement and control*, Vol. 123, 623-629.
- Ljung L. 1987 *System identification: Theory for the user*. PTR Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Ming L.; Kenji I.; Katsuhiro W.; Shinya Y. 2009. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance. *International Journal Agriculture & Biology Engineering* 2(3):1-17.

- Murakami N.; Ito A.; Will J. D.; Inoue K.; Kita K.; Miyarua S. 2006. Environment identification technique using hyperOmni-vision and image map. *En: Proceedings of the 3rd IFAC Intl. Workshop Bio-Robotics*, Sapporo, Japan. pp. 317-320.
- NagasakaY.; Umeda N.; Kanetai Y.; Taniwaki K.; Sasaki Y. 2004. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes. *Computers and Electronics in Agriculture* 43:223-234.
- Noguchi, N., Reid J.F., Benson E., Will J., Stombaugh. T. 1998. Vehicle automation system based on multi-sensor integration. ASAE Paper 983111. ASAE, St. Joseph, MI.
- O'Connor M.; Bell T. Elkaim G.; Parkinson B. Automatic steering of farm vehicles using GPS. *En Proc. 3rd Int. Conf. Precision Farming*, June 1996 pp. 767-777.
- O'Connor M. L. Carrier-Phase Differential GPS for Automatic Control of Land Vehicles, Ph.D. Dissertation, Stanford University, December 1997.
- Owen R. H.; Bernard J. E. Directional dynamics of a tractor-loader-backhoe. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 11, 1982, pp. 251-265.
- Pearson P. J. 2007. Modeling and validation of hitched loading effects on tractor yaw dynamics. 113 p.
- Pedersen S. M.; Fountas S.; Have H.; Blackmore B. S. 2005. Agricultural robots: An economic feasibility study. *En: Precision Agriculture'05*. Stafford J. V. Wageningen Academic Publishers the Netherlands (eds.). Editorial Stafford, A.E., Wageningen, Netherlands. pp: 589-596.

- Qiu, H. C., Zhang Q., Reid. J. F. 1999. Evaluation of Tri-R Robotic Driver for tractor guidance on cornfields. 1999 Agricultural Equipment Technology Conference, February 7-10. Louisville, Kentucky.
- Rajamani R. 2006. Vehicle Dynamics and Control. Editorial Springer. 470 p.
- Reid J. F.; Zhang Q.; Noguchi N.; Dickson M. 2000. Agricultural automatic guidance research in North America. Computers and Electronics in Agriculture 25(1-2): 155-167.
- Rekow A. System identification, adaptive control and formation driving of farm tractors, Ph.D. Dissertation, Stanford University, March 2001.
- Slaughter D. C.; Giles D. K.; Downery D. 2008. Autonomous robotic weed control systems: A review. Comput. Electron Agric 61(1):63-78.
- Stengel R. F. Optimal control and estimation. Dover Publications Inc., New York, N.Y.
- Stombaugh T.; Benson E.; Hummel J. W. 1998. Automatic guidance of agricultural vehicles at high field speeds. ASAE Paper 983110. St. Joseph, MI.
- Stombaugh T.; Cole, J.; Shearer S.; Koostra B. 2005. A test facility for evaluating dynamic GPS accuracy. *En: Precision Agriculture'05*. Stafford J. V. Wageningen Academic Publishers the Netherlands (eds.). Editorial Stafford, A.E., Wageningen, Netherlands. pp: 605-612.
- Szczepaniak J.; Grzechowiak R. 2008, Modelling of tractor-potato planter combination dynamics in aspect of vehicle motion steerability. Proc IV IS o model Acta Horticulturae 802.

- Tillet N. D. 1991. Automatic guidance sensors for agricultural field machines: A review. *Journal Agriculture Engineering Research* 50:167-187.
- Torii T. 2000. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan. *Computers and electronics in agriculture* 25:133-153.
- Tyrel L. H.; Fulton J. F.; Tim P. Mc. D.; Brodbeck C. J. 2006. Evaluation of GPS Autoguidance Systems over varying time periods. *American Society Agriculture and Biological Engineers, ASABE. Paper 061042. St. Joseph, MI.*
- Van Z. R. 1999. A drivers steering aid for an agricultural implement, based on an electronic map and Real Time Kinematic DGPS. *Comput. Electron. Agric.*, 24, 153–163.
- Wang, D., Qi, F. 2000. Trajectory planning for a four wheel steering vehicle. *Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea*.pp. 21-26.
- Wong J.Y. *Theory of ground vehicles*. Wiley, New York, 1978.
- Zhang Q.; Reid J. F.; Noguchi N. 1999. Automated guidance control for agricultural tractor using redundant sensors. *SAE 1999 Trans., J. Commercial Vehicles* 108(2):27-31.