



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN**

MÁSTER EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN.

**GUIADO GNSS DE TRACTORES; EVALUACIÓN DE LA
PRECISIÓN EN EL AUTOGUIADO.**

ABRIL 2025

AUTOR: ÁNGEL ALONSO GARCÍA

TUTOR: JAIME GÓMEZ GIL

COTUTOR: SERGIO ALONSO GARCÍA

TITULO: Guiado GNSS de tractores; evaluación de la precisión en el autoguiado.

AUTOR: Ángel Alonso García

TUTOR: Jaime Gómez Gil, Departamento de Teoría de la Señal, Comunicaciones e Ingeniería Telemática, E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad de Valladolid.

COTUTOR: Sergio Alonso García, Ingeniero de Telecomunicación y Doctor por la Universidad de Valladolid.

DEPARTAMENTO: Departamento de Teoría de la Señal, Comunicaciones e Ingeniería Telemática.

Miembros del Tribunal

PRESIDENTE: Alonso Alonso Alonso.

SECRETARIO: Javier Manuel Aguiar Pérez.

VOCAL: Juan Blas Prieto.

SUPLENTE: Juan Ignacio Arribas Sánchez, Ignacio de Miguel Jiménez y Luis Miguel San José Revuelta

FECHA DE LECTURA: Abril de 2025

CALIFICACIÓN:

Resumen

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) es la continuación de mi Trabajo Fin de Grado (TFG). En el anterior TFG se evaluaba el rendimiento de tres receptores GNSS en el posicionamiento, y en este TFM se evalúa el rendimiento de esos mismos receptores en el guiado de un tractor.

Este Trabajo Fin de Máster evalúa el rendimiento de receptores GNSS y de tecnologías de corrección en el guiado de tractores. Tres receptores GNSS: un Navilock NL8022MP, un Novatel Smart2, y un Harxon TS108PRO, tres sistemas de correcciones: EGNOS, *Network Real Time Kinematic* (NRTK) y RTK, y una tecnología propietaria: GLIDE, fueron evaluados. Se realizaron 14 test de guiado con un tractor John Deere 6400 equipado con dos receptores GNSS: uno para su evaluación y otro de referencia. Cada uno de estos tests consistió en tres pasadas separadas entre sí 15 minutos a lo largo de una trayectoria recta de 300 metros a 1 m/s. Los resultados del anterior TFG y de este TFM concluyen que (i) los receptores GNSS de bajo coste sin datos de corrección permiten guiar el tractor con errores típicos entre pasadas a corto plazo de aproximadamente 1 metro RMS, precisión que permitiría un guiado regular en la fertilización cuando la referencia es una pasada anterior realizada en la última hora, (ii) EGNOS mejora ligeramente la precisión de guiado permitiendo alcanzar errores de pasada a pasada a corto plazo inferiores al metro RMS, precisión que permitiría un buen guiado para fertilización y un guiado regular en pulverización (iii) GLIDE mejora el guiado de precisión entre pasadas a corto plazo. La precisión de nivel submétrico de GNSS+EGNOS+GLIDE alcanza precisiones de 10 cm y permitiría un guiado aceptable en fertilización y pulverización, y un guiado regular en siembra, cosecha y labranza, (iv) NRTK ofrece un guiado de precisión a corto y largo plazo de 2 cm, precisión que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas con una única restricción: al menos una estación de referencia debe estar a menos de 50 km del tractor, y (v) RTK alcanza una precisión de guiado a corto y largo plazo de 1 cm, que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas sin restricciones, pero requiere colocar una costosa estación de referencia cerca del tractor, no estando entonces justificado el uso de RTK si los agricultores disponen de NRTK con estaciones base a menos de 50 km.

PALABRAS CLAVE: *Global Navigation Satellite System* (GNSS), *Global Positioning System* (GPS), *Inertial Navigation System* (INS), *Inertial Measurement Unit* (IMU), *Real Time Kinematic* (RTK), *Network RTK* (NRTK), *Satellite Based Augmentation System* (SBAS), *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS), antena, receptor, correcciones, satélites, precisión, agricultura, tractor.

Abstract

This Final Master Project (TFM) is a continuation of my Final Degree Project (TFG). In the previous TFG, the performance of three GNSS receivers was evaluated in terms of positioning, while in this TFM, the performance of the same receivers is assessed in tractor guidance.

This Final Master Project evaluates the performance of GNSS receivers and correction technologies in tractor guidance. Three GNSS receivers: Navilock NL8022MP, Novatel Smart2, and Harxon TS108PRO, three augmentation systems, EGNOS, Network Real-Time Kinematic (NRTK), and RTK and a proprietary technology, GLIDE, were evaluated. A total of 14 guidance tests were conducted using a John Deere 6400 tractor equipped with two GNSS receivers: one for evaluation and another as a reference. Each test consisted of three passes along a 300-meter straight trajectory at 1 m/s, separated by 15 minutes. The results from both the previous TFG and this TFM conclude that: (i) low-cost GNSS receivers without correction data allow tractor guidance with typical short-term pass-to-pass errors of approximately 1 meter RMS, which would enable regular guidance for fertilization when the reference is a previous pass made within the last hour, (ii) EGNOS slightly improves guidance accuracy, allowing short-term pass-to-pass errors below 1 meter RMS, making it suitable for fertilization and providing regular guidance for spraying, (iii) GLIDE enhances pass-to-pass precision. The sub-meter accuracy of GNSS+EGNOS+GLIDE reaches 10 cm, enabling acceptable guidance for fertilization and spraying, as well as regular guidance for sowing, harvesting, and tillage, (iv) NRTK provides high-precision short- and long-term guidance with an accuracy of 2 cm, making it suitable for all agricultural tasks. However, it requires at least one reference station within 50 km of the tractor, (v) RTK achieves 1 cm accuracy in both short- and long-term guidance, allowing highly precise guidance for all agricultural tasks without restrictions. However, it requires the installation of an expensive reference station near the tractor. Therefore, the use of RTK is not justified if farmers have access to NRTK with base stations within 50 km.

KEYWORDS: Global Navigation Satellite System (GNSS), Global Positioning System (GPS), Inertial Navigation System (INS), Inertial Measurement Unit (IMU), Real Time Kinematic (RTK), Network RTK (NRTK), Satellite Based Augmentation System (SBAS), *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS), antenna, receiver, augmentation, satellites, accuracy, agriculture, tractor.

Agradecimientos

Agradecer a mis padres y hermanos por estar siempre a mi lado y por apoyarme en todo momento.

También agradecer al Dr. D. Jaime Gómez Gil por su dedicación y por guiarme durante estos meses de trabajo.

Y de nuevo a Sergio, mi hermano, por la cesión de los materiales necesarios para realizar las pruebas y por la ayuda.

Muchas gracias a todos.

Índice abreviado

Capítulo 1: Introducción.....	16
1.1 Ámbito del proyecto	16
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Fases y métodos.....	17
1.4 Organización de la memoria.....	17
Capítulo 2: Análisis de las tecnologías empleadas	20
2.1 Sistema GNSS	20
2.2 INS.....	27
2.3 Integración GNSS/INS	35
2.4 Materiales empleados en el estudio	37
2.5 Conclusiones del capítulo	41
Capítulo 3: Análisis de antenas GNSS para guiado agrícola; estudio científico del estado del arte	43
3.1 Análisis cronológico	43
3.2 Análisis detallado	49
Capítulo 4: Evaluación del rendimiento de sistemas gratuitos de corrección GNSS para el guiado de tractores	62
4.1 Introducción.....	63
4.2 Materiales	65
4.3 Métodos	66
4.4 Resultados.....	69
4.5 Discusión	80
4.6 Conclusiones.....	82
Capítulo 5: Conclusiones.....	84
Capítulo 6: Líneas futuras	87
Referencias	88

Índice general

Capítulo 1: Introducción.....	16
1.1 Ámbito del proyecto	16
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Fases y métodos.....	17
1.4 Organización de la memoria.....	17
Capítulo 2: Análisis de las tecnologías empleadas	20
2.1 Sistema GNSS	20
2.1.1 Principio de funcionamiento GPS	21
2.1.2 Principio de trilateración.	21
2.1.3 Ajuste del reloj del receptor.....	22
2.1.4 Arquitectura de los sistemas GNSS.....	22
2.1.4.1 Segmento espacial	22
2.1.4.2 Segmento de control terrestre	23
2.1.4.3 Segmento de usuario.....	23
2.1.5 Fuentes de Error en GNSS.....	23
2.1.5.1 Relojes de los satélites	23
2.1.5.2 Errores de órbita.	23
2.1.5.3 Errores atmosféricos.	23
2.1.5.4 <i>Multipath</i>	24
2.1.5.5 Bloqueos de señal.	24
2.1.5.6 Errores del receptor.	24
2.1.5.7 La distribución de los satélites en el cielo.	24
2.1.6 Técnicas de corrección de errores	25
2.1.6.1 Multifrecuencia.....	25
2.1.6.2 Multiconstelación.	25
2.1.6.3 DGNSS.	25
2.1.6.4 SBAS.	26
2.1.6.5 RTK.	26
2.1.6.6 PPP (<i>Precise Point Positioning</i>).	27
2.1.6.7 Otras tecnologías: GLIDE.	27
2.2 INS.....	27
2.2.1 Sistemas de referencia	28
2.2.1.1 Sistema de coordenadas <i>Earth Centered Inertial</i> (ECI o <i>i-frame</i>)	28
2.2.1.2 Sistema de coordenadas <i>Earth Centered Earth Fixed</i> (ECEF o <i>e-frame</i>)	28
2.2.1.3 Sistema de coordenadas de navegación (<i>n-frame</i>).....	28
2.2.1.4 Sistema de coordenadas cuerpo (<i>body</i> o <i>b-frame</i>).....	29
2.2.2 Acelerómetros.....	29

ÍNDICE GENERAL

2.2.2.1	Acelerómetros mecánicos.....	29
2.2.2.2	Acelerómetros de Estado Sólido.....	30
2.2.2.3	Acelerómetros MEMS.....	30
2.2.3	Giróscopos.....	31
2.2.3.1	Giróscopos Mecánicos.....	31
2.2.3.2	Giróscopos Ópticos.....	31
2.2.3.3	Giróscopos MEMS.....	32
2.2.4	Errores de los sensores.....	32
2.2.5	Navegación inercial.....	33
2.3	Integración GNSS/INS.....	35
2.3.1	Filtro de Kalman.....	35
2.3.2	Tipos de integración.....	36
2.3.2.1	Integración <i>Loose</i>	36
2.3.2.2	Integración <i>Tight</i>	36
2.3.2.3	Integración <i>Ultra-Tight</i>	37
2.4	Materiales empleados en el estudio.....	37
2.4.1	Navilock NL-8022MP.....	38
2.4.2	Novatel Smart2.....	38
2.4.3	Harxon TS108PRO.....	39
2.4.4	Harxon TS103 base.....	39
2.4.5	Autoguiado tractorDrive.....	40
2.5	Conclusiones del capítulo.....	41
Capítulo 3:	Análisis de antenas GNSS para guiado agrícola; estudio científico del estado del arte.....	43
3.1	Análisis cronológico.....	43
3.2	Análisis detallado.....	49
3.2.1	Lipinski y colaboradores. 2016. Precision of tractor operations with soil cultivation implements using manual and automatic steering modes (36).....	49
3.2.1.1	Materiales y métodos.....	49
3.2.1.2	Resultados y discusión.....	50
3.2.1.3	Conclusiones.....	51
3.2.2	Radicioni y colaboradores. 2020. GNSS Network RTK for Automatic Guidance in Agriculture: Testing and Performance Evaluation (38).....	52
3.2.2.1	Infraestructura GNSS y servicios de posicionamiento NRTK utilizados.....	52
3.2.2.2	Instrumentos y maquinaria utilizados en las pruebas.....	52
3.2.2.3	Realización de las pruebas.....	53
3.2.2.4	Procesamiento de datos.....	53
3.2.2.5	Evaluación económica.....	55
3.2.2.6	Conclusiones.....	56
3.2.3	Azmi y colaboradores. 2022. A computer-based mapping approach for evaluating straight-line accuracy of autopilot tractor traversing the oil palm field terrain (40).....	57
3.2.3.1	Materiales y métodos.....	57
3.2.3.2	Resultados y discusión.....	58
3.2.3.3	Conclusiones.....	59
3.2.4	Conclusiones del capítulo.....	59
Capítulo 4:	Evaluación del rendimiento de sistemas gratuitos de corrección GNSS para el guiado de tractores.....	62
4.1	Introducción.....	63
4.2	Materiales.....	65
4.3	Métodos.....	66
4.4	Resultados.....	69
4.5	Discusión.....	80
4.6	Conclusiones.....	82

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 5: Conclusiones.....	84
Capítulo 6: Líneas futuras	87
Referencias	88

Índice de figuras

Figura 2.1: Cálculo del tiempo de propagación por parte del receptor a partir del código PRN (2).	21
Figura 2.2: Localización del receptor en un punto a través de cuatro satélites (4).	22
Figura 2.3: Efecto de la distribución de los satélites en el cielo para el cálculo de la posición (1).	24
Figura 2.4: Principio de funcionamiento de DGNSS (10).	25
Figura 2.5. Principales sistemas SBAS en el mundo (12).	26
Figura 2.6. Posición relativa y orientación de cada uno de los sistemas de coordenadas, con los superíndices correspondientes (11).	29
Figura 2.7. Modelo básico de un acelerómetro (17).	30
Figura 2.8. Acelerómetro MEMS mecánico (11).	31
Figura 2.9. Giróscopo MEMS (11).	32
Figura 2.10. Algoritmo de navegación inercial para sistemas de plataforma estabilizada (18).	34
Figura 2.11. Algoritmo de navegación inercial para sistemas <i>strapdown</i> (18).	34
Figura 2.12. Diagrama para la integración <i>Loose</i> (11).	36
Figura 2.13. Diagrama para la integración <i>Tight</i> (11).	37
Figura 2.14. Diagrama para la integración <i>Ultra-Tight</i> (11).	37
Figura 2.15. Antena Navilock NL-8022MP (21).	38
Figura 2.16. Antena Novatel Smart2 (22).	39
Figura 2.17. Antena Harxon TS108PRO (23).	39
Figura 2.18. Antena base TS103 (24).	40
Figura 2.19. Pantalla, motor, caja de control y receptor GNSS del autoguiado tractorDrive (25).	40
Figura 3.1. Trayectorias seguidas con el segundo sistema DGPS a las 10:00 h a la izquierda y a las 16:00 h a la derecha (26).	43
Figura 3.2. Resultados del análisis en dinámico en trayectorias circulares de radios 78 cm y 39 cm, respectivamente (28).	44
Figura 3.3. Plataforma utilizada para realizar las marcas en el suelo con tiza a distintas distancias del eje trasero del tractor y llevar la antena a 3.6 m de distancia del eje trasero del tractor (30).	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.4. Procedimiento de plantación, recogida de datos mediante el sistema de mapeo automático basado en RTK y posterior medición topográfica de la posición de las tomateras.....	46
Figura 3.5. Pruebas arando manualmente a la izquierda y con autoguiado a la derecha.....	48
Figura 3.6. Representación del método de medida.....	50
Figura 3.7. Valores del ancho operativo, desviación estándar, varianza y media para los tres modos dirección y distintas velocidades.	51
Figura 3.8. Red de estaciones GPSUMBRIA.....	52
Figura 3.9. Sistema de guiado montado en el tractor y antenas montadas en la cabina.	53
Figura 3.10. Trayectorias obtenidas durante las pruebas. A) Siembra, tractor de ruedas; B) Fertilización, tractor de ruedas; C) Rastrillo, tractor de ruedas; D) Rastrillo, tractor de orugas. En azul es con tracción manual, en verde, con guiado asistido y en rojo guiado automático.	54
Figura 3.11. Datos de las pruebas realizadas.....	54
Figura 3.12. Áreas solapadas y sin tartar para la valoración económica.	55
Figura 3.13. Datos de solapamientos y áreas sin tratar para cada uno de los modos.	55
Figura 3.14. Desviaciones medias para: 1: siembra, 2: fertilización, 3: grada (tractor de ruedas), 4: grada (tractor de orugas). En azul, guiado manual; en verde, guiado asistido y en rojo, guiado automático.....	56
Figura 3.15. Gráfico de D para los distintos modos de corrección.....	56
Figura 3.16. Esquema de las trayectorias rectas a la izquierda y resultados de las pruebas a la derecha.....	58
Figura 3.17 Errores identificados en las líneas rectas de las tres pruebas.	58
Figura 3.18. Errores de precisión lineal en repeticiones seleccionadas al azar.	59
Figura 4.1. Receptores GPS probados en este estudio. a) Navilock NL-8022MP. b) Novatel Smart2. c) Harxon TS108PRO. d) Base Harxon TS108PRO.....	66
Figura 4.2. Motor del autoguiado tractorDrive que acciona el volante del tractor durante las pruebas de guiado.	66
Figura 4.3. Imágenes de la adquisición de datos de la prueba estática: (a) receptores adquiriendo datos en un tejado y (b) diagrama de la conexión entre receptores, receptor base y ordenador portátil.....	67
Figura 4.4. Posiciones relativas de los receptores en las pruebas estáticas. La posición de los receptores representada en color gris se obtuvo a partir de la posición verdadera calculada de los receptores en color rojo, y las distancias mostradas en la figura.	68
Figura 4.5. Tractor John Deere durante la prueba en dinámico con la antena de referencia en el bastidor	69
Figura 4.6. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Navilock NL-8022MP sin SBAS de la Configuración 1: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 5.42% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 26 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 4.7. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Navilock NL-8022MP con SBAS de la Configuración 2: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 0.86% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 18 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico. Además, a partir de los 18 minutos, todos los valores son un error de 1 m.....70
- Figura 4.8. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 sin SBAS y GLIDE desactivado de la Configuración 3: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 2.94% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de las 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 19 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico. Además, a partir de los 18 minutos, todos los valores tienen un error de 1 m.70
- Figura 4.9. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS y sin GLIDE de la Configuración 4: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial. Obsérvese que, en el gráfico c, algunos puntos superan un error de 1 m y quedan fuera del gráfico.71
- Figura 4.10. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS y con GLIDE de la Configuración 5: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.71
- Figura 4.11. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO sin SBAS de la Configuración 6: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.71
- Figura 4.12. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con SBAS de la Configuración 7: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.72
- Figura 4.13. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Girona, a 645km del receptor de la Configuración 8: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.72

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 4.14. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Mérida, a 296 km del receptor de la Configuración 9: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial. Nótese que, para comparar los gráficos de diferentes configuraciones, la escala Y no se ha modificado con los gráficos de configuraciones anteriores, y algunas barras de la Función de Densidad de Probabilidad (Gráfico b) están por encima de los límites del gráfico.72
- Figura 4.15. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Aranda de Duero, a 99 km del receptor de la Configuración 10: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulada calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.73
- Figura 4.16. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Valladolid, a 42 km del receptor de la Configuración 11: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.73
- Figura 4.17. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Olmedo, a 14 km del receptor de la Configuración 12: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.73
- Figura 4.18. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con una Estación de Referencia Virtual en la ubicación del receptor de la Configuración 13: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.74
- Figura 4.19. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK de la base Harxon TS103 a 5 m del receptor de la Configuración 14: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial. 74
- Figura 4.20. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Navilock NL8022MP sin SBAS de la Configuración 1. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.76
- Figura 4.21. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Navilock NL8022MP con SBAS de la Configuración 2. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.22. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Novatel Smart2 sin SBAS y sin GLIDE de la Configuración 3. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.	76
Figura 4.23. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Novatel Smart2 con SBAS y sin GLIDE de la Configuración 4. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.	76
Figura 4.24. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Novatel Smart2 con SBAS y con GLIDE de la Configuración 5. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.	77
Figura 4.25. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO sin SBAS de la Configuración 6. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.	77
Figura 4.26. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con SBAS de la Configuración 7. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.	77
Figura 4.27. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Girona a 645 km de receptor de la Configuración 8. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.	77
Figura 4.28. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Mérida a 296 km de receptor de la Configuración 9. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.	78
Figura 4.29. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Aranda de Duero a 99 km de receptor de la Configuración 10. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.....	78
Figura 4.30. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Valladolid a 42 km de receptor de la Configuración 11. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.....	78
Figura 4.31. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Olmedo a 14 km de receptor de la Configuración 12. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.	79
Figura 4.32. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con una Estación de Referencia Virtual en la ubicación del receptor de la Configuración 13. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.....	79
Figura 4.33. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la base Harxon TS103 a 5 m del receptor de la Configuración 14. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.	79

Capítulo 1: Introducción

Capítulo 1: Introducción

En los últimos años, los sistemas de autoguiado agrícola han adquirido una gran popularidad debido a su mejora en la eficiencia, reducción de costos y sostenibilidad en las labores agrícolas, además de la comodidad ofrecida al agricultor. La implementación de tecnologías GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ha permitido mejorar la exactitud y repetibilidad en la conducción autónoma de maquinaria agrícola. Sin embargo, existen diferentes tecnologías de posicionamiento con niveles de precisión variables, lo que genera la necesidad de realizar estudios comparativos que permitan evaluar su desempeño en entornos reales de trabajo.

1.1 Ámbito del proyecto

En este contexto, el presente Trabajo Fin de Máster se centra en el análisis comparativo de la precisión de distintos receptores GNSS y tecnologías de corrección, incluyendo EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), GLIDE, RTK (*Real-Time Kinematic*) y NRTK (*Network RTK*), aplicados a sistemas de autoguiado agrícola. Se han llevado a cabo pruebas en campo utilizando un tractor con sistema de autoguiado, con el fin de evaluar la precisión de cada receptor y tecnología en escenarios agrícolas.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es evaluar y comparar la precisión de distintos receptores GNSS y tecnologías de corrección aplicadas a sistemas de autoguiado agrícola, con el fin de determinar su desempeño y determinar para qué labores agrícolas resulta útil cada tecnología.

Para alcanzar este objetivo, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Revisión del estado del arte sobre la precisión en sistemas GNSS aplicados al autoguiado agrícola.
- Análisis de tecnologías GNSS utilizadas en autoguiado agrícola: EGNOS, GLIDE, RTK y NRTK
- Estudio detallado de los principales errores que afectan la precisión de cada tecnología.
- Evaluación de los receptores GNSS utilizados.
- Diseño y ejecución de pruebas experimentales en campo con un tractor equipado con autoguiado.

- Captura, tratamiento y análisis de datos, evaluando la desviación de la trayectoria.
- Desarrollo de un programa en *MATLAB®* para el procesamiento y análisis de los datos de posicionamiento.
- Comparación de los resultados experimentales con estudios previos y análisis teóricos.
- Identificación de líneas futuras de investigación en la mejora de la precisión del autoguiado mediante nuevas tecnologías GNSS o su integración con otros sistemas de posicionamiento.

1.3 Fases y métodos

El estudio del Trabajo Fin de Máster se ha desarrollado en varias fases. A continuación, se describen las fases principales del estudio:

1. Adquisición de conocimientos teóricos sobre GNSS y los sistemas inerciales básicos para el autoguiado agrícola.
2. Análisis del estado del arte, recopilando estudios previos sobre la precisión de diferentes tecnologías GNSS en sistemas de autoguiado agrícola.
3. Selección de los receptores GNSS a evaluar, considerando modelos disponibles y su compatibilidad con el sistema de autoguiado.
4. Estudio detallado del funcionamiento de cada tecnología de corrección GNSS, evaluando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones.
5. Diseño de pruebas experimentales en campo, estableciendo procedimientos de medición para evaluar la precisión del autoguiado con cada receptor y tecnología.
6. Instalación, conexión y configuración de los receptores GNSS y del autoguiado para la realización de las pruebas.
7. Obtención de los datos durante las pruebas.
8. Procesamiento y análisis de los datos de posicionamiento, mediante un programa en *MATLAB®* para evaluar el desempeño de cada tecnología.
9. Comparación de resultados y discusión, identificando las aplicaciones en agricultura para las que se adecúa mejor cada tecnología en función de la precisión obtenida.
10. Identificación de líneas futuras de investigación, enfocadas en la mejora de la precisión y estudio de nuevas tecnologías aplicadas al autoguiado agrícola.

1.4 Organización de la memoria

La presente memoria está estructurada en seis capítulos:

El Capítulo 1 introduce el contexto del trabajo, explicando ámbito del trabajo, los objetivos y las fases y los métodos de este Trabajo Fin de Máster.

En el Capítulo 2 se realiza un análisis detallado de las tecnologías que intervienen en el estudio, con el objetivo de comprender su funcionamiento y los factores que afectan su precisión en aplicaciones de autoguiado para maquinaria agrícola. En primer lugar, se introduce la tecnología GNSS, la cual es el objetivo principal del estudio, explicando el principio de funcionamiento básico, los errores asociados y las tecnologías y métodos empleados para minimizar estos errores y mejorar la precisión en el posicionamiento. En segundo lugar, se estudian los sistemas INS, básicos para el correcto funcionamiento de los sistemas de autoguiado. Se describen el principio de funcionamiento,

sus componentes principales y los errores asociados. Por último, se presentan los métodos principales de integración de GNSS/INS, fundamentales para combinar las ventajas de ambos sistemas y lograr un posicionamiento preciso y robusto.

En el capítulo 3 se presenta una revisión de los estudios más relevante sobre la aplicación de receptores GNSS y sus tecnologías asociadas en el campo de la agricultura de precisión, así como el estudio de su precisión y los métodos utilizados para su evaluación.

En el capítulo 4 se presenta el estudio realizado para evaluar la precisión de las tecnologías y de los receptores GNSS. Se realizan pruebas en estático durante 24 h en cielo abierto y en dinámico en varias trayectorias montadas sobre un tractor. Se explican los materiales empleados en el estudio, los métodos empleados para la realización de las pruebas, los resultados obtenidos, la discusión de los resultados y las conclusiones extraídas en el estudio.

En el capítulo 5 se recogen las conclusiones del Trabajo Fin de Máster.

Por último, en el capítulo 6 se recogen las líneas futuras en el que se propone el análisis de otras tecnologías o la inclusión de la inteligencia artificial.

Capítulo 2:

Análisis de las tecnologías empleadas

Capítulo 2: Análisis de las tecnologías empleadas

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), permiten determinar la posición de un objeto en cualquier parte del mundo con distintos niveles de precisión. Su aplicación en el ámbito agrícola ha revolucionado la gestión de cultivos al proporcionar herramientas de guiado, monitoreo y automatización de maquinaria.

En la agricultura de precisión, el uso de GNSS facilita tareas como el autoguiado de tractores, el control de dosis variable de insumos y la cartografía del terreno, permitiendo una optimización de recursos y una mejora en la eficiencia operativa. Dependiendo de la tecnología utilizada, la precisión puede variar desde metros (GNSS estándar) hasta centímetros (RTK y PPP), lo que influye directamente en la calidad del guiado y la repetibilidad de las trayectorias.

Si bien GNSS ha demostrado ser una herramienta clave en el sector agrícola, su precisión y estabilidad pueden verse afectadas por factores como la cobertura satelital, las interferencias y la pérdida temporal de señal en entornos complejos. Esto hace que, en aplicaciones dinámicas como el guiado de tractores, sea necesario integrar otras tecnologías que mejoren la precisión y la continuidad del posicionamiento.

En este capítulo se exponen los conocimientos teóricos básicos para entender el funcionamiento de los sistemas GNSS, se describen los principales errores asociados a esta tecnología y algunas tecnologías para reducir o eliminar dichos errores. Además, se explica la tecnología INS, esencial para el correcto funcionamiento de los sistemas de guiado automático de tractores sobre los que se estudiará la precisión de los receptores GNSS en el estudio llevado a cabo.

2.1 Sistema GNSS

La tecnología GNSS (*Global Navigation Satellite System*, por sus siglas en inglés) es un sistema de navegación que utiliza satélites para determinar la posición de los usuarios en cualquier parte del mundo. Existen cuatro sistemas GNSS que operan a nivel global: el sistema estadounidense GPS (*Global Positioning System*), que fue el primero en ser puesto en funcionamiento; el sistema ruso GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*); el sistema europeo Galileo; y el sistema chino BeiDou.

La tecnología GNSS se basa en determinar la posición de un objeto a partir del cálculo de las distancias entre éste y al menos cuatro satélites, cuyas posiciones en el espacio son conocidas y funcionan como referencia. Para que los cálculos de la posición sean precisos cada satélite incorpora relojes atómicos de alta precisión y sus órbitas están precisamente calculadas.

Todos los sistemas GNSS anteriores funcionan de manera similar, aunque difieren en algunos aspectos. En el siguiente apartado, se explica el funcionamiento del sistema GPS.

2.1.1 Principio de funcionamiento GPS

Los satélites GPS transmiten señales continuamente en tres frecuencias de portadora: L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) y L5 (1176.45 MHz). Estas señales incluyen tres tipos diferentes de información: los datos de las efemérides, los datos del almanaque y el código pseudoaleatorio (PRN, *Pseudo-Random Noise*).

Los datos de las efemérides proporcionan información sobre el estado del satélite, la fecha y la hora actuales, mientras que los datos del almanaque indican al receptor GPS la ubicación de cada satélite en cualquier momento del día. Por otro lado, los códigos pseudoaleatorios son largas secuencias de unos y ceros que permiten identificar individualmente a cada satélite y, además, se utilizan para determinar el desfase en la señal debido a la propagación: el código PRN es generado tanto por el satélite como por el receptor de manera sincronizada, cuando la señal emitida por el satélite llega al receptor, esta experimenta un retraso en relación con el patrón generado por el receptor, debido al tiempo de propagación de la señal y que es proporcional a la distancia entre el satélite y el receptor (1). Una vez calculado este retraso mediante la comparación y la correlación de la secuencia de códigos del satélite recibida por el receptor se calcula la distancia al satélite multiplicando este tiempo por la velocidad de la luz.

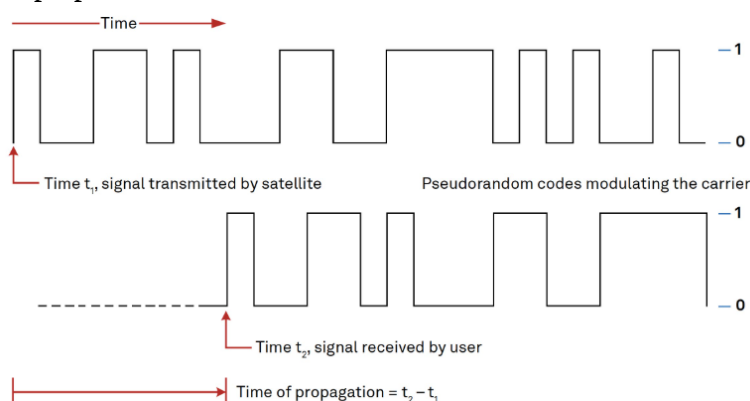


Figura 2.1: Cálculo del tiempo de propagación por parte del receptor a partir del código PRN (2).

Una vez conocida la distancia a varios satélites se obtiene la posición del receptor por el principio de trilateración.

2.1.2 Principio de trilateración.

La trilateración es una técnica geométrica para determinar la posición de un objeto conociendo su distancia a otros puntos de referencia. Por el principio de trilateración se determina la posición del receptor conociendo la distancia del receptor a los satélites y conociendo la posición de estos en el espacio (efemérides). Conocer la distancia desde un primer satélite localiza al receptor en algún lugar de una esfera que rodea a ese satélite. Una segunda medición de distancia hacia un segundo satélite reduce la posición a la intersección de las dos esferas, que es un círculo. Una tercera medición reduce aún más las posibilidades de posición a dos puntos. De estos dos puntos es fácil descartar uno de ellos por la proximidad a la superficie de la Tierra o analizando la cercanía a posiciones anteriores. Aun así, se utiliza un cuarto satélite para descartar uno de los dos puntos y para sincronizar los códigos de tiempo generados por los satélites y el receptor. Para optimizar la precisión, la mayoría de

los fabricantes implementan técnicas de hardware y software que utilizan tantas señales satelitales como sea posible (3).

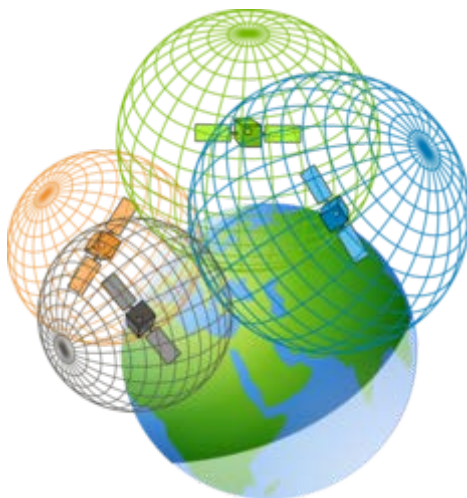


Figura 2.2: Localización del receptor en un punto a través de cuatro satélites (4).

2.1.3 Ajuste del reloj del receptor

Para que los cálculos de posicionamiento sean precisos, es fundamental que tanto los satélites como el receptor cuenten con una referencia temporal exacta. Sin embargo, los receptores no utilizan relojes atómicos como los satélites debido a su elevado coste, sino que emplean relojes convencionales, más accesibles pero de menor precisión.

La falta de sincronización entre el receptor y los relojes de los satélites provoca que las cuatro esferas correspondientes a los satélites no se intersequen en un único punto, lo que genera una incertidumbre en el posicionamiento proporcional a la inexactitud del reloj del receptor. Para corregir esto, el receptor está programado para adelantar o retrasar su reloj hasta lograr que la intersección de las esferas converja en un solo punto.

Gracias a este proceso de corrección continua, el reloj del receptor logra obtener la precisión de los relojes atómicos de los satélites, garantizando así un cálculo exacto de la posición (5).

2.1.4 Arquitectura de los sistemas GNSS

Los sistemas GNSS de la actualidad cuentan con tres partes diferenciadas que trabajan de forma conjunta para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas GNSS.

2.1.4.1 Segmento espacial

El segmento espacial está formado por la constelación de satélites. Los satélites están repartidos en órbitas alrededor de la Tierra para cubrir todos los puntos del globo con al menos cuatro satélites. En el caso de GPS hay seis planos orbitales, mientras que en Galileo, GLONASS y BeiDou están repartidos en tres planos orbitales. Las constelaciones están formadas generalmente por un número de satélites que puede variar entre los 24 y los 30 satélites operativos, además de algunos satélites de reserva que pueden activarse en caso de fallos en los satélites principales. Los satélites de las constelaciones orbitan la Tierra a una altitud aproximada de 20,000 km sobre la superficie. A esta altura, cada satélite completa una órbita alrededor del planeta en unas 12 horas.

Cada satélite está equipado con un reloj atómico de cesio y/o rubidio para proporcionar información de temporización a las señales transmitidas por los satélites. Cada satélite transmite señales de radio que contienen información digital que se utiliza para determinar la distancia entre el satélite y el receptor. Las frecuencias de las señales de estas transmisiones varían ligeramente de un sistema a otro, pero generalmente caen en el rango de 1200 a 1600 MHz. La mayoría de los satélites transmiten en varias frecuencias diferentes al mismo tiempo (3).

2.1.4.2 Segmento de control terrestre.

El segmento de control está compuesto por estaciones distribuidas alrededor del mundo que se encargan de supervisar y monitorear el estado de los satélites y enviarles correcciones. Estas correcciones incluyen ajustes por desviaciones en el reloj, correcciones en las efemérides de cada satélite y datos sobre las condiciones atmosféricas que influyen en la propagación de las señales y en el cálculo de la distancia.

2.1.4.3 Segmento de usuario.

El segmento de usuario está formado por todos los receptores capaces de recibir, decodificar y procesar las señales de los satélites GPS para proporcionar información de posición a los usuarios.

2.1.5 Fuentes de Error en GNSS.

Los sistemas GNSS proporcionan información de posicionamiento con gran precisión, pero están sujetos a diversas fuentes de error que pueden afectar su exactitud. Estas imprecisiones surgen de factores tanto internos, como los relojes de los satélites y las efemérides, como externos, incluyendo la influencia de la atmósfera y las interferencias en el entorno. A continuación, se detallan las principales fuentes de error en GNSS y su impacto en la determinación de la posición.

2.1.5.1 Relojes de los satélites.

Los relojes atómicos de los satélites GNSS son muy precisos, pero sufren pequeñas desviaciones. Una pequeña imprecisión en el reloj del satélite da como resultado un error significativo en la posición calculada por el receptor. Normalmente, la estimación tiene una precisión de unos ± 2 metros, aunque esto puede variar entre los distintos sistemas GNSS (6).

2.1.5.2 Errores de órbita.

Cuando un satélite se desvía de su órbita prevista, ocurre lo que se conoce como un error de efemérides, que es una desviación de la posición programada del satélite. Estos errores suelen ser causados por la atracción gravitacional o la radiación solar, que pueden alterar la órbita del satélite y pueden resultar en errores de posición del usuario de hasta 2.5 metros (6).

2.1.5.3 Errores atmosféricos.

La señal de los satélites se ve afectada por la ionosfera y la troposfera, disminuyendo la velocidad a la que se propaga, pudiendo incluso desviarse o difractarse.

La ionosfera está compuesta por aire ionizado debido a la radiación solar. Los electrones libres presentes en esta capa afectan los índices de refracción de las diversas capas de la ionosfera, reduciendo de esta manera la velocidad de propagación de las señales satelitales. Estos efectos,

dependientes de la radiación solar, cambian según las horas del día y son mínimos durante la noche (7).

La troposfera es la capa atmosférica donde se desarrollan los fenómenos meteorológicos. Las señales se ven afectadas por factores como la humedad, la presión y la temperatura, lo que provoca retrasos en su propagación y afecta la precisión del posicionamiento (7).

Los efectos atmosféricos pueden producir errores de hasta decenas de metros en la determinación de la posición del receptor si no se tienen en cuenta (6).

2.1.5.4 *Multipath*.

La señal GNSS puede reflejarse en superficies cercanas, como maquinaria, edificios o masas de agua, lo que provoca que la señal llegue repetida en diferentes instantes de tiempo, generando errores en la posición calculada. Este efecto se conoce como *multipath* o multitrayectoria y depende de la localización del receptor. Los fabricantes utilizan técnicas de filtrado para minimizar sus efectos que pueden dar errores de hasta varios metros. (3,8).

2.1.5.5 Bloqueos de señal.

Obstáculos como árboles, pendientes o edificaciones pueden reducir la cantidad de satélites disponibles y afectar la estabilidad del posicionamiento.

2.1.5.6 Errores del receptor.

La calidad del hardware y la precisión de los algoritmos de cálculo influyen en la exactitud de la posición obtenida.

2.1.5.7 La distribución de los satélites en el cielo.

La distancia entre el satélite y el receptor no se conoce con total precisión, sino que tiene un margen de error debido a diversos factores mencionados anteriormente. Esta distancia, afectada por dichos errores, se denomina pseudodistancia. Al calcular la intersección de las esferas correspondientes a varios satélites, como se explica en la sección 2.1.2, la incertidumbre en las mediciones genera un área de posible ubicación del receptor. Cuando los satélites están uniformemente distribuidos en el cielo, esta área de incertidumbre es mucho menor que cuando los satélites están agrupados en una misma zona del cielo. Este efecto se conoce como *dilution of precision* (DOP).

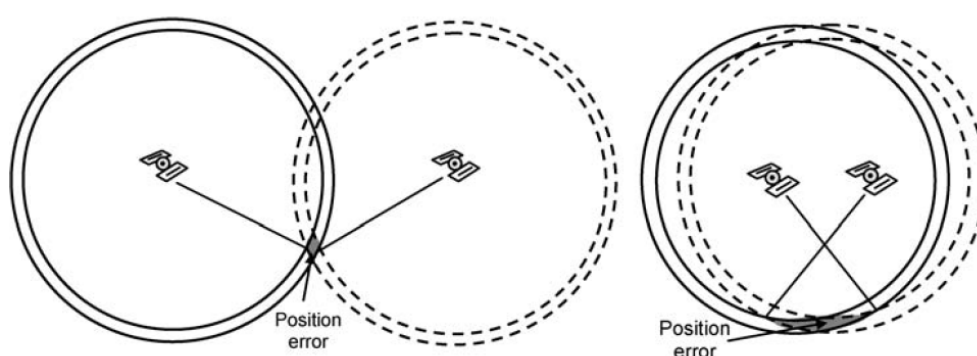


Figura 2.3: Efecto de la distribución de los satélites en el cielo para el cálculo de la posición (1).

2.1.6 Técnicas de corrección de errores

Todos los errores vistos anteriormente afectan a la precisión en el posicionamiento. A lo largo de los años se han ido desarrollando técnicas de corrección que minimicen o corrijan el efecto de todos esos errores, desde modelos matemáticos hasta el uso de estaciones de referencia y sistemas de posicionamiento diferencial. En este apartado, se presentan las principales técnicas de corrección que permiten mejorar la fiabilidad y exactitud de los datos GNSS.

2.1.6.1 Multifrecuencia.

Los receptores multifrecuencia se utilizan principalmente para eliminar los errores atmosféricos. La velocidad de propagación de las señales de los satélites GNSS a través de la atmosfera varía con la frecuencia, por lo que afecta a las distintas señales GNSS de forma diferente. Al comparar los retrasos de dos señales GNSS de distintas frecuencias el receptor puede corregir el impacto de los errores atmosféricos (9).

2.1.6.2 Multiconstelación.

El uso de múltiples constelaciones GNSS aumenta la cantidad de satélites visibles, lo que aumenta la disponibilidad de las señales en cualquier momento y ubicación, mejora la distribución espacial de los satélites (*dilution of precision*) y se minimizan los efectos de obstrucciones causadas por edificios, montañas u otros obstáculos. También se reduce el tiempo de adquisición de la señal, permitiendo que el receptor obtenga una solución de posicionamiento más rápida y precisa (9).

2.1.6.3 DGNSS.

En DGNSS (*Differential GNSS*) se utiliza una estación base en tierra cuya posición es conocida para enviar correcciones al receptor. La estación base calcula su posición a partir de los satélites al igual que hace el receptor. Como la posición de la base es conocida, esta es capaz de calcular el error en la posición. La base envía el error que ha calculado al receptor para que lo aplique y corrija su posición.

El principio de DGNSS se basa en que, cuando la distancia entre el receptor móvil y la estación de referencia es relativamente corta, hasta unas pocas decenas de kilómetros, ciertos errores, incluidos los retrasos atmosféricos, la órbita del satélite y los errores del reloj del satélite, se correlacionan espacialmente. Estos errores correlacionados pueden entonces eliminarse eficazmente utilizando técnicas de diferenciación. Otros errores, como el efecto *multipath*, los asociados a la calidad del receptor y los bloqueos de señal, no pueden corregirse mediante DGNSS (10).

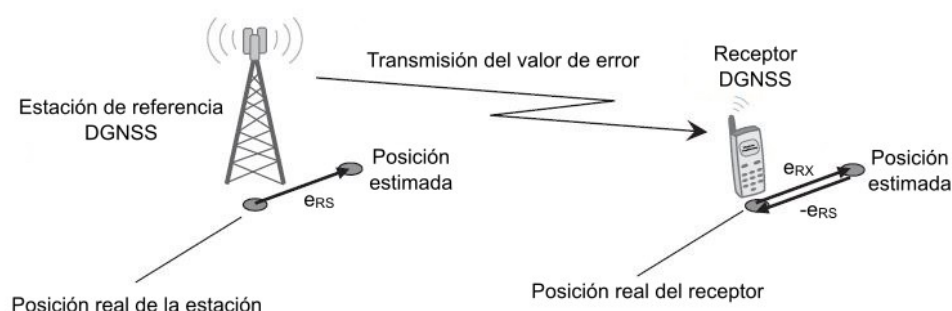


Figura 2.4: Principio de funcionamiento de DGNSS (10).

2.1.6.4 SBAS.

Los sistemas de aumentación basados en satélites (*Satellite-Based Augmentation Systems*, SBAS) están diseñados para mejorar el rendimiento del posicionamiento estándar de los sistemas GNSS. Los SBAS aumentan la precisión del posicionamiento proporcionando correcciones para las principales fuentes de error. Además, ofrecen límites de confianza asegurados sobre estas correcciones, lo que permite a los usuarios establecer márgenes de integridad en sus errores de posición.

Un sistema SBAS utiliza una red de estaciones terrestres para monitorear continuamente el rendimiento de los satélites de navegación. Las estaciones de referencia envían sus mediciones a estaciones maestras, donde se determinan las correcciones diferenciales y los límites de confianza correspondientes. Luego, cada estación maestra procesa estas mediciones y transmite los datos a una estación de enlace ascendente, que a su vez retransmite la información a los usuarios a través de satélites en órbita geoestacionaria. Para garantizar su fiabilidad, cada SBAS cuenta con múltiples estaciones maestras, estaciones de enlace ascendente y satélites geoestacionarios, de modo que pueda seguir operando incluso si falla alguno de sus componentes (11).

Los sistemas SBAS dan servicio a zonas extensas. Existen varios sistemas SBAS según la región a la que ofrecen servicio. Los principales son WAAS (*Wide Area Augmentation System*), gestionado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), administrado por la Agencia de la Unión Europea para el Programa Espacial. Existen otros como QZSS de Japón, SDCM de Rusia o BDSBAS de China y algunos son sistemas gestionados por empresas como es el caso de StarFire, de John Deere o RTX de Trimble (12).

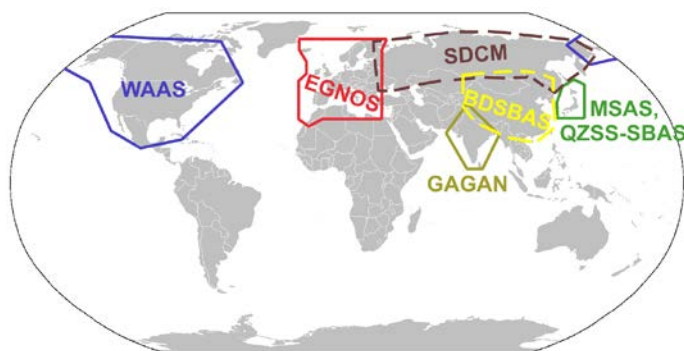


Figura 2.5. Principales sistemas SBAS en el mundo (12).

2.1.6.5 RTK.

RTK (*Real-Time Kinematic*) es una técnica de posicionamiento GNSS que mejora la precisión mediante correcciones en tiempo real. Funciona comparando las señales de un receptor móvil (rover) con las de una estación base fija, que conoce su posición exacta. La estación base mide los errores en las señales GPS y envía correcciones al rover a través de radio o Internet (NTRIP). A diferencia de los receptores GNSS convencionales, que calculan la distancia a los satélites mediante el tiempo de propagación del código PRN modulado sobre la señal portadora, RTK determina la distancia contando el número de ciclos o longitudes de onda de la propia señal portadora. Dado que esta oscila a una frecuencia mucho más alta que el código, permite realizar estimaciones de distancia mucho más precisas. Para lograr esto, se resuelve lo que se conoce como "ambigüedad entera". Si el algoritmo es capaz de resolverla, se obtiene un número entero de ciclos de la señal portadora, lo que

se denomina RTK fijo (RTK *Fixed* o RTK *Fix*). En caso contrario, si no se resuelve la ambigüedad, se obtiene una solución en la que los ciclos no son enteros, lo que se conoce como RTK flotante (RTK *Float*), y la precisión es menor. Una vez hecho esto, solo se necesita ver en qué parte de la fase se encuentra dentro del último ciclo. La capacidad para resolver la ambigüedad entera depende principalmente del número de satélites visibles y de la distancia entre el rover y la base, la cual debe ser menor de unas decenas de kilómetros.

2.1.6.6 PPP (*Precise Point Positioning*).

El Posicionamiento de Punto Preciso (PPP) es un método GNSS que permite obtener posiciones con precisión centimétrica sin necesidad de una estación base. Se basa en la combinación de mediciones de fase portadora y correcciones precisas de efemérides y relojes de satélite.

El PPP utiliza dos fuentes principales de información: observables directos y efemérides mejoradas. Los observables incluyen la fase portadora, que refina la posición una vez que otros métodos la han aproximado, y el retardo diferencial entre señales de distintas frecuencias, lo que permite modelar y reducir el error ionosférico. Las efemérides mejoradas provienen de una red global de estaciones de referencia y son más precisas que las transmitidas por los satélites. (11,13).

2.1.6.7 Otras tecnologías: GLIDE.

GLIDE es una tecnología desarrollada por la empresa Novatel con el propósito de ofrecer una mejora en el rendimiento del posicionamiento relativo, particularmente para aplicaciones como la agricultura de precisión, donde la precisión del posicionamiento entre pasadas es básica. Su finalidad es proporcionar una transición suave en la posición, con una diferencia de menos de 1 cm entre posiciones consecutivas y una reducción en los saltos de posición (14).

Existen otras tecnologías similares de otras marcas de receptores, como e-Dif de Hemisphere o T-DIFF de Harxon.

Aunque estas técnicas han mejorado considerablemente la precisión del GNSS, en aplicaciones dinámicas como el guiado de tractores, su desempeño se optimiza mediante la integración de sensores adicionales como INS/IMU. Estos sensores contribuyen a mantener la estabilidad y continuidad del posicionamiento, permitiendo compensar eventuales pérdidas de señal o variaciones bruscas en la trayectoria.

2.2 INS

Un Sistema de Navegación Inercial, o INS por sus siglas en inglés (*Inertial Navigation System*) es un sistema basado en un ordenador y sensores de movimiento que es capaz de calcular la posición, velocidad y orientación de un objeto sin necesidad de referencias externas (15). El principio básico de funcionamiento de la navegación inercial se basa en la ley del movimiento de Newton, que establece que un objeto permanecerá en estado de reposo o en movimiento uniforme a menos que una fuerza externa actúe sobre él. La aplicación de cualquier fuerza externa sobre el objeto generará una aceleración proporcional a esa fuerza, la cual puede ser medida (7).

Estos sistemas se fundamentan en sensores que miden la aceleración y la velocidad de giro del objeto. La unidad encargada de recopilar estas mediciones se denomina Unidad de Medición Inercial

(IMU, *Inertial Measurement Unit*), la cual está compuesta, comúnmente, por tres acelerómetros dispuestos perpendicularmente entre sí en los tres ejes, encargados de medir la aceleración y por tres giróscopos, también dispuestos perpendicularmente entre sí, que miden la velocidad angular del objeto.

Con estos sensores, una IMU puede medir con precisión su movimiento relativo en el espacio tridimensional. El INS utiliza estas mediciones para calcular la posición y la velocidad, además de proporcionar una solución angular en los tres ejes. Esta solución angular se traduce en una solución de actitud local (balanceo, cabeceo y acimut), que complementa la información de posición y velocidad (16).

Estos principios permiten que un INS pueda estimar el movimiento de un objeto a partir de las fuerzas y aceleraciones medidas, sin depender de señales externas como las de los sistemas GNSS. Sin embargo, debido a la acumulación de errores en los sensores, es común que los sistemas inerciales se combinen con otras fuentes de navegación, como el GPS, para mejorar la precisión a largo plazo.

2.2.1 Sistemas de referencia

Los Sistemas de Referencia en un Sistema de Navegación Inercial son fundamentales para definir la posición, velocidad y orientación de un objeto en movimiento. Existen varios sistemas de referencia utilizados en la implementación de un INS, entre los más importantes se encuentran:

2.2.1.1 Sistema de coordenadas *Earth Centered Inertial* (ECI o *i-frame*)

Este sistema está centrado en el centro de masas de la Tierra y no rota ni acelera respecto a las estrellas fijas. El eje Z es paralelo al eje de giro de la Tierra, el eje X es perpendicular al eje Z y apunta hacia el Equinoccio Vernal y el eje Y es perpendicular a los ejes X y Z y apunta en la dirección que completa un sistema dextrógiro (7,8,11). La Figura 2.6 representa estos ejes en azul y con el superíndice *i*.

2.2.1.2 Sistema de coordenadas *Earth Centered Earth Fixed* (ECEF o *e-frame*)

Este sistema está centrado en el centro de masas de la Tierra y sus ejes rotan con ella. El eje Z es paralelo al eje de giro de la Tierra, el eje X es perpendicular al eje Z y apunta hacia el Meridiano de Greenwich y el eje Y es perpendicular a los ejes X y Z y apunta en la dirección que completa un sistema dextrógiro (7,8,11). La Figura 2.6 representa estos ejes en negro y con el superíndice *e*.

2.2.1.3 Sistema de coordenadas de navegación (*n-frame*)

Este sistema tiene su origen en el centro de masas de la IMU y sus ejes rotan junto a la Tierra. Existen dos configuraciones habituales según la orientación del eje Z. En ambas, el eje X apunta hacia el norte, el eje Y apunta hacia el este y el eje Z apunta en la vertical. Si el eje Z apunta hacia arriba, el sistema se denomina ENU (*East, North, Up*); si por el contrario apunta hacia abajo, se llama NED (*North, East, Down*) (7,8,11). La Figura 2.6 representa estos ejes en rojo y con el superíndice *n*.

2.2.1.4 Sistema de coordenadas cuerpo (*body* o *b-frame*)

Este sistema tiene su origen en el centro de masas de la IMU y sus ejes están alineados con el vehículo. El eje X apunta a la derecha del vehículo, el eje Y apunta a la parte delantera y el eje Z es perpendicular a los ejes X e Y y apunta en la dirección que completa un sistema dextrógiro (7,8,11). La Figura 2.6 representa estos ejes en verde y con el superíndice *b*.

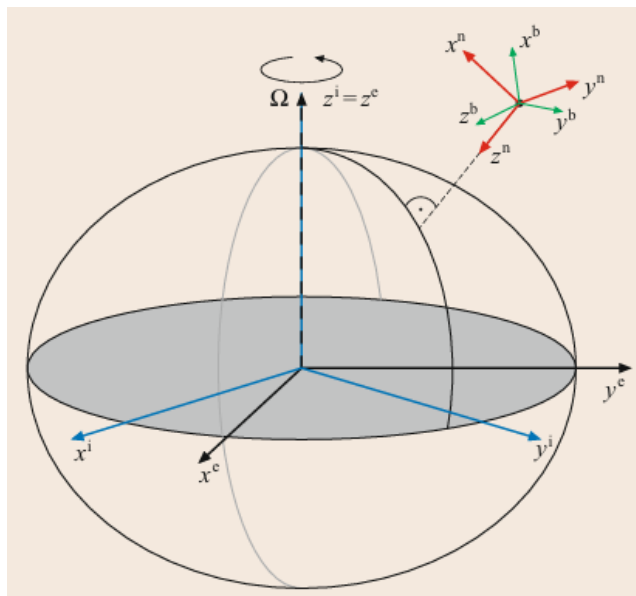


Figura 2.6. Posición relativa y orientación de cada uno de los sistemas de coordenadas, con los superíndices correspondientes (11).

2.2.2 Acelerómetros

Los acelerómetros son sensores que miden aceleraciones, es decir, cambios de velocidad a lo largo del tiempo. La base del funcionamiento de un acelerómetro radica en la segunda ley de Newton, $F = m \cdot a$, donde una fuerza aplicada a una masa genera una aceleración.

Tradicionalmente, los acelerómetros han evolucionado desde los modelos mecánicos, basados en el sistema masa-resorte, hasta los más modernos de estado sólido, que emplean distintos principios físicos para medir aceleraciones, y los MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*). A continuación, se describen los principales tipos de acelerómetros.

2.2.2.1 Acelerómetros mecánicos

Los acelerómetros mecánicos son los más antiguos y utilizan un sistema basado en el principio masa-resorte. Consisten en una masa de prueba unida a un resorte dentro de una carcasa. Existen dos tipos de acelerómetros mecánicos en función de la forma de operar:

- **Acelerómetros de bucle abierto:** Cuando la carcasa se somete a una aceleración, la masa tiende a permanecer en su posición inicial debido a la inercia, lo que provoca su desplazamiento con respecto a su punto de equilibrio. Este desplazamiento se mide para determinar la aceleración aplicada. Estos acelerómetros son más simples pero menos precisos y estables que los de bucle cerrado (11).

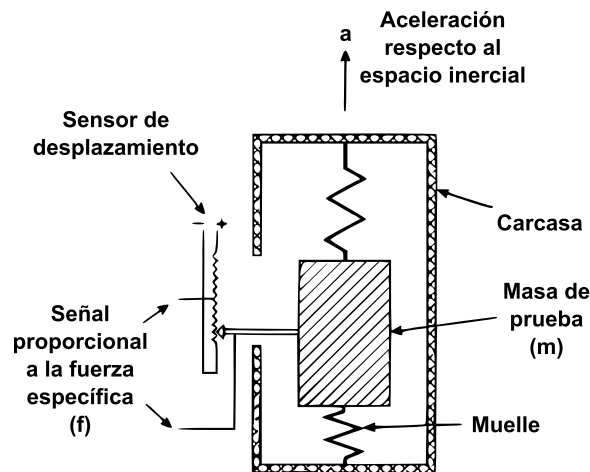


Figura 2.7. Modelo básico de un acelerómetro (17).

- **Acelerómetros de bucle cerrado:** Incorporan un sistema de realimentación que aplica una fuerza electromagnética para mantener la masa en su posición de equilibrio. Dicha fuerza es proporcional a la aceleración a la que ha sido sometido el acelerómetro, lo que permite determinarla con precisión. Son más precisos y estables, lo que los hace ideales para sistemas de navegación inercial (11).

2.2.2.2 Acelerómetros de Estado Sólido

Los acelerómetros de estado sólido son los que no dependen de un sistema mecánico tradicional masa-resorte, sino que aprovechan otras propiedades físicas para medir aceleraciones. Estos dispositivos han evolucionado en las últimas décadas, ofreciendo sensores más pequeños, confiables y resistentes.

Entre los principales tipos de acelerómetros de estado sólido se encuentran:

- **Acelerómetros vibratorios:** Utilizan dos láminas de cuarzo que vibran a una frecuencia específica. La aceleración se mide a través del cambio de frecuencia entre ambos debido a la compresión o tensión de las láminas.
- **Acelerómetros de onda acústica superficial (SAW).** Utilizan una viga en voladizo con una masa libre en un extremo y el otro fijado rígidamente a la carcasa que resuena a una frecuencia específica. Cuando se aplica una aceleración, la viga se flexiona, causando un cambio en la frecuencia proporcional a la tensión aplicada. Midiendo esta variación de frecuencia, se determina la aceleración.
- **Acelerómetros resonantes de silicio:** Basados en la variación de la frecuencia de barras resonantes al aplicarles una aceleración. Son altamente sensibles y adecuados para aplicaciones de alta precisión.

2.2.2.3 Acelerómetros MEMS

Los acelerómetros MEMS son acelerómetros de silicio fabricados mediante diferentes técnicas como el micromecanizado de superficies, el grabado y los procesos de fotolitografía usadas en la fabricación de dispositivos semiconductores para la electrónica. Utilizan los mismos principios que los sensores mecánicos y de estado sólido pero a escala micrométrica. Los acelerómetros mecánicos

miden el desplazamiento de una masa suspendida y los acelerómetros de estado sólido miden cambios de frecuencia en elementos vibratorios.

Los acelerómetros MEMS son pequeños, ligeros y tienen bajo consumo de energía (18).

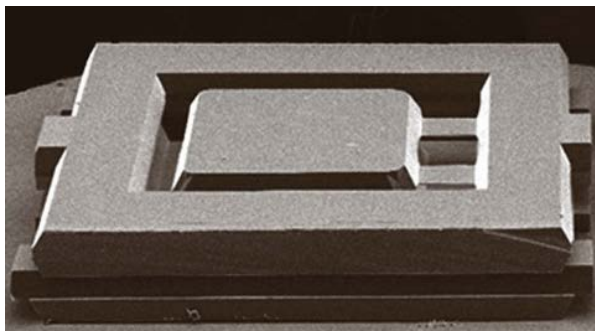


Figura 2.8. Acelerómetro MEMS mecánico (11).

2.2.3 Giróscopos

Los giróscopos o giroscopios son sensores que miden el ángulo o la velocidad angular. A lo largo de la historia, los giróscopos han ido evolucionando desde los sensores mecánicos, que fueron los primeros en ser inventados, hasta los giróscopos ópticos y MEMS. Existen otras variedades de giróscopos, pero los principales son los siguientes.

2.2.3.1 Giróscopos Mecánicos

El primer giróscopo fue inventado en 1852 por el físico Léon Foucault (19). Los primeros giróscopos eran puramente mecánicos y basaban su funcionamiento en el principio de conservación del momento angular. Estaban compuestos por un rotor (una masa en rotación) que podía girar alrededor de un eje. Este rotor estaba montado sobre dos *gimbals*, los cuales, a su vez, estaban fijados a una base. Esta configuración proporcionaba tres grados de libertad al rotor, permitiéndole mantener su orientación incluso cuando la base giraba en cualquier dirección. Para medir la orientación del dispositivo, era posible registrar los ángulos de los *gimbals* mediante sensores de posición angular.

Sin embargo, el contacto entre las partes móviles generaba fricción, lo que provocaba errores en el mantenimiento de la orientación con el tiempo. Para minimizar este problema, se empleaban cojinetes de alta precisión y lubricantes especiales, lo que, a su vez, incrementaba el costo del dispositivo.

2.2.3.2 Giróscopos Ópticos

Para evitar los problemas de fricción y minimizar el tamaño y costo de los giróscopos mecánicos, se desarrollaron los giróscopos ópticos, como los giróscopos de fibra óptica (FOG) y los giróscopos láser de anillo (RLG). Los giróscopos ópticos no contienen partes móviles, lo que mejora la fiabilidad y reduce el mantenimiento.

En un giróscopo de fibra óptica, la medición de la velocidad angular se basa en el efecto Sagnac, que ocurre cuando dos haces de luz viajan a través de una bobina de fibra óptica en direcciones opuestas. Si el giróscopo experimenta una rotación, los haces de luz recorrerán trayectorias de diferentes longitudes, lo que provoca un desplazamiento de fase que provoca interferencia entre los haces, resultando en un haz combinado cuya intensidad depende de la velocidad angular. Por lo

tanto, es posible medir la velocidad angular observando la intensidad del haz combinado. Por otro lado, el giróscopo láser de anillo también se basa en el efecto Sagnac, pero utiliza un camino cerrado de espejos en lugar de fibra óptica (11).

Los giróscopos ópticos no requieren partes móviles y tienen un tiempo de inicio corto. Además, su precisión depende de la longitud del trayecto de luz, lo que puede estar limitado por el tamaño del dispositivo. A pesar de esto, son muy útiles en aplicaciones que requieren alta precisión, como en sistemas de navegación inercial para aviones y satélites.

2.2.3.3 Giróscopos MEMS

Los giróscopos MEMS son la evolución más reciente en la tecnología de giróscopos. Los sensores MEMS utilizan técnicas de microfabricación para crear pequeños dispositivos que incluyen componentes mecánicos en una estructura de silicio. A diferencia de los giróscopos ópticos y mecánicos, los giróscopos MEMS no requieren componentes grandes y son relativamente baratos de fabricar.

El principio de funcionamiento de los giróscopos MEMS se basa en el efecto Coriolis, que describe cómo una masa en movimiento experimenta una fuerza cuando está sujeta a una rotación. En los giróscopos MEMS, un pequeño elemento vibratorio es afectado por el efecto Coriolis cuando el dispositivo gira, lo que genera una vibración secundaria que se puede medir para calcular la velocidad angular (11).

Una de las grandes ventajas de los giróscopos MEMS es su tamaño reducido, bajo peso y bajo consumo de energía. Sin embargo, la principal desventaja de estos dispositivos es que su precisión aún está por debajo de la de los giróscopos ópticos y mecánicos. Sin embargo, los avances en la tecnología MEMS están permitiendo mejorar gradualmente la precisión y aumentar su aplicabilidad en sistemas de navegación de bajo costo, como en teléfonos móviles, drones y vehículos autónomos.

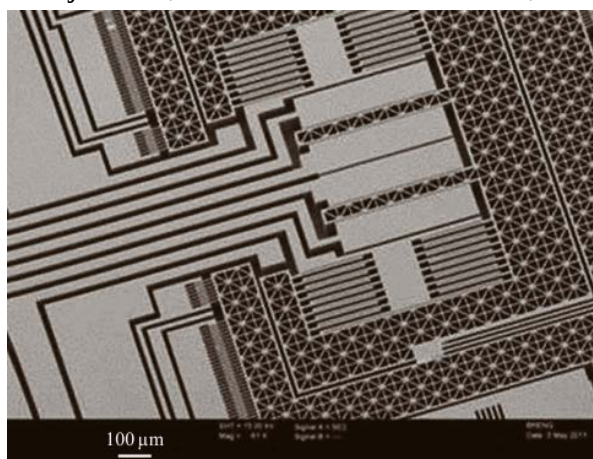


Figura 2.9. Giróscopo MEMS (11).

2.2.4 Errores de los sensores.

Todos los sensores están sujetos a errores que limitan la precisión con la que pueden medir sus correspondientes magnitudes. En este apartado se describen brevemente los errores que afectan a los sensores de los sistemas inerciales, como son los acelerómetros y giróscopos.

- *Bias* o sesgo. Es la salida del sensor que no tiene correlación con la entrada. Este error puede cambiar ligeramente con el tiempo debido a factores como la temperatura. Esta variación del *bias* con el tiempo se conoce como *bias drift*. Este error se puede estimar tomando un promedio a largo plazo de la salida del sensor mientras está en reposo. Una vez conocido el *bias*, puede compensarse fácilmente restándolo de la salida (7,8,18).
- Factor de escala. Es la relación entre el cambio en la salida medida y un cambio en la entrada aplicada. Generalmente, los errores del factor de escala son deterministas y pueden corregirse mediante calibración (7).
- Ruido aleatorio. Es un error aleatorio que aparece en la salida y solo puede eliminarse mediante modelos estocásticos. Es un ruido blanco de media cero y desviación estándar que crece con la raíz cuadrada del tiempo y que normalmente es modelado como un proceso de Gauss Markov de 1er orden. Este ruido es bastante importante en los cálculos de los giróscopos, sobre todo (8).
- Repetibilidad. Es la capacidad de un sensor para dar el mismo valor ante diferentes medidas.
- Estabilidad: Es la capacidad del sensor de proporcionar la misma salida al medir una entrada constante (8).

Los errores de *bias* y del factor de escala pueden eliminarse mediante calibración. En el caso de los acelerómetros, cuando la unidad está en reposo, la única aceleración medida es la debida a la gravedad. Por lo tanto, conociendo el valor de la gravedad, es posible corregir tanto el *bias* como el factor de escala, ya que la relación entre la señal medida y la aceleración real permite determinar la ganancia asociada al factor de escala. Para los giróscopos, el *bias* puede corregirse calculando la media de las mediciones obtenidas en reposo. El factor de escala, por su parte, se determina haciendo girar el dispositivo a una velocidad conocida y comparando la medición con el valor esperado.

Esta compensación puede realizarse en todo el rango de temperaturas del dispositivo, utilizando tablas de corrección que, en muchos casos, son proporcionadas por el propio fabricante (8).

2.2.5 Navegación inercial

La navegación inercial es un método de navegación autónomo basado en la medición de aceleraciones y velocidades angulares mediante sensores inerciales. Estos sensores, generalmente organizados en una IMU, permiten determinar la posición y orientación de un objeto en relación con un punto de referencia inicial. Gracias a su capacidad de operar sin necesidad de señales externas, los sistemas INS son ampliamente utilizados en aplicaciones donde la disponibilidad de otras fuentes de navegación, como el GNSS, puede ser limitada o inexistente.

Un INS típico está compuesto por tres acelerómetros y tres giróscopos dispuestos ortogonalmente. Los acelerómetros miden la aceleración específica del sistema, mientras que los giróscopos registran los cambios en la orientación del objeto. Dado que un acelerómetro mide la fuerza específica, es posible estimar la velocidad y la posición mediante integraciones sucesivas. Sin embargo, para que estos valores sean útiles en navegación, deben relacionarse con un marco de referencia específico. En función de los sistemas de referencia en el que operan los giróscopos y los acelerómetros, existen dos categorías de IMUs que se describen continuación: los sistemas con plataforma estabilizada (*stable platform systems*) y los sistemas *strapdown* (11).

En los sistemas de plataforma estabilizada, los sensores inerciales están montados en una estructura móvil, a través de *gimbals*, que se mantiene alineada con el sistema de referencia inercial mediante un conjunto de motores de control y giróscopos mecánicos. Los giróscopos montados en la plataforma detectan cualquier rotación de la misma. Estas señales se envían a motores de par, los cuales giran los *gimbals* para cancelar dichas rotaciones, manteniendo así la plataforma alineada con el marco de referencia. Para rastrear la orientación del dispositivo, los ángulos entre los *gimbals* adyacentes pueden leerse mediante sensores de detección de ángulo (*angle pick-offs*). Esta alineación permite integrar directamente las salidas de los acelerómetros para obtener la velocidad y la posición. El algoritmo de navegación inercial de plataforma estabilizada se muestra en la Figura 2.10 (8,18).

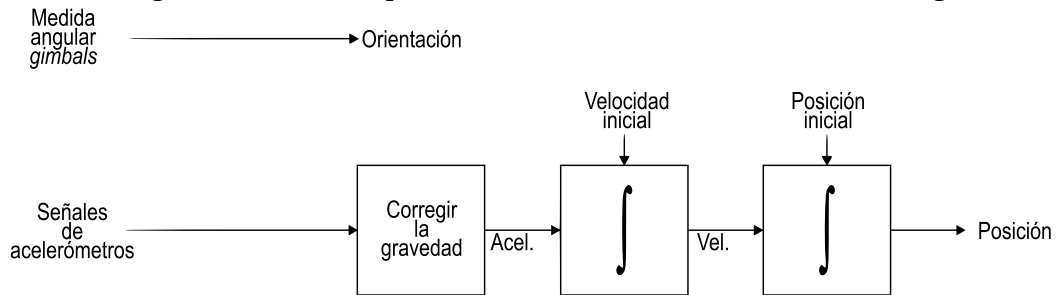


Figura 2.10. Algoritmo de navegación inercial para sistemas de plataforma estabilizada (18).

Estos sistemas suelen ser voluminosos y mecánicamente complejos, lo que los hace menos adecuados para aplicaciones en las que el peso y el tamaño son factores críticos.

Por otro lado, los sistemas *strapdown* han ganado popularidad debido a su menor costo, peso y complejidad mecánica. En esta configuración, los sensores están montados rígidamente en el objeto o vehículo en movimiento, lo que significa que sus mediciones se realizan en el marco de referencia del cuerpo (*body-frame*). Para convertir estas mediciones al marco de referencia de navegación, es necesario aplicar transformaciones basadas en las rotaciones detectadas por los giróscopos. A estas ecuaciones se las conoce como ecuaciones de mecanización de la IMU. Aunque este enfoque elimina la necesidad de mecanismos de estabilización, introduce una mayor complejidad computacional, ya que requiere la implementación de algoritmos de integración y compensación de errores en tiempo real. El algoritmo de navegación inercial para sistemas *strapdown* se muestra en la Figura 2.11 (8,18).

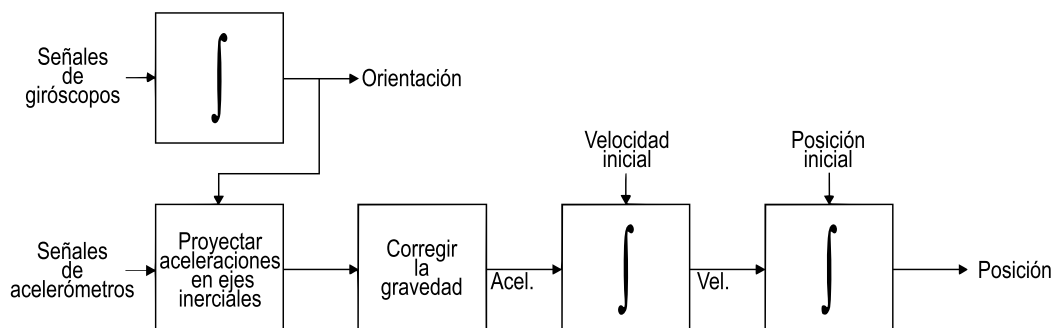


Figura 2.11. Algoritmo de navegación inercial para sistemas *strapdown* (18).

2.3 Integración GNSS/INS

Los sistemas vistos hasta ahora, GNSS e INS, tienen ciertas limitaciones cuando operan de manera autónoma en el guiado de vehículos. En el caso del GNSS, la navegación se vuelve poco fiable o incluso imposible cuando la visibilidad directa hacia los satélites se ve bloqueada por obstáculos, produciéndose pérdidas de señal que pueden dejar sin datos de posición durante largos periodos de tiempo haciendo inviable el control del vehículo.

Por otro lado, el INS enfrenta errores derivados de las limitaciones de sus sensores. En primer lugar, un INS proporciona únicamente una solución relativa a partir de un punto de partida inicial. Este punto de partida inicial debe ser proporcionado al INS. En segundo lugar, y más crítico, las mediciones de alta frecuencia proporcionadas por la IMU incluyen varias fuentes de error. Dependiendo de la calidad de la IMU, estos errores pueden ser bastante grandes en relación con las mediciones reales que se registran. Dado que la navegación con una IMU implica la integración de cientos o miles de muestras por segundo, los errores se acumulan progresivamente, provocando una desviación rápida de la posición real si no se aplican correcciones.

Proporcionar una referencia externa al INS, como una posición derivada de GNSS, le permite estimar los errores en las mediciones de la IMU utilizando un filtro matemático y mitigar su efecto.

Esa referencia externa puede proporcionarse de manera bastante eficaz mediante el GNSS, que proporciona un conjunto absoluto de coordenadas que se puede utilizar como punto de partida inicial y proporciona posiciones y velocidades continuas que se utilizan para actualizar las estimaciones del filtro INS. Cuando el GNSS se ve comprometido debido a obstrucciones de la señal, el sistema INS puede seguir proporcionando una navegación eficaz durante períodos de tiempo más prolongados.

De este modo, cuando se combinan GNSS e INS, las dos técnicas se potencian entre sí para proporcionar una solución de navegación completa. Cuando las condiciones GNSS son buenas (línea de visión a varios satélites), el receptor GNSS proporciona la posición y la hora precisas al sistema de navegación. Cuando las condiciones GNSS empeoran, el INS proporciona la posición y la navegación hasta que las condiciones GNSS mejoran (16).

2.3.1 Filtro de Kalman.

Los filtros que se utilizan para la integración de GNSS e INS son filtros de Kalman o variaciones de estos. El filtro de Kalman es un algoritmo que sirve para estimar el estado de un sistema dinámico lineal a partir de observaciones ruidosas, de forma que minimiza el error cuadrático medio. El algoritmo funciona mediante un proceso de dos fases: una fase de predicción y una fase de actualización. En la fase de predicción, el filtro genera estimaciones de las variables de estado actuales, incluyendo sus incertidumbres. En la fase de actualización, una vez observado el resultado de la siguiente medición, se actualizan las estimaciones mediante un promedio ponderado, otorgando mayor peso a las estimaciones con mayor certeza. Estas fases se repiten de manera recursiva para cada nueva muestra.

Existen variantes para sistemas no lineales como por ejemplo el filtro de Kalman extendido (20).

2.3.2 Tipos de integración.

La integración de datos de INS y GPS puede realizarse mediante varios métodos. El principio fundamental de todos los métodos de integración entre INS y GNSS es que la IMU proporciona la trayectoria de referencia, mientras que el GPS actúa como sistema de actualización. Esto se debe principalmente a que la frecuencia de medición del INS es considerablemente mayor que la del GNSS. La principal diferencia entre los métodos de integración radica en el flujo de datos. Algunos comparten los mismos datos, como los datos brutos de INS y GNSS dentro de un filtro común, mientras que otros procesan los datos de forma independiente en filtros separados. Además, algunos métodos incluyen retroalimentación para mejorar el rendimiento, mientras que otros no (8).

2.3.2.1 Integración Loose

El método de integración *Loose* (*Loose integration*) emplea dos filtros de Kalman independientes: uno para las mediciones del GNSS y otro para las mediciones del INS.

El receptor GNSS procesa las señales satelitales observadas para calcular la posición y la velocidad. Por otro lado, el INS utiliza su vector de estado para, a partir de las ecuaciones de mecanización, estimar la posición y la velocidad. Un Filtro de Kalman Extendido emplea las diferencias entre estos valores junto con modelos de error para estimar el estado de error. Estas estimaciones de error se retroalimentan al INS para corregir su solución de navegación (11).

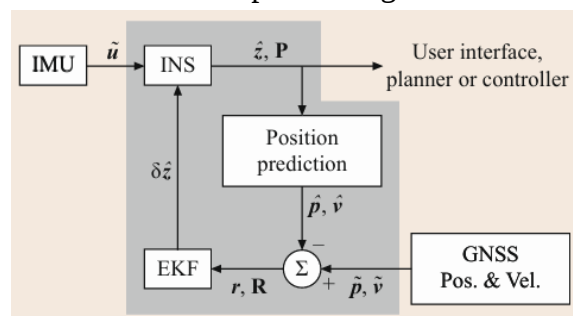


Figura 2.12. Diagrama para la integración *Loose* (11)

La ventaja principal del método de integración *Loose* es su simplicidad en la implementación y su robustez, ya que si uno de los sensores (INS o GNSS) falla, el otro sensor aún proporciona una solución.

La principal desventaja de la integración *Loose* es que no es posible actualizar las mediciones desde el filtro GPS cuando la cobertura de satélites es deficiente (menos de cuatro satélites). Esto no ocurre con el método de integración *Tight*, lo que explica por qué este último suele ofrecer mejores resultados (7).

2.3.2.2 Integración Tight

El método de integración *Tight* emplea un único filtro de Kalman. En este método, el receptor GNSS rastrea las señales satelitales para determinar las mediciones de pseudodistancia, fase de portadora y otros datos como datos de efemérides, mediciones Doppler e indicadores de calidad de señal. Paralelamente, el INS emplea su estado estimado, los datos de efemérides y las ecuaciones que describen las órbitas satelitales para predecir la pseudodistancia, la fase de portadora y la medición Doppler. El Filtro de Kalman Extendido compara estas predicciones con las mediciones del GNSS,

utilizando las diferencias para estimar el estado de error. Estas estimaciones se retroalimentan al INS para corregir su solución de navegación (11).

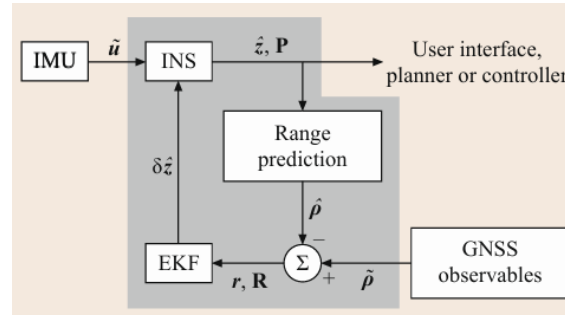


Figura 2.13. Diagrama para la integración Tight (11)

La principal ventaja de la integración *Tight* es que permite actualizar el INS incluso cuando la cobertura de satélites es deficiente (menos de cuatro satélites). Por esta razón, la integración *Tight* se emplea principalmente en entornos donde es común que la señal del GNSS se interrumpa ocasionalmente. Las desventajas principales radican en que el vector de estado aumenta de tamaño debido a la incorporación de un único filtro de Kalman que maneja tanto las mediciones del INS como las del GNSS. Esto conlleva tiempos de procesamiento más largos (7).

2.3.2.3 Integración Ultra-Tight.

Este método combina el INS y el GNSS proporcionando actualizaciones en ambas direcciones. El INS utiliza su estado estimado, junto con los datos de efemérides satelitales y las ecuaciones que describen las órbitas de los satélites, para predecir la pseudodistancia, la fase de portadora y las mediciones Doppler. Estas predicciones se inyectan en los algoritmos de rastreo de fase de portadora y código del receptor GNSS. Los errores en la fase de portadora y el código del receptor se introducen en el Filtro de Kalman Extendido (EKF), el cual estima el estado de error y lo retroalimenta al INS para corregir los errores estimados en el sistema (11).

Para su implementación, se requiere acceso al firmware del receptor GPS, por lo que su uso está limitado principalmente a los fabricantes de estos dispositivos.

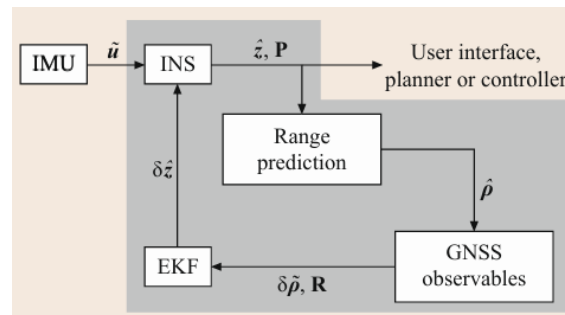


Figura 2.14. Diagrama para la integración Ultra-Tight (11).

2.4 Materiales empleados en el estudio

Una vez vistos los fundamentos teóricos de la tecnología GNSS, INS y de su integración, se va a realizar una breve descripción de las antenas GNSS utilizadas en el estudio y del sistema de autoguiado.

Para las pruebas se han utilizado tres modelos de antena y un receptor base RTK. Los modelos de antenas son: Navilock NL-8022MP, Novatel Smart2 y Harxon TS108PRO. El receptor base es un Harxon TS103. El sistema de autoguiado es de la marca tractorDrive.

2.4.1 Navilock NL-8022MP

Navilock NL-8022MP es una antena de bajo costo multi constelación y de una sola frecuencia que procesa las señales L1 de GPS, L1 de GLONASS, B1 de BeiDou, E1 de Galileo y L1 de QZSS. Puede funcionar con sistemas de aumentación SBAS como WAAS, EGNOS, QZSS y MSAS. Puede funcionar a una frecuencia de hasta 115200 baudios y ofrece datos de posicionamiento con una frecuencia de hasta 10 Hz en el modo multiconstelación y de hasta 18 Hz funcionando solo con una constelación. Puede recibir señales con una sensibilidad de -167 dBm.

Respecto a las precisiones ofrecidas por la antena, el fabricante indica que tiene una precisión de 2.5 metros CEP (Probabilidad de Error Circular) y de 2 metros CEP trabajando con los sistemas de corrección SBAS. Estas precisiones podrían ser adecuadas para aplicaciones agrícolas que no requieran una precisión submétrica, como la aplicación de herbicidas o fertilizantes (21).



Figura 2.15. Antena Navilock NL-8022MP (21).

2.4.2 Novatel Smart2

Novatel Smart2 es una antena de medio costo multiconstelación y multifrecuencia que puede procesar las señales L1, L2 y L2C de GPS, E1 y E5b de Galileo, L1 y L2 de GLONASS, B1I, B2I y B2b de BeiDou, y L1 y L2 de QZSS. Puede funcionar con los servicios de aumentación SBAS y ofrece correcciones TerraStar que son correcciones vía satélite de pago. Ofrece precisiones de 1.5 m RMS trabajando en una frecuencia y 1.2 m RMS con doble frecuencia. Con correcciones SBAS ofrece precisiones de 60 cm RMS y con las correcciones TerraStar ofrece precisiones de hasta 2 cm. La antena Smart 2 tiene disponible la tecnología GLIDE explicada en el Capítulo 2.1.6.7. para proporcionar un posicionamiento relativo suave para aplicaciones de agricultura de precisión u otras aplicaciones.

Puede incluir un sistema de compensación del terreno para mejorar el rendimiento de guía y dirección automática para terrenos irregulares y con pendientes para proporcionar automáticamente posiciones corregidas para el cabeceo y el balanceo del vehículo.

Puede funcionar a una frecuencia de 115200 baudios y ofrece datos de posicionamiento con una frecuencia de hasta 20 Hz.

Dispone de varios tipos de conexiones como RS232, Bus CAN y bluetooth (22).



Figura 2.16. Antena Novatel Smart2 (22).

2.4.3 Harxon TS108PRO

Harxon TS108PRO es una antena multiconstelación y multifrecuencia de medio costo capaz de procesar las señales L1, L2 y L5 de GPS, L1 y L2 de GLONASS, B1, B2 y B3 de BeiDou y E1, E5a y E5b de Galileo. Admite correcciones SBAS y puede trabajar con RTK. Ofrece precisiones, según el fabricante, de 1.5 m RMS trabajando en autónomo y de 1 cm + 1 ppm con RTK. Las correcciones RTK se pueden obtener a través de internet (NRTK) a partir de la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia (ERGNSS) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) mediante Bluetooth o mediante 3G/4G o a través de la base TS103 por radio.

Ofrece un servicio similar a GLIDE llamado TDIF para un posicionamiento suave entre pasadas.

Puede funcionar a una frecuencia de 115200 baudios y ofrece datos de posicionamiento con una frecuencia de hasta 10 Hz.

Puede proporcionar información en tiempo real sobre la inclinación para máquinas en terrenos accidentados, lo que facilita a los usuarios mejorar la precisión de posicionamiento mediante un algoritmo de compensación de inclinación (23).



Figura 2.17. Antena Harxon TS108PRO (23).

2.4.4 Harxon TS103 base

Harxon TS103 es un receptor base multiconstelación y multifrecuencia que puede procesar las señales L1, L2 y L5 de GPS; L1, L2 de GLONASS; B1, B2 y B3 de BeiDou y E1, E5a y E5b de Galileo. Puede ofrecer datos de posicionamiento con una frecuencia de hasta 10 Hz.

Ofrece correcciones RTK a una tasa de 1 Hz a través de un enlace de radio (24).



Figura 2.18. Antena base TS103 (24).

2.4.5 Autoguiado tractorDrive

El sistema de autoguiado tractorDrive está compuesto por varios elementos. En primer lugar, el receptor GNSS, encargado de obtener la posición del vehículo. Generalmente, este receptor opera con RTK, lo que permite alcanzar precisiones centimétricas y aplicarse a todo tipo de labores agrícolas. Se coloca en la parte superior de la cabina, cuanto más adelantada mejor.

En segundo lugar, el sistema cuenta con un volante eléctrico, que reemplaza al volante original del tractor. Este volante incorpora un motor eléctrico que se encarga de girarlo automáticamente para dirigir el vehículo con precisión.

Además, el autoguiado incluye una pantalla, en la cual se representan las trayectorias, se delimita el área de la parcela, se muestra el área tratada y se proporcionan otras funciones útiles para la gestión del trabajo en el campo.

Por último, el sistema integra una caja de control, responsable de procesar la información, recibir la posición desde la antena GNSS, generar las trayectorias en la pantalla y controlar el motor del volante para seguir dichas trayectorias con precisión. En su interior, la caja de control incorpora una IMU básica, aunque también es posible añadir inclinómetros externos de mayor precisión para mejorar aún más el rendimiento del sistema en terrenos irregulares (25).



Figura 2.19. Pantalla, motor, caja de control y receptor GNSS del autoguiado tractorDrive (25).

2.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha presentado una visión detallada de los sistemas GNSS, los sistemas de navegación inercial (INS) y su integración para mejorar la precisión y robustez en los sistemas de navegación, incluyendo los sistemas de autoguiado agrícola.

Se ha explicado el funcionamiento de los sistemas GNSS, abordando sus principales fuentes de error y las tecnologías disponibles para su corrección y mejora, como las correcciones diferenciales (DGPS, RTK) y los sistemas de aumentación (SBAS), entre otros.

Por otro lado, se ha analizado el principio de operación de los sistemas INS, describiendo los sensores principales que los componen, acelerómetros y giróscopos, junto con sus errores asociados. También, se han expuesto los distintos tipos de navegación inercial según el sistema de referencia utilizado, así como los principales desafíos que enfrenta la navegación inercial.

Finalmente, se ha abordado la integración entre GNSS e INS, explorando los diferentes niveles de acoplamiento: *Loose*, *Tight* y *Ultra-Tight*. Se ha analizado cómo estas estrategias permiten combinar las ventajas de ambos sistemas, compensando sus debilidades individuales y mejorando el rendimiento global en términos de precisión, disponibilidad y continuidad de la navegación.

Asimismo, se han descrito los receptores GNSS utilizados en el estudio de la precisión en el autoguiado, analizando sus características principales. También se ha detallado el sistema de autoguiado empleado, explicando sus componentes y sus características principales.

Capítulo 3:
Análisis de antenas GNSS para guiado agrícola;
estudio científico del estado del arte

Capítulo 3: Análisis de antenas GNSS para guiado agrícola; estudio científico del estado del arte

En este capítulo se realiza un análisis cronológico de algunos artículos científicos que estudian el uso de receptores GNSS aplicados a la agricultura de precisión para pruebas de guiado. Este estudio se enfoca en la metodología seguida por los autores para evaluar la precisión de los receptores, las tecnologías de corrección aplicadas y los resultados obtenidos en pruebas en dinámico.

Después se realizará un estudio más detallado de algunos artículos que se consideren más relevantes en la aplicación de los receptores GNSS en la agricultura y el estudio de la precisión para las labores agrícolas.

3.1 Análisis cronológico

En 1994, Stafford y Ambler, realizaron un estudio para evaluar varios sistemas GPS y su utilización en tareas agrícolas (26). Probaron tres sistemas de receptores GPS comerciales recibiendo correcciones DGPS desde una estación base a 1 km del campo de pruebas. Las pruebas las realizaron en un campo por el que pasaba una vía de tranvía cuyas coordenadas se conocían. Con el primer sistema realizaron pruebas en estático, monitoreando la posición cada segundo. Obtuvieron una desviación estándar de 1.9 m. Con el segundo sistema realizaron pruebas en dinámico a distintas horas en paralelo a la vía para estudiar la influencia de la situación de los satélites en el cielo (Figura 3.1). El GPS se montó sobre un tractor equipado con un sensor de distancia cuya salida se registraba en un ordenador. El tractor se llevó manualmente. Obtuvieron una desviación estándar de 3.2 m a las 10:00h y de 2.6 m a las 16:00h. Con el último sistema se realizó una prueba dinámica en el momento óptimo de la constelación de satélites obteniendo una desviación estándar de 2.7 m en la dirección este y 1.9 m en dirección norte.

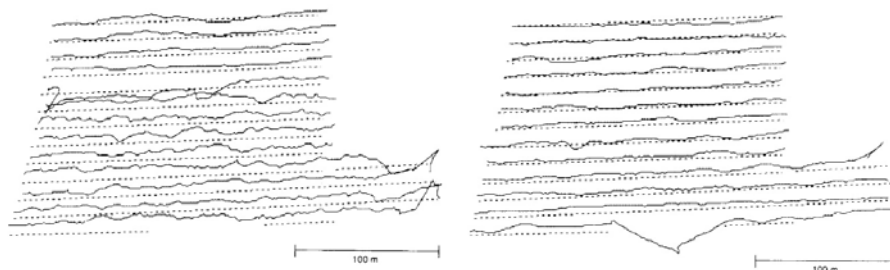


Figura 3.1. Trayectorias seguidas con el segundo sistema DGPS a las 10:00 h a la izquierda y a las 16:00 h a la derecha (26).

En 1996, Borgelt y colaboradores elaboraron un artículo con el objetivo de evaluar el rendimiento del GPS en aplicaciones de agricultura de precisión, comparando los datos del GPS con herramientas de análisis topológico (27). Para las pruebas en estático evaluaron dos equipos DGPS: una antena Novatel y una antena Ashtech. Situaron las antenas base de cada receptor sobre un punto conocido en la misma parcela, previamente localizado a través de un método topográfico. Para las pruebas en estático fueron recopilando datos de distintos puntos de muestreo a lo largo de una parcela. Tomaron datos durante 60 segundos (6 mediciones separadas 10 segundos) en cada uno de los puntos de muestreo. Los receptores estaban en un trípode y los desplazaban de un punto de medición a otro. Se utilizó un instrumento topográfico (teodolito) para proporcionar otra medición de posición para la comparación con los datos GPS. Los datos del GPS se posprocesaron usando métodos de procesamiento de código y de fase de portadora. Para la antena Ashtech obtuvieron errores medios de 0.16 m respecto a la posición del teodolito y para la Novatel, errores medios de 0.146 m. Para las pruebas en dinámico utilizaron otro receptor Ashtech que recibía señales de corrección DGPS de las estaciones GPS de la guardia costera de EE.UU. a 240 km de distancia. Se montó en una cosechadora. Se usó el sensor de velocidad instalado de fábrica en la cosechadora para determinar la distancia recorrida. Se obtuvo un error medio de 0.25 m en la posición.

En 1999, van Zuydam y colaboradores, publicaron un artículo en el que proponían un sistema de corrección para el implemento de un tractor, el cual, a partir de los datos obtenidos por un GPS RTK situado en el propio implemento, un ordenador para calcular la trayectoria de referencia y un actuador, sería capaz de desplazar el implemento lateralmente y corregir la trayectoria del implemento independientemente de la forma de conducir el tractor, de tal manera que en vez de actuar sobre la dirección del tractor se actuaría sobre el desplazamiento lateral del implemento mediante un mecanismo hidráulico (28). En el estudio realizaban pruebas sobre una antena RTK para ver la precisión de la misma y ver la viabilidad de la propuesta. En las pruebas, la antena base estaba situada a 80 m en un punto con coordenadas conocidas. Para ver la precisión de la antena RTK se realizaron tres pruebas: En la primera prueba tomaron datos en estático durante dos minutos y medio a 5 Hz. Obtuvieron una varianza de $7.38 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ en el eje horizontal y $1.22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ en el eje vertical. En la segunda prueba hicieron un análisis dinámico, a lo largo de una trayectoria circular a 11 rpm con radios de 78 y 39 cm durante 80 segundos. Las desviaciones estándar fueron $2.64 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ y $3.43 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, respectivamente para cada uno de los radios. En la tercera prueba se montó la antena dos metros por detrás del eje trasero de un tractor, que se llevó sobre unas vías para simular la desviación del implemento respecto la trayectoria seguida por el tractor. La desviación estándar fue de 1.84 cm.

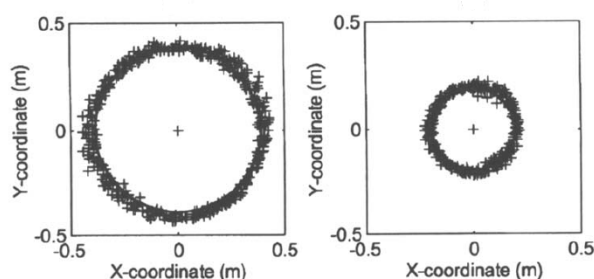


Figura 3.2. Resultados del análisis en dinámico en trayectorias circulares de radios 78 cm y 39 cm, respectivamente (28).

En 2006, Peter Dunn y colaboradores, publicaron un artículo en el que discutían qué modelos estadísticos eran los más adecuados para analizar los parámetros estadísticos de precisión de la trayectoria de un tractor con autoguiado y señal RTK en línea recta (29). Realizaron tres pruebas: en la primera el tractor no llevaba ningún apero y llevaba la antena GPS en la cabina, en la segunda el tractor arrastraba un arado de chisel y llevaba la antena en la cabina y en el último escenario el tractor arrastraba el arado de chisel y llevaba la antena en el arado para registrar las desviaciones del mismo. Analizaron las desviaciones medias mediante un modelo de mínimos cuadrados generalizados (GLS), las varianzas de las desviaciones las analizaron con un modelo lineal generalizado (GLM) gamma con enlace logarítmico. Obtuvieron que la variación de la trayectoria del implemento era aproximadamente tres veces la trayectoria del propio tractor.

En 2007 Gan-Mor y colaboradores estudiaron como influía la distancia del implemento al eje trasero del tractor en las desviaciones respecto a una trayectoria de referencia (30). Realizaron pruebas a dos velocidades de 4 y 7.2 km/h y en dos superficies distintas, una pavimentada lisa y otra rugosa con grava. La conducción se realizó con autoguiado y señal RTK-DGPS (30). Para realizar las medidas en la superficie pavimentada, construyeron una plataforma con enganche de tres puntos al tractor (Figura 3.3) que utilizaron para realizar marcas en el suelo con tiza a tres distancias del eje trasero del tractor: a 3.6 m, a 1.8 m y debajo del eje trasero. Las mediciones de las desviaciones las midieron de forma manual, con una cinta métrica. Calcularon el RMSE de las desviaciones, obteniendo 1.43 cm, 2.24 cm y 3.74 cm para las distancias de 0, 1.8m y 3.6m respectivamente a 4 km/h y 1.89 cm, 2.74 cm y 5.17 cm para 7.2 km/h para las distancias de 0, 1.8 m y 3.6 m respectivamente. Para realizar las medidas en la superficie rugosa, por la imposibilidad de pintar con tiza, colocaron una antena RTK en la plataforma a 3.6 m para medir las desviaciones a esa distancia del eje trasero. La antena estaba a 25 cm del suelo para evitar los balanceos del tractor. Los RMSE calculados para estas pruebas son 3.64 y 4.05 cm para 4 y 7.2 km/h, respectivamente. Concluyeron que las desviaciones eran mayores para la superficie rugosa y que la velocidad aumentaba las desviaciones, pero el aumento era pequeño comparado con el provocado por el efecto de la distancia al eje trasero.



Figura 3.3. Plataforma utilizada para realizar las marcas en el suelo con tiza a distintas distancias del eje trasero del tractor y llevar la antena a 3.6 m de distancia del eje trasero del tractor (30).

En 2012, Rojo Baio realizó un estudio donde evaluaba la precisión y la eficiencia operativa lograda por un sistema de autoguiado en una cosechadora de caña de azúcar en comparación con una guiada manualmente (31). El autoguiado se usó con señal RTK a través de radio con la base situada a 1200 m del campo de experimentos. El sistema de guiado manual tuvo un mayor error (0.183 m) en comparación con el sistema de guiado automático (0.039 m). En el estudio se concluyó que, para

sacar el máximo provecho al sistema de autoguiado, es indispensable que el cultivo haya sido sembrado también con un sistema de autoguiado; de lo contrario, la máquina cosechadora seguirá las filas planificadas que no coinciden con las filas plantadas, reduciendo así la eficiencia.

Pérez Ruiz y colaboradores publicaron en 2012 un artículo en el que desarrollaban y evaluaban un sistema de mapeo automático con precisión centimétrica basada en RTK-GPS para producir mapas de alta precisión en tiempo real de la ubicación de plantas de tomate trasplantadas (32). Las tomateras se plantaron con un tractor con autoguiado y una maquina plantadora provista con la instrumentación y los sensores necesarios para crear los mapas de cultivo. Posteriormente se fueron evaluando las posiciones de cada planta con un sistema topográfico portátil con RTK y se evaluaron las distancias geométricas entre la posición de las plantas y la posición teórica prevista. La plantación tenía un error RMS medio de 2.67 cm en la dirección a lo largo de la pista, donde el 95% de las plantas de cultivo estaban ubicadas dentro de un radio circular de 5.58 cm.

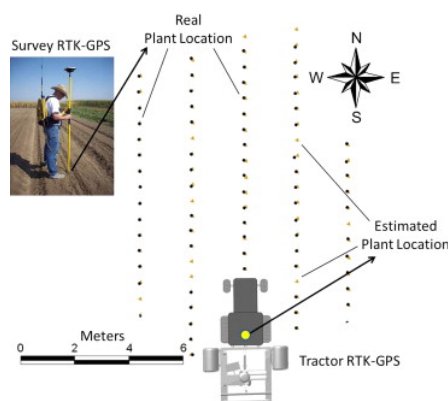


Figura 3.4. Procedimiento de plantación, recogida de datos mediante el sistema de mapeo automático basado en RTK y posterior medición topográfica de la posición de las tomateras.

En 2014, Carballido y colaboradores realizaron un estudio para comparar la precisión de posicionamiento entre los sistemas RTK y RTX en vehículos agrícolas autónomos (33). Probaron ambos sistemas en condiciones de campo, utilizando un tractor autónomo equipado con receptores GNSS. Las pruebas se realizaron en un campo llano y abierto. Con el sistema RTX, realizaron pruebas estáticas, registrando la posición cada segundo durante tres días. Obtuvieron un R99 de 2.9 cm, mostrando que el 99% de las posiciones estaban dentro de un radio de 2.9 cm. Realizaron pruebas dinámicas con RTK y RTX siguiendo líneas rectas de 20 m a distintas horas del día. El tractor se equipó con sensores de dirección y se llevó manualmente. Obtuvieron una desviación estándar en promedio en las pasadas entre hileras de 1.43 cm para RTK y de 2.55 cm para RTX.

En 2016, Kabir y colaboradores, evaluaron la precisión en dinámico de dos receptores, uno de una única frecuencia y con una constelación y otro multifrecuencia y multiconstelación (34). Montaron las antenas en lo alto de la cabina de un tractor que condujeron manualmente en tres entornos: a lo largo de una carretera al lado de una montaña con árboles a ambos lados, en una zona despejada a cielo abierto y en una huerta con árboles. Obtuvieron errores RMSE de 0.2 m, 0.233 m y 1.56 m en campo abierto, huerta y montaña, respectivamente para Single-GNSS en GPS. Para la Single-GNSS en DGPS, los valores fueron 0.168 m, 0.221 m y 1.37 m en los mismos entornos. En el caso de la Multi-GNSS en SPP, el RMSE alcanzó 0.767 m, 1.93 m y 8.84 m, mientras que en PPP los errores fueron de 0.664 m, 0.26 m y 5.63 m, respectivamente.

En 2016, Guzman y colaboradores, estudiaron la viabilidad de introducir técnicas de navegación GNSS aplicados a labores en viñedos (35). Realizaron pruebas en dinámico con un robot autónomo no tripulado que incorporaba otros sensores además de los receptores GNSS para evitar obstáculos como sensores láser y dispositivos RGBD. Estudiaron técnicas como GLIDE, PPP, SBAS y RTK. Evaluaron el uso de GLIDE obteniendo precisiones de 10 cm en periodos de tiempo inferiores a 15 minutos, pero errores muy superiores a lo largo de 2 horas, que les hizo descartar su uso. Con PPP obtuvieron precisiones decimétricas suficientes para trabajar en viñedos, pero el costo del hardware y firmware junto con la suscripción anual hicieron descartar su uso. Con SBAS no obtuvieron precisiones suficientes para trabajar. Finalmente decidieron usar RTK que ofrecía precisiones suficientes.

En 2016, Lipinski y colaboradores, realizaron pruebas para evaluar los errores en la conducción y cuantificar la cantidad de áreas perdidas y repetidas al realizar tareas agrícolas de tres modos distintos, uno manual y dos con autoguiado, uno de ellos con la señal gratuita de John Deere y el otro con la señal de pago de John Deere (36). Determinaron que el ancho operativo de dos pasadas adyacentes se redujo de media unos 25 cm en el modo manual y 2 cm y 0.5 cm para los modos con autoguiado de señal gratuita y señal de pago respectivamente. En el modo manual no se midieron áreas perdidas, pero si superpuestas cuya media fue 25 cm. En el modo automático con la señal gratuita la media de las áreas perdidas fue de 1.6 cm y 6 cm de las áreas repetidas y en el modo automático con la señal de pago fueron de 1.1 cm y 1.6 cm para las áreas perdidas y repetidas respectivamente. También evaluaron la influencia de la velocidad en dichas pruebas. Determinaron que en el modo manual el ancho operativo se redujo en 4 cm al pasar de 3 a 6 km/h y 9 cm al pasar de 6 a 12 km/h. En los modos automáticos, la desviación estándar y el coeficiente de variación aumentaron en más del doble al pasar de 3 a 6 km/h y de 6 a 12 km/h.

En 2018, Dos Santos y colaboradores, analizaron los errores de guía sobre la trayectoria y los errores entre pasadas producidos en el guiado en pruebas en línea recta y en curva con un sistema de autoguiado y con señal RTK aplicado a la siembra de cacahuete (37). Para realizar la comparativa de los errores obtenidos tomaron como referencia el error dado por el fabricante de las antenas, que era de 3.8 cm en el 95% de las observaciones. Obtuvieron un error medio respecto a la trayectoria de referencia de 1 cm en línea recta y 1.93 cm en curva y errores máximos de 4 cm y 11 cm para línea recta y curva respectivamente. En línea recta los errores entre pasadas que superaban el margen de 3.8 cm suponían aproximadamente el 2 %, mientras que en curva estos valores eran mayores y alcanzaban el 17 %. Concluyeron que los errores en línea recta no afectaban de manera evidente en la calidad de siembra ya que se daban de manera pequeña y aislada y que en línea curva los errores mayores se producían cuando la curvatura era mayor.

En 2020, Radicioni y colaboradores, publicaron un artículo en el que buscaban cuantificar los beneficios económicos logrados al usar guiado GNSS con NRTK (38). Para ello realizaron pruebas de conducción manual, conducción asistida y conducción automática. En el modo asistido, una fila de LED mostraba la desviación de la línea ideal y el operador realizaba la corrección manualmente de acuerdo con la indicación del LED. Realizaron cuatro pruebas: en la primera prueba utilizaron ruedas de neumático mientras sembraban sobre terreno seco, en la segunda abonaban con ruedas de neumático sobre terrenos húmedos y fangosos, en la tercera araban con ruedas con neumáticos sobre terrenos húmedos y fangosos y en la cuarta prueba araban utilizando ruedas de oruga sobre terreno

seco. En la prueba manual obtuvieron errores RMS de 0.16 cm, 0.31 cm, 0.25 cm, 0.26 cm para la primera, segunda, tercera y cuarta pruebas, respectivamente. Con el guiado asistido obtuvieron errores RMS de 0.09 cm, 0.24 cm, 0.18 cm, 0.16 cm para la primera, segunda, tercera y cuarta pruebas, respectivamente. Y con el guiado automático obtuvieron errores RMS de 0.08 cm, 0.10 cm, 0.12 cm, 0.06 cm para la primera, segunda, tercera y cuarta pruebas, respectivamente. Para realizar la evaluación económica evaluaron las áreas perdidas y repetidas entre las pasadas adyacentes procesadas. Obtuvieron que en el modo manual el operario tiende a repetir un 10% más que en los otros dos modos, con el fin de evitar zonas sin labrar. Esto conlleva al aumento de los costos.



Figura 3.5. Pruebas arando manualmente a la izquierda y con autoguiado a la derecha.

En 2022, Nguyen y colaboradores, publicaron una comparativa de dispositivos GNSS de posicionamiento de distintas gamas en pruebas en dinámico sobre un tractor (39). Evaluaron los dispositivos de posicionamiento atendiendo a la calidad de la señal en las distintas zonas de prueba, el tiempo de readquisición de señal para desconexiones forzadas durante 3 segundos, la estabilidad de la señal RTK y la precisión de guía con RTK. Montaron todas las antenas en la cabina del tractor simultáneamente y realizaron el guiado del tractor con una única antena de gama alta por campos agrícolas a cielo abierto y caminos asfaltados con zonas arboladas. Destacaron la disminución de los satélites visibles y la disminución de la intensidad de señal conforme se acercaban a las zonas arboladas para todos los dispositivos de posicionamiento de prueba. Los tiempos promedio de readquisición de la señal en los dispositivos de posicionamiento de bajo y medio costo fueron de aproximadamente 1 segundo más que en pruebas estáticas para pérdidas de señal de 3 s. Todos los dispositivos de posicionamiento de pruebas ofrecieron un 100% de disponibilidad de corrección RTK durante la prueba. Los valores RMS del dispositivo de posicionamiento de bajo costo fueron de 1.2 cm y 1.0 cm para la velocidad del vehículo portador de 2.0 m/s y 1.0 m/s, respectivamente, y casi similares a los del dispositivo de posicionamiento de rango medio, los cuales fueron de 1.3 cm y 1.1 cm para las velocidades superior e inferior.

En 2022, Azmi y colaboradores, publicaron un artículo en el que evaluaban la precisión de un tractor con autoguiado en modo DGPS trabajando en línea recta (40). Para ello, emplearon la herramienta ArcMap del software ArcGIS para generar un mapa de interpolación de los puntos registrados por el sistema GPS del autoguiado. Además, utilizaron Microsoft Excel para realizar la conversión de coordenadas, introducir los datos en la interfaz de ArcMap y calcular parámetros estadísticos como la desviación estándar y el error medio. El error medio en las pruebas fue 7.8 cm y la desviación estándar, 39.5 cm.

3.2 Análisis detallado

Tras realizar un recorrido general por los distintos artículos que incluyen receptores GNSS para aplicaciones agrícolas, se van a analizar de manera más detallada los artículos que se han considerado más importantes. El objetivo principal de este apartado es ver de manera más detallada las distintas formas de proceder de los autores a la hora de realizar pruebas en dinámico y de analizar los errores obtenidos en ellas.

3.2.1 Lipinski y colaboradores. 2016. Precision of tractor operations with soil cultivation implements using manual and automatic steering modes (36).

En 2016 A. Lipinski, Markowski, S. Lipinski y Pyra publicaron un artículo donde evaluaron la influencia del guiado por satélite en un tractor John Deere 7230R con un apero múltiple Väderstad Carrier 350. Pusieron a prueba el conjunto tractor-implemento con tres modos de dirección y a tres velocidades con el fin de determinar las desviaciones de las rutas predefinidas y las áreas repetidas y perdidas en el proceso de la labor.

3.2.1.1 Materiales y métodos.

El experimento se llevó a cabo en 2013 en Mazowske, Polonia en una finca en la que no había ningún posible obstáculo natural que pudiera afectar a la calidad o estabilidad de las señales de GPS y la precisión de funcionamiento de la máquina. El campo de cultivo se consideró llano a efectos del estudio, aunque tenía una pequeña inclinación de 1° en el sentido de las trayectorias señaladas.

El tractor con el que se realizaron las pruebas era un John Deere 7230R con el implemento múltiple de cultivo de suelo Väderstad Carrier 350, cuya anchura era de 3.19 m. Se marcaron las rutas seguidas colocando unas varillas en el implemento a una anchura de 3.41 m arrastrando por el suelo.

Se utilizaron tres modos de funcionamiento para las pruebas: un modo de dirección manual y dos modos con dirección automática. Para los modos de dirección automática se utilizó el sistema de navegación por satélite StarFire 3000 GSBAS. El tractor estaba equipado con el sistema de autoguiado John Deere AutoTrac, una antena StarFire 3000 y una pantalla GreenStar 3 2630 CommandCenter. La antena del receptor GPS se montó en el centro del techo de la cabina del tractor.

Para el primer modo de dirección automática el sistema de seguimiento se basaba en una señal de corrección SF1 con una precisión de ± 230 mm. En el segundo modo de dirección automático se basó en el servicio de corrección de pago SF2 que ofrecía una precisión de ± 50 mm.

En cada modo el tractor se llevó a tres velocidades de 3, 6 y 12 km/h.

Debido a que la precisión del sistema de dirección del vehículo podía verse afectado por la estabilidad de la señal GPS, el tractor y el implemento se operaron en la misma área para eliminar posibles perturbaciones de la señal. Esta área tenía unas dimensiones de 120x10 m con puntos de medición marcados con barras cada 10 m.

Las pruebas se realizaron dando una pasada con el tractor y el implemento a lo largo del rectángulo y volviendo por la siguiente pasada intentando reducir las áreas perdidas. En los modos de dirección automática se introdujeron las medidas de la máquina, su ancho de superposición y los puntos A y B para determinar la trayectoria de la primera pasada. El recorrido por la zona de medida

se realizó en el modo de dirección automático. El operario se encargó de girar el tractor manualmente para alinearlos con las pasadas.

Las medidas de los anchos de repetición o de pérdida se realizaron cada diez metros mediante la siguiente formula: $b_{n/o} = 2 \cdot b - b_p$, donde $b_{n/o}$ es el ancho de superposición o pérdida, b es el ancho del implemento y b_p es la distancia entre los puntos de medición.

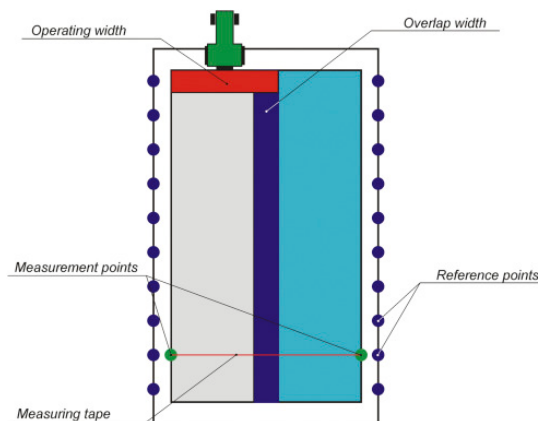


Figura 3.6. Representación del método de medida.

3.2.1.2 Resultados y discusión.

Calcularon valores de correlación y obtuvieron que el ancho operativo de la unidad tractor-implemento estaba significativamente influenciado por el modo de dirección. Los cambios en la velocidad dentro del rango de 3 a 12 km/h no ejercieron un efecto significativo en el ancho operativo.

El ancho operativo medio más pequeño se dio en el modo de dirección manual en 6565 mm. En el modo de dirección automática con la señal de corrección gratuita SF1 y la señal de corrección SF2 de pago, el ancho operativo era mayor en un 3,6 % y 3,8 %, alcanzando 6804 mm y 6815 mm, respectivamente. La desviación estándar y el coeficiente de variación fueron 90,5 mm y 1,33 %, respectivamente, para la señal de corrección de SF1, y 25,3 mm y 0,37 %, respectivamente, para la señal de corrección de SF2.

Calcularon la varianza para determinar la importancia de las diferencias en la precisión operativa en los modos de dirección probados. Observaron diferencias significativas en la precisión de funcionamiento entre el modo de control automático con señales SF1 y SF2 y el modo manual. Los resultados del análisis de varianza y los parámetros estadísticos calculados (desviación estándar y el coeficiente de variación) indicaron que el modo de dirección automática, que se basa en el sistema de seguimiento paralelo y suscripción de pago para la señal de corrección SF2, ofreció una mayor precisión a lo largo de la ruta de referencia que el modelo de dirección manual y el modo de dirección automática basado en el servicio gratuito de corrección SF1.

El análisis del ancho de las áreas repetidas y de las áreas perdidas indicó que las repeticiones se minimizaron en el modo de control automático. Para el modo de dirección automática con la señal de corrección SF2, el ancho máximo de las repeticiones alcanzó los 45 mm. Para el modo de dirección automática con señal de corrección SF1 y en el modo de dirección manual, el ancho máximo de las repeticiones fue de 160 mm y 360 mm, respectivamente.

En el modo de dirección manual no se detectaron áreas perdidas. Estas solo se observaron en los modos de dirección automática. Para la señal de corrección SF2 la desviación máxima de la trayectoria de referencia no superó los 50 mm con un valor medio de 16 mm, mientras que en el modo con la señal SF1, la desviación máxima fue tres veces mayor, y no superaba los 160 mm con valor medio de 60 mm.

En el modo de dirección manual, el aumento de la velocidad del tractor de 3 a 6 km/h y de 6 km/h a 12 km/h disminuyó el ancho operativo combinado de dos pasadas adyacentes en 40 mm y 90 mm en promedio, respectivamente. Los valores resultantes eran relativamente bajos debido a que la trayectoria de referencia en el campo era recta, el terreno era plano y tenía una longitud de solo 100 m. Además, el implemento dejaba marcas visibles en la superficie del campo después de cada pasada por lo que era fácil adivinar la pasada siguiente. En operaciones en el campo con un ancho operativo superior a 20 m, a lo largo de una trayectoria curvilínea y sin rastros visibles en la superficie del campo, la utilización del ancho operativo de una máquina se reducirá significativamente, por lo tanto, los beneficios de la dirección automática serán uniformemente mayores.

En los modos de dirección automática con las señales SF1 y SF2 la desviación estándar y el coeficiente de variación aumentaron su valor en más del doble cuando la velocidad de las pruebas aumento de 3 a 6 km/h y de 6 km/h a 12 km/h.

Steering mode	Travel speed (km h ⁻¹)	Statistical parameters					
		Min. (mm)	Max. (mm)	Mean (mm)	Standard deviation (mm)	Coefficient of variance (%)	Median (mm)
Manual	3	6550	6680	6607 ^a	44.7	6.8	6593
	6	6510	6660	6568 ^a	48.7	7.4	6553
	12	6460	6590	6519 ^b	39.5	6.1	6520
Automatic with SF1 GPS signal	3	6740	6910	6816 ^a	59.6	8.7	6790
	6	6690	6925	6801 ^a	90.5	13.3	6775
	12	6660	6965	6794 ^a	120.0	17.7	6755
Automatic with SF2 GPS signal	3	6795	6840	6814 ^a	14.1	2.1	6810
	6	6785	6850	6817 ^a	21.7	3.2	6810
	12	6775	6870	6813 ^a	37.3	5.5	6795

Figura 3.7. Valores del ancho operativo, desviación estándar, varianza y media para los tres modos dirección y distintas velocidades.

3.2.1.3 Conclusiones

Los resultados del estudio indican que la dirección automática con acceso gratuito a la señal de corrección SF1 y la señal de corrección SF2 por suscripción de pago se caracteriza por una mayor precisión operativa a lo largo de la ruta de referencia que la dirección manual

Según la opinión de Lipinski y colaboradores, las diferencias observadas en la calidad de la dirección del tractor según las señales SF1 y SF2 no son lo suficientemente diferentes como para justificar el costo de la suscripción de la señal. La dirección automática con la señal SF2 sin duda

minimiza el área perdida, pero los beneficios resultantes no parecen ser proporcionales a los costos adicionales. Es posible que lo anterior no se aplique a las operaciones agrícolas que requieren la más alta precisión, como la siembra y plantación de precisión, el cultivo entre hileras y la eliminación mecánica de malezas.

Generalmente los sistemas de dirección asistida en máquinas agrícolas brindan numerosos beneficios respecto al guiado manual.

3.2.2 Radicioni y colaboradores. 2020. GNSS Network RTK for Automatic Guidance in Agriculture: Testing and Performance Evaluation (38)

En 2020 Radicioni y colaboradores presentaron una investigación sobre la validación y optimización de sistemas de guiado automáticos y semiautomáticos para maquinaria agrícola basados en servicios de posicionamiento en tiempo real proporcionados por redes GNSS (NRTK). Realizaron pruebas de diversas labores agrícolas realizadas en diferentes estaciones y condiciones ambientales, mediante maquinaria agrícola de diversos tamaños, potencias y características para evaluar el rendimiento de diferentes sistemas de guiado y métodos de posicionamiento.

3.2.2.1 Infraestructura GNSS y servicios de posicionamiento NRTK utilizados.

La red utilizada para obtener las correcciones NRTK fue la red GNSS GPSUMBRIA administrada por la Universidad de Perugia y la Administración Regional de Umbría en Italia. Estaba formada por 13 estaciones permanentes con un espaciamento corto entre ellas de aproximadamente 40 km. La red proporcionaba una amplia gama de servicios de posicionamiento en postprocesamiento y en tiempo real.



Figura 3.8. Red de estaciones GPSUMBRIA.

3.2.2.2 Instrumentos y maquinaria utilizados en las pruebas.

Se utilizaron tractores de diferentes características, todos equipados con el sistema de guiado GNSS Topcon System 350, que incluía un receptor AGI-4 y una consola X30. Algunos tractores estaban equipados con un volante eléctrico Topcon AES-25, mientras que otros utilizaban un volante servoasistido, conectado adecuadamente al sistema de guiado. El coste estimado del sistema

completo era de unos 20.000 €. Además, se instaló en cada tractor un segundo sistema GNSS independiente al sistema de guiado para controlar los resultados.

Realizaron pruebas con diversos tractores de diversos tamaños y tipos, con ruedas normales y de orugas, para diferentes procesos agrícolas.



Figura 3.9. Sistema de guiado montado en el tractor y antenas montadas en la cabina.

3.2.2.3 Realización de las pruebas.

Realizaron tareas de siembra, fertilización y rastrillado durante las pruebas mediante guiado manual, asistido y automático. El guiado asistido se realizaba utilizando una fila de LEDs que se iluminaban para indicar al conductor la desviación sobre la trayectoria deseada. En el modo automático la dirección se controlaba mediante un motor eléctrico.

3.2.2.4 Procesamiento de datos.

Con el fin de evaluar la eficiencia de los sistemas de guiado tomaron los datos de las pasadas en línea recta excluyendo los giros del tractor en las cabeceras, evaluaron los desplazamientos transversales de cada posición con respecto a la línea recta que indicaba la trayectoria ideal hipotética, realizaron un análisis estadístico de los desplazamientos transversales y realizaron una comparación entre los resultados de los tres sistemas de conducción (manual, asistido y automático). En la Figura 3.10 se muestran las trayectorias obtenidas durante las pruebas. El color azul indica que la pasada se realizó manualmente, el verde, con guiado asistido y el rojo, con guiado automático. En el escenario A se realizaba siembra con un tractor de ruedas normales en un terreno seco, en el escenario B se fertilizaba con un tractor de ruedas normales en un terreno húmedo y fangoso, en el escenario C se rastrillaba con un tractor de ruedas normales en un terreno húmedo y fangoso y en el escenario D se rastrillaba con un tractor con orugas en un terreno llano y seco.

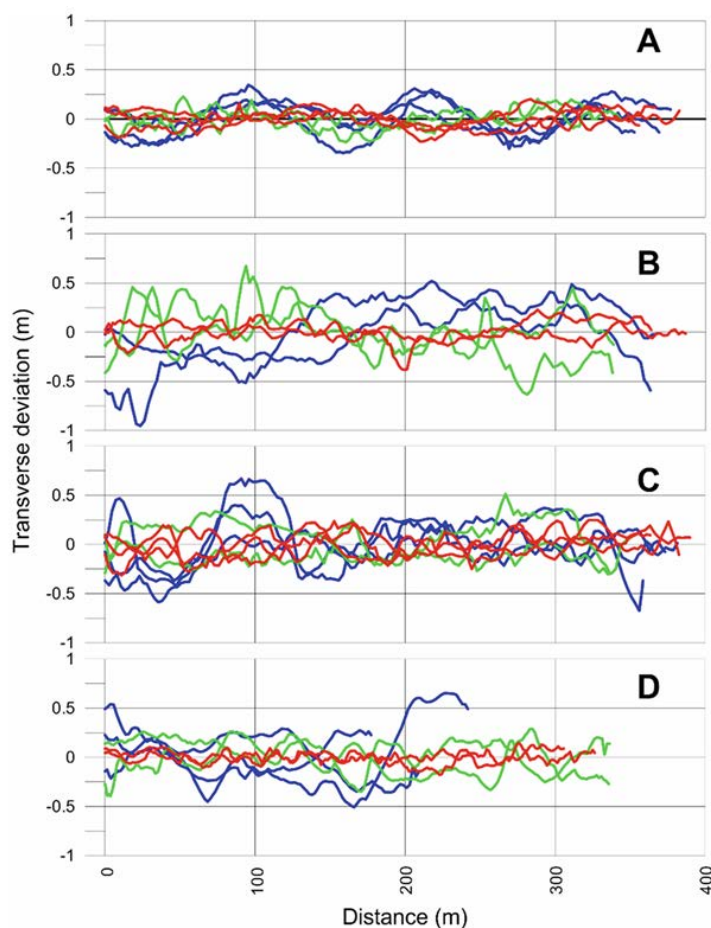


Figura 3.10. Trayectorias obtenidas durante las pruebas. A) Siembra, tractor de ruedas; B) Fertilización, tractor de ruedas; C) Rastrillo, tractor de ruedas; D) Rastrillo, tractor de orugas. En azul es con tracción manual, en verde, con guiado asistido y en rojo guiado automático.

En la Figura 3.11 se muestran parámetros de error de las pruebas. Con el sistema manual se dieron desplazamientos transversales significativos respecto a la trayectoria ideal promedio. Las desviaciones se redujeron con el sistema de conducción asistida. En la conducción manual, con la guía asistida, el valor RMS se redujo entre un 58 % y un 76 %. El sistema automático siempre proporcionó los resultados más precisos, con las mínimas desviaciones transversales: valor RMS de 6 cm en el caso más favorable (caso D) y de 12 cm en el peor (caso C).

A - Sowing, wheeled tractor				C - Harrowing, wheeled tractor			
Parameter	Manual	Assisted	Automatic	Parameter	Manual	Assisted	Automatic
Mean (m)	0,00	0,00	0,00	Mean (m)	0,00	0,00	0,00
RMS (m)	0,16	0,09	0,08	RMS (m)	0,25	0,18	0,12
RMS %	100	58	53	RMS %	100	73	48
Max (m)	0,35	0,23	0,20	Max (m)	0,67	0,51	0,24
Min (m)	-0,35	-0,24	-0,23	Min (m)	-0,67	-0,30	-0,31
V _{med} (m/s)	2,32	2,09	2,33	V _{med} (m/s)	2,66	2,98	2,72
B - Fertilizing, wheeled tractor				D - Harrowing, rubber tracked tractor			
Parameter	Manual	Assisted	Automatic	Parameter	Manual	Assisted	Automatic
Mean (m)	0,00	0,00	0,00	Mean (m)	0,00	0,00	0,00
RMS (m)	0,31	0,24	0,10	RMS (m)	0,26	0,16	0,06
RMS %	100	76	31	RMS %	100	61	22
Max (m)	0,52	0,67	0,23	Max (m)	0,65	0,29	0,14
Min (m)	-0,95	-0,63	-0,38	Min (m)	-0,51	-0,40	-0,18
V _{med} (m/s)	2,66	2,87	2,30	V _{med} (m/s)	1,97	1,62	1,40

Figura 3.11. Datos de las pruebas realizadas.

3.2.2.5 Evaluación económica

Para realizar la valoración económica al utilizar unos sistemas u otros de guiado tuvieron en cuenta el área de solapamiento entre las pasadas o las zonas que quedaron sin tratar y su porcentaje sobre el área total trabajada.

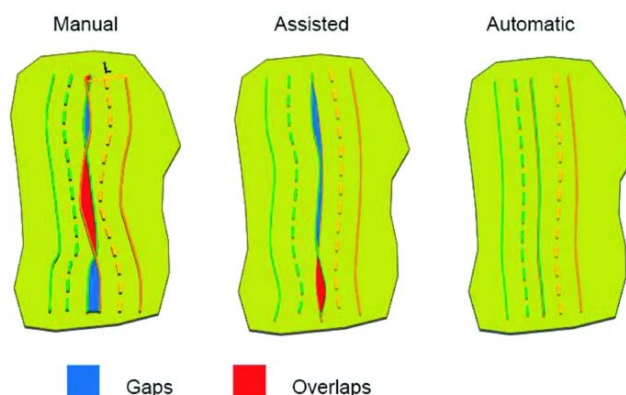


Figura 3.12. Áreas solapadas y sin tratar para la valoración económica.

Con el guiado manual, para evitar zonas sin tratar, se producían frecuentes solapamientos (10 % o más del área procesada), con el consiguiente aumento significativo de consumo de semillas y fertilizantes. Con los sistemas guiados por GNSS, estos solapamientos se reducían considerablemente.

Tractor	Process	Guidance	Area (m ²)	Gaps (m ²)	Overlaps (m ²)	Gaps %	Overlaps %
wheeled	sowing	manual	11566	516	60	4,5	0,5
wheeled	sowing	assisted	8644	342	83	4,0	1,0
wheeled	sowing	automatic	9553	143	107	1,5	1,1
wheeled	fertilizing	manual	10468	0	973	0,0	9,3
wheeled	fertilizing	assisted	10672	17	43	0,2	0,4
wheeled	fertilizing	automatic	12474	63	0	0,5	0,0
wheeled	harrowing	manual	12448	0	2032	0,0	16,3
wheeled	harrowing	assisted	10595	166	181	1,6	1,7
wheeled	harrowing	automatic	8689	120	107	1,4	1,2
tracked	harrowing	manual	9873	2	1043	0,0	10,6
tracked	harrowing	assisted	7960	50	343	0,6	4,3
tracked	harrowing	automatic	7038	49	68	0,7	1,0

Figura 3.13. Datos de solapamientos y áreas sin tratar para cada uno de los modos.

Para evaluar los resultados analizaron los gráficos en términos de áreas entre la trayectoria real y la ideal y hallaron las desviaciones medias para cada una de las labores y en cada uno de los modos.

Definieron un parámetro D calculado como la suma de las áreas sin tratar y las áreas solapadas dividido entre la longitud de la trayectoria y multiplicado por 100 para obtener un porcentaje.

Los resultados obtenidos se muestran en el gráfico de la Figura 3.14.

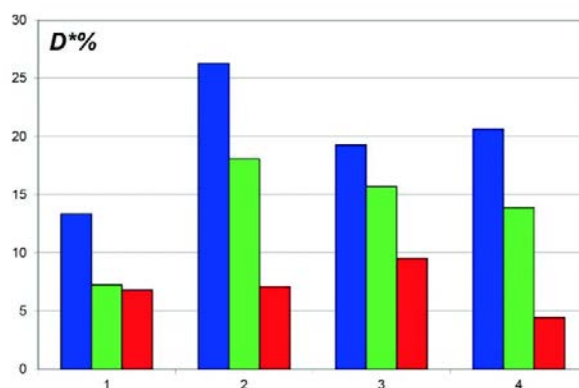


Figura 3.14. Desviaciones medias para: 1: siembra, 2: fertilización, 3: grada (tractor de ruedas), 4: grada (tractor de orugas). En azul, guiado manual; en verde, guiado asistido y en rojo, guiado automático.

El guiado automático resultó ser el mejor al reducir el solapamiento entre la mitad y un cuarto frente al guiado manual. El guiado asistido presentó resultados intermedios entre ambos.

Para evaluar la eficiencia de los sistemas de guiado, también probaron los modos de corrección de DGNSS y EGNOS. Los resultados en función del parámetro D se muestran en Figura 3.15. En ambos casos obtuvieron peores datos que con NRTK, siendo los resultados de EGNOS ligeramente mejores que DGNSS.

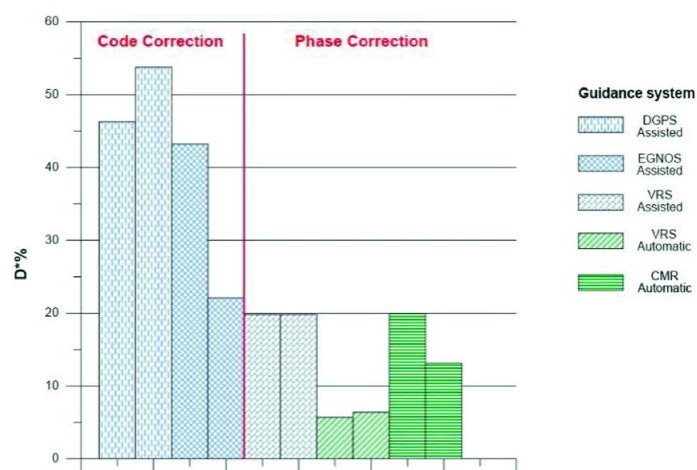


Figura 3.15. Gráfico de D para los distintos modos de corrección.

3.2.2.6 Conclusiones

El estudio concluyó que el guiado asistido mejora la precisión con respecto al manual y que el guiado automático supera al guiado asistido. Este aumento en la precisión del guiado conlleva una reducción de costos al minimizar las áreas solapadas y sin tratar.

En el estudio se evaluaron DGNSS, EGNOS y NRTK, siendo NRTK la tecnología más precisa, mientras que DGNSS y EGNOS ofrecieron una precisión similar.

3.2.3 Azmi y colaboradores. 2022. A computer-based mapping approach for evaluating straight-line accuracy of autopilot tractor traversing the oil palm field terrain (40).

En 2022 Mohammad A. Azmi, Rohaida Mohammad y Darius El Pebrian publicaron un artículo en el que realizaron un estudio donde presentaban un nuevo enfoque para evaluar la precisión en línea recta de un tractor con autoguiado sobre un campo de palma de aceite. Las pasadas realizadas fueron recogidas por el GPS incorporado por el propio autoguiado y utilizaron hojas de cálculo para, a partir de los valores de las coordenadas obtenidas, calcular los errores de precisión en línea recta. Determinaron que el error medio de precisión en línea era de ± 7.78 cm.

3.2.3.1 Materiales y métodos.

3.2.3.1.1 Área de pruebas

Las pruebas para llevar a cabo este artículo se realizaron en Melaka, Malasia, en una zona caracterizada por tener terrenos ondulados con una pendiente promedio de 9° y fueron preparados anteriormente para la siembra de la palma de aceite. El terreno en el que se realizaron las pruebas era un campo experimental de unas 4.64 ha y se dividió en 3 subparcelas para hacer distintas repeticiones. Cada subparcela tenía 8 pasadas de ancho de 150 m de largo.

3.2.3.1.2 Medición de campo.

Para realizar las pruebas utilizaron un tractor New Holland TD5.75 de 75 caballos de potencia equipado con el autoguiado EZ-Pilot de Trimble y la aplicación Trimble FmX 2050 Plus. Este autoguiado incluía un motor de volante SAM 200, un sistema GPS, un controlador, un modem y un sistema de gestión de datos y una pantalla táctil como sistema de visualización. La pantalla estaba situada en la cabina del tractor de manera que el operario podía configurar todos los comandos para las mediciones del sistema fácilmente y los datos recopilados de la medición de campo se registraran también de manera sencilla.

Las coordenadas del tractor durante la operación fueron registradas por el GPS y guardadas en la aplicación Trimble FmX2050 Plus. No utilizaron el RTK para las pruebas, sino que solamente trabajaron en DGPS.

Al comienzo del experimento de campo, el tractor con autoguiado se llevó de forma manual por una trayectoria a través de dos coordenadas de referencia A y B para trazar la línea de referencia AB. Además de la referencia en el campo, la línea AB también sirvió como guía para controlar la operación. El esquema de la línea AB y el movimiento del tractor con piloto automático en el área de pruebas se indica en la Figura 3.16 (I), mientras que la línea AB marcada por el movimiento del tractor con autoguiado se muestra en la Figura 3.16 (II) en la herramienta ArcMap, en la que se registraron todos los puntos de coordenadas. Posteriormente, el tractor fue operado con el modo automático para las mediciones de errores de precisión en línea recta. Cada punto de coordenadas a lo largo del paso del tractor se registró cada 6 segundos.

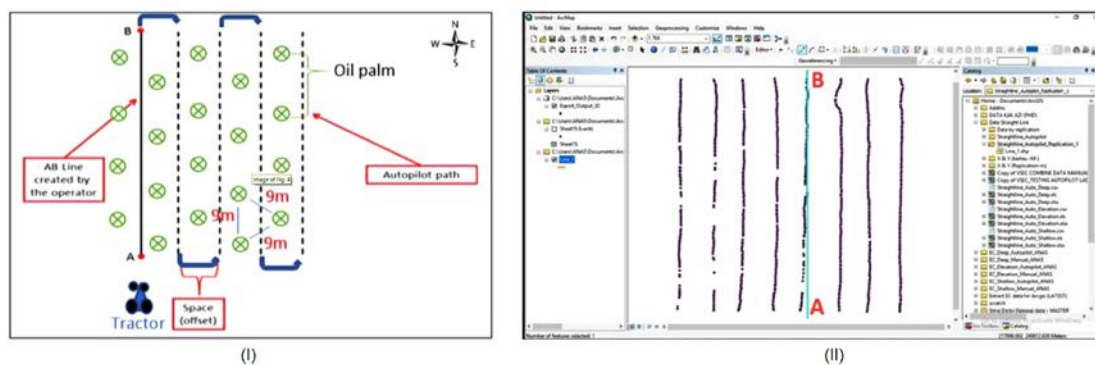


Figura 3.16. Esquema de las trayectorias rectas a la izquierda y resultados de las pruebas a la derecha.

3.2.3.1.3 Procesamiento de datos.

Para realizar el procesamiento de datos utilizaron Microsoft Excel y ArcGIS v10.3. Se utilizó la extensión de análisis espacial de ArcGIS para generar el mapa de interpolación en línea recta a partir del método Kriging. El mapa visualizaba el error cuando el tractor se movía en el campo, mientras que con Microsoft Excel se calculó la desviación estándar (SD) y el error estándar medio (SEM) de las pistas en datos numéricos.

La hoja de cálculo de Microsoft Excel se aplicó como entrada de datos en la interfaz de ArcMap, mientras que los valores separados por comas del archivo .csv se utilizaron para cambiar la formación y transformación del sistema de coordenadas en la interfaz Toolbox de ArcMap. Las coordenadas del tractor que se registraron en coordenadas de latitud y longitud se convirtieron al sistema de coordenadas en Universal Transverse Mercator (UTM) con unidades de metro para facilitar la medición y exportación de datos de error de línea recta.

3.2.3.2 Resultados y discusión.

Tras las pruebas del tractor en las tres subparcelas, se produjeron tres mapas para mostrar los errores de precisión en línea recta utilizando la interfaz ArcMap. Los errores se identificaron a simple vista por la aparición de líneas torcidas en las líneas AB de los mapas.

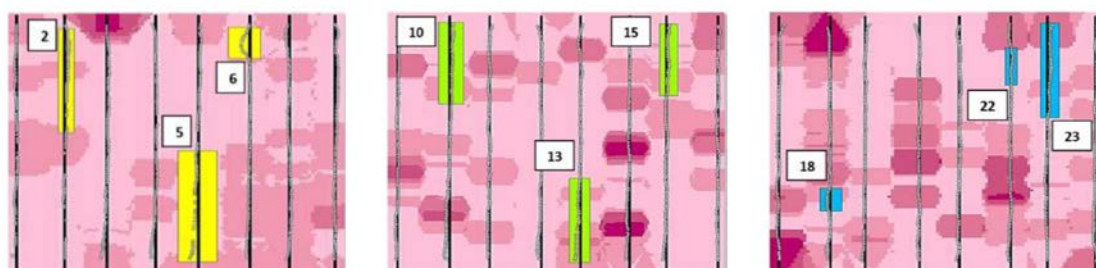


Figura 3.17 Errores identificados en las líneas rectas de las tres pruebas.

En la prueba 1 de la Figura 3.17 se identificaron tres errores de precisión en las pasadas 2, 5 y 6. En la prueba 2, los errores fueron tres y se dieron en las pasadas 10, 13 y 15 y en la última prueba se produjeron tres errores en las pasadas 18, 22 y 23.

Tractor's pass	Numbers of points of errors of straight-line	Errors of straight-line accuracy			
		Standard deviation (SD)		Standard error of mean (SEM)	
		X-Value	Y-Value	X-Value	Y-Value
2	46	0.276229641	13.30684815	0.041643185	2.006082839
5	42	0.634275435	16.4629169	0.10028752	2.603015717
6	17	0.9147779	4.462726	0.2361946	1.152271
10	39	0.275499331	10.87291567	0.045291811	1.787496325
13	43	0.46493645	11.61880723	0.07261087	1.814552833
15	38	0.237909869	9.816464765	0.039651645	1.636077461
18	14	0.280076	3.258023	0.080851	0.94051
22	21	0.186764	5.262141	0.042847	1.207218
23	52	0.285823	12.8965	0.040422	1.82384
Average (m)		0.39514354	9.773038079	0.077755515	1.663451575
Average (cm)		39.5143514	977.3038079	7.7755515	166.3451575

Figura 3.18. Errores de precisión lineal en repeticiones seleccionadas al azar.

La tabla de la Figura 3.18 muestra los errores de precisión lineal basados en repeticiones seleccionadas al azar. El resultado del error medio de precisión en línea recta del tractor para las 9 muestras observadas fue de ± 7.78 cm que se encontraba dentro de los rangos aceptables para dar rentabilidad a las fincas en el caso de no utilizar el RTK.

3.2.3.3 Conclusiones.

En este estudio se desarrolló un método para evaluar de manera sencilla la precisión en línea recta de un tractor con autoguiado, utilizando algoritmos de procesamiento de datos de baja exigencia computacional. Para ello, se emplearon herramientas de software de uso común, como ArcGIS y Microsoft Excel.

Este estudio evaluó los errores de precisión en línea recta del tractor con autoguiado. El error medio calculado de precisión en línea recta fue de ± 7.78 cm, que estaba dentro de un rango aceptable de ± 2.5 cm a ± 10 cm como errores justificables de precisión.

3.2.4 Conclusiones del capítulo

El análisis del estado del arte ha permitido examinar las diferentes aplicaciones de los receptores y tecnologías GNSS en agricultura, la metodología utilizada para evaluar su precisión y los resultados obtenidos para cada tecnología. Para ello, se han analizado diversos estudios de precisión en el guiado, en las cuales los autores han evaluado el desempeño de un tractor dirigido manualmente, mediante guiado asistido o autoguiado, siguiendo una trayectoria de referencia y midiendo los errores respecto a dicha trayectoria. Cada estudio ha empleado distintos métodos para establecer la trayectoria de referencia, utilizando vías de tren cuyas coordenadas eran conocidas, receptores geodésicos de alta precisión, odómetros, teodolitos u otros sistemas de medición.

Los resultados obtenidos muestran que la precisión varía según la tecnología utilizada. En general, los autores coinciden en que el GNSS en modo autónomo presenta desviaciones superiores al metro. Las correcciones SBAS pueden proporcionar precisiones del orden de decenas de centímetros, según algunos estudios. Y, tecnologías como PPP y RTK ofrecen precisiones centimétricas, lo que las hace especialmente adecuadas para todo tipo de labores agrícolas.

Finalmente, los autores resaltan los beneficios del uso de los sistemas GNSS en agricultura de precisión, especialmente en términos de reducción de costos y mejor aprovechamiento de insumos.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE ANTENAS GNSS PARA GUIADO AGRÍCOLA; ESTUDIO CIENTÍFICO DEL ESTADO DEL ARTE

Se concluye que, a mayor precisión en el guiado, se logra un mayor ahorro y eficiencia en las operaciones agrícolas, particularmente cuando estas tecnologías se combinan con sistemas de autoguiado.

Capítulo 4: Evaluación del rendimiento de sistemas gratuitos de corrección GNSS para el guiado de tractores

Capítulo 4: Evaluación del rendimiento de sistemas gratuitos de corrección GNSS para el guiado de tractores¹

En este capítulo se evalúa el rendimiento de sistemas de corrección GNSS gratuitos para el guiado de tractores. Se evaluaron tres tipos de receptores GNSS, un Navilock NL-8022MP, un Novatel Smart2 y un Harxon TS108PRO, tres sistemas de corrección, EGNOS, NRTK y RTK, y una tecnología propietaria, GLIDE, en pruebas en estático y en dinámico. Los resultados concluyen que (i) los receptores GNSS de bajo coste sin datos de corrección permiten guiar el tractor con errores típicos entre pasadas a corto plazo de aproximadamente 1 metro RMS, precisión que permitiría un guiado regular en la fertilización cuando la referencia es una pasada anterior realizada en la última hora, (ii) EGNOS mejora ligeramente la precisión de guiado permitiendo alcanzar errores de pasada a pasada a corto plazo inferiores al metro RMS, precisión que permitiría un buen guiado para fertilización y un guiado regular en pulverización (iii) GLIDE mejora el guiado de precisión entre pasadas a corto plazo. La precisión de nivel submétrico de GNSS+EGNOS+GLIDE alcanza precisiones de 10 cm y permitiría un guiado aceptable en fertilización y pulverización, y un guiado regular en siembra, cosecha y labranza, (iv) NRTK ofrece un guiado de precisión a corto y largo plazo de 2 cm, precisión que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas con una única restricción: al menos una estación de referencia debe estar a menos de 50 km del tractor, y (v) RTK alcanza una precisión de guiado a corto y largo plazo de 1 cm, que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas sin restricciones, pero requiere colocar una costosa estación de referencia cerca del tractor, no estando entonces justificado el uso de RTK si los agricultores disponen de NRTK con estaciones base a menos de 50 km.

¹ Este capítulo es la traducción al español de una versión *draft* en inglés de un artículo científico que va a ser enviado a una revista científica con factor de impacto JCR. Este artículo incluye un estudio en estático y un estudio en dinámico de los receptores en distintas configuraciones. El estudio en estático se presentó como parte de mi Trabajo Fin de Grado y durante mi Trabajo Fin de Máster se ha realizado la parte en dinámico. En este Trabajo Fin de Máster se presenta el artículo completo con ambas partes. Este artículo, se realizó por un grupo de tres investigadores: **Ángel Alonso García**, alumno de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad de Valladolid y autor de este TFM, realizó las pruebas con las antenas, utilizó el programa TeraTerm para adquirir los datos de las antenas, realizó un programa en *Matlab* para procesarlos y generó todas las gráficas y figuras del artículo. **Jaime Gómez Gil**, profesor en la ETSI de Telecomunicación de la Universidad de Valladolid, propuso el estudio, definió la estructura de la información a presentar en el artículo y redactó en inglés el mismo. **Sergio Alonso García**, Ingeniero de Telecomunicación, doctor por la Universidad de Valladolid, y fundador de tractorDrive, proporcionó *know-how* para la conexión y configuración de las antenas y proporcionó todo el material necesario. **Fco. Javier Gómez Gil**, ingeniero industrial y profesor de la Universidad de Burgos, colaboró realizando sugerencia y revisando el artículo.

4.1 Introducción

La Agricultura de Precisión (AP) es una estrategia de gestión agrícola que hace uso de las tecnologías de la información en la agricultura (41–43). La AP se asocia con tecnologías como GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), aplicación de tasa variable (VRA) y sistemas de autoguiado (43,44). Algunas tecnologías de AP como la guía GNSS han sido adoptadas rápidamente por los agricultores, mientras que la adopción es lenta en otras tecnologías como la VRA. Por ejemplo, según datos estadounidenses de 2016, el 59 % de las explotaciones de maíz utilizaban el guiado por GNSS, mientras que solo el 29 % utilizaban VRA en la fertilización. El guiado por GNSS se ha adoptado en todo el mundo tan rápido como cualquier otra tecnología agrícola importante en la historia (45).

El posicionamiento GNSS comenzó en 1973 en Estados Unidos con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) estadounidense. Posteriormente, se desarrollaron el sistema ruso GLONASS (*GLOBAL'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), el sistema europeo Galileo y el sistema chino BeiDou (46). La precisión del posicionamiento GNSS depende principalmente de dos factores: el tipo de receptor y el sistema de corrección empleado.

En las tareas agrícolas se utilizan principalmente dos tipos de receptores: (i) receptores de código, que permiten el Posicionamiento de Punto Único (SPP; en inglés: *Single Point Positioning*), su precio está alrededor de 100 €, y dan una precisión con algunos metros de error (27,47) y (ii) receptores de fase, que permiten el Posicionamiento de Punto Preciso (PPP) y/o el posicionamiento RTK (Cinemático en Tiempo Real), que cuestan por encima de los 1000 €, y permiten un posicionamiento con centímetros de error (27,48).

En el posicionamiento GNSS pueden considerarse dos tipos de errores: (i) el posicionamiento de error absoluto, que mide el error desde el punto medido hasta el punto real, y (ii) el posicionamiento de error relativo, que mide la diferencia de errores entre dos puntos medidos GNSS. Precisión absoluta, y precisión año a año son términos que se refieren al posicionamiento absoluto. Precisión relativa, precisión repetible, precisión a corto plazo y precisión entre pasadas son términos relacionados con el posicionamiento relativo. (3,49–51). Para los sistemas de guiado, cuando el tiempo entre pasadas es corto, inferior a 1 hora, y las trayectorias no deben guardarse de un año a otro, la precisión entre pasadas es la magnitud a considerar, en caso contrario, es la precisión de año a año la magnitud que hay que considerar.

Los sistemas de corrección, tecnología que proporciona a los receptores cierta información de errores de posicionamiento desde estaciones de referencia situadas no muy lejos del receptor, pueden clasificarse en cuatro tipos principales según el método de transmisión de las correcciones (52).

GNSS autónomo. Los receptores de código de frecuencia única o multifrecuencia proporcionan posicionamiento con metros de error (27,47). Este tipo de receptores se utilizan a veces en el guiado asistido de tractores en aplicaciones de fertilización.

Las correcciones vía satélite, o los Sistemas de Aumentación Basados en Satélites (SBAS; en inglés: *Satellite Based Augmentation System*), donde los satélites transmiten a los receptores la información de corrección. El sistema WAAS (*Wide Area Augmentation Systems*) es un SBAS de GPS que presta servicios en Norteamérica, el sistema SDCM (*System of Differential Corrections and Monitoring*) es un SBAS de GLONAS que presta servicios en Rusia, el sistema EGNOS (*European*

Geostationary Navigation Overlay Service) es un SBAS de Galileo que presta servicios en Europa, y el sistema BDSBAS (*BeiDou Satellite-Based Augmentation System*) es un SBAS de Beidou que ofrece servicios en China. WAAS, SDCM, EGNOS y BDSBAS son servicios gratuitos que suelen utilizarse en receptores de código y reducen ligeramente el error de posicionamiento. Otros sistemas SBAS, como John Deere StarFire (36) y Trimble RTX (53), son servicios de suscripción que ofrecen una precisión de unos 30 cm utilizando receptores de fase de doble frecuencia.

Las correcciones vía Internet utilizan Internet para transmitir a los receptores la información de corrección. Este sistema se utiliza principalmente para transmitir correcciones desde una estación de referencia situada normalmente a menos de 50 km, o desde una red de estaciones de referencia virtuales (VRS; en inglés: *Virtual Reference Station*), cuyas estaciones están situadas a menos de 50 km entre ellas. Este sistema proporciona normalmente una precisión de centímetros (54). El posicionamiento que utiliza este método de corrección se suele denominar posicionamiento GPS NRTK (*Network Real-Time Kinematic*). El Gobierno de España proporciona este sistema de corrección de forma gratuita.

Las correcciones por radio, utilizan un enlace de radio para transmitir a los receptores la información de corrección proporcionada por una estación base situada normalmente a no más de 1 km. Se trata del sistema de corrección más preciso, con una precisión de unos 2 cm (55). El posicionamiento que utiliza este método suele denominarse posicionamiento GPS RTK o posicionamiento GPS diferencial en fase portadora (CPDGPS; en inglés: *Carrier-Phase Differential GPS*). Se trata de un sistema de corrección gratuito, pero requiere un receptor base.

También existen tecnologías para aumentar la precisión de posicionamiento sin utilizar estaciones de referencia. GLIDE, de la empresa Novatel (14) y e-Dif, de la empresa Hemisphere (56), son dos de estas tecnologías. GLIDE y e-Dif son tecnologías centradas en la mejora de la precisión del posicionamiento relativo, mientras que los sistemas de corrección anteriores son tecnologías centradas en la mejora de la precisión del posicionamiento absoluto.

El guiado GNSS asistido de tractores ayuda a los conductores de tractores a conducir con luces o mediante una pantalla. El equipamiento GNSS asistido es más barato que el guiado GNSS automático, pero ofrece menores precisiones de guiado y menos comodidad para el conductor. El guiado GNSS asistido suele ofrecer errores de 20 cm RMS independientemente de la precisión del posicionamiento GNSS. Aunque el posicionamiento sea muy preciso, por ejemplo, un posicionamiento RTK con pocos cm de error RMS, las tareas agrícolas que requieren precisiones superiores a 20 cm no pueden realizarse con sistemas de guiado asistido (52). El guiado GNSS asistido es más preciso que el guiado manual, pero menos que el guiado automático (38). De esta manera, el guiado asistido ahorra fertilizante y herbicida, pero en menor medida que el automático (57).

El guiado automático GNSS de tractores es la evolución del guiado asistido GNSS de tractores y, a principios de siglo, ya alcanzaba precisiones de cm (58–60). Además de un sistema de posicionamiento absoluto GNSS, los sistemas de guiado automático GNSS precisos requieren un sistema de posicionamiento relativo, como una unidad de medición inercial (IMU), para hacer frente al terreno accidentado en el que trabajan los tractores, para trabajar bien en zonas inclinadas y para disponer de un guiado más estable (61–63). A principios de siglo, la única tecnología de posicionamiento que conseguía una precisión de centímetros en el guiado era el posicionamiento

RTK, mientras que últimamente, el posicionamiento NRTK consigue casi esta precisión reduciendo costes, ya que NRTK, a diferencia de RTK, no requiere que los agricultores coloquen un receptor base cerca del tractor (38,64). Los últimos avances en el guiado de tractores incluyen sistemas para compensar las desviaciones laterales del implemento del tractor (30,65).

Este artículo evalúa receptores GNSS representativos, y sistemas de corrección GNSS que, siempre, o al menos en muchos países, no requieren el pago de tasas por parte de los agricultores.

4.2 Materiales

Este estudio utilizó los siguientes receptores de posicionamiento:

- Navilock NL-8022MP. Se trata de un receptor GNSS de código de bajo coste capaz de procesar señales L1 del sistema GPS, señales E1 del sistema Galileo, señales L1 del sistema GLONASS, señales B1 del sistema BeiDou y señales L1 del sistema QZSS. Utiliza un chipset U-blox y ofrece velocidades de posicionamiento de salida de hasta 10 Hz. Es compatible con SBAS. Según su ficha técnica, ofrece precisiones horizontales de 2,5 m de *Error Circular Probable* (CEP), y de 2 m CEP con SBAS. El precio de venta al público de este receptor en España en 2025 es de unos 140 €. En la Figura 4.1.a se muestra este receptor.
- Novatel Smart2. Se trata de un receptor GNSS de código de coste medio capaz de procesar señales L1, L2 y L2C del sistema GPS, señales E1 y E5b del sistema Galileo, señales L1 y L2 del sistema GLONASS, señales B1I, B2I y B2b del sistema BeiDou, y señales L1 y L2 del sistema QZSS. Utiliza un chipset OEM Hexagon/Novatel y ofrece velocidades de posicionamiento de salida de hasta 20 Hz. Es compatible con SBAS, con la tecnología GLIDE de Novatel y con la técnica PPP (Precise Point Positioning) Terrastar. Según su ficha técnica, ofrece precisiones horizontales de 1,5 m (Root Mean Square) RMS en posicionamiento L1, 1.2 m RMS en posicionamiento L1/L2, 60 cm RMS en posicionamiento L1/L2 con SBAS, 40 cm con la suscripción al servicio TerraStar-L PPP y 2 cm con la suscripción al servicio Terrastar-C PRO PPP. Además, este receptor dispone de una tecnología especial, denominada GLIDE, que reduce el error relativo entre pasadas en tareas agrícolas. El precio de venta al público de este receptor en España en 2025 es de unos 1100 €. En la Figura 4.1.b se muestra este receptor.
- Harxon TS108PRO. Se trata de un receptor GNSS RTK de altas prestaciones capaz de procesar señales L1, L2 y L5 del sistema GPS, señales E1, E5a y E5b del sistema Galileo, señales L1 y L2 del sistema GLONASS, y señales B1, B2 y B3 del sistema BeiDou. Utiliza un chipset Unicore UM4B0 y ofrece velocidades de posicionamiento de salida de hasta 10 Hz. Según su ficha técnica, ofrece precisiones horizontales de 1,5 m RMS en posicionamiento de punto único, y de 1 cm en posicionamiento RKT. El precio de venta al público de este receptor en España en 2025 es de unos 1900 €. En la Figura 4.1.c se muestra este receptor.
- Base Harxon TS103. Se trata de una base GNSS RTK de alto rendimiento capaz de procesar señales L1, L2 y L5 del sistema GPS, señales E1, E5a y E5b del sistema Galileo, señales L1 y L2 del sistema GLONASS, y señales B1, B2 y B3 del sistema BeiDou. Utiliza un chipset Unicore UM4B0 y ofrece velocidades de posicionamiento de salida de hasta 10 Hz. Según su ficha técnica, ofrece una precisión de medida de código de 10 cm, y de fase portadora de 1

mm. El precio de venta al público de este receptor en España en 2025 es de unos 1.500 €. En la Figura 4.1.d se muestra este receptor.



Figura 4.1. Receptores GPS probados en este estudio. a) Navilock NL-8022MP. b) Novatel Smart2. c) Harxon TS108PRO. d) Base Harxon TS108PRO.

En este estudio también se utilizó un tractor John Deere 6400 equipado con un sistema autoguiado de la marca tractorDrive que era el encargado de dirigir el tractor a lo largo de las trayectorias. El motor del autoguiado montado en el tractor se muestran en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Motor del autoguiado tractorDrive que acciona el volante del tractor durante las pruebas de guiado.

4.3 Métodos

Los receptores GNSS de la sección Materiales se configuraron en las siguientes configuraciones:

- Configuración 1: El receptor Navilock NL-8022MP se configuró sin SBAS.
- Configuración 2: El receptor Navilock NL-8022MP se configuró con SBAS.
- Configuración 3: El receptor Novatel Smart2 se configuró sin SBAS y sin GLIDE.
- Configuración 4: El receptor Novatel Smart2 se configuró con SBAS y sin GLIDE.
- Configuración 5: El receptor Novatel Smart2 se configuró con SBAS y con GLIDE.
- Configuración 6: El receptor Harxon TS108PRO se configuró sin SBAS.
- Configuración 7: El receptor Harxon TS108PRO se configuró con SBAS.
- Configuración 8: El receptor Harxon TS108PRO se configuró con RTK. La estación de referencia estaba en Bolvir, Girona, España, a 645 km del receptor. Las correcciones diferenciales GNSS se obtuvieron en tiempo real de ERGNSS (Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS), una red de proveedora de RTCM por Internet (NTRIP) propiedad del Instituto Geográfico Nacional (IGN), un organismo público español.
- Configuración 9: Equivalente a la configuración 8, pero la estación de referencia utilizada estaba en Mérida, Badajoz, España, a 296 km del receptor.

- Configuración 10: Equivalente a la configuración 8, pero la estación de referencia utilizada estaba en Aranda de Duero, Burgos, España, a 99 km del receptor.
- Configuración 11: Equivalente a la configuración 8, pero la estación de referencia utilizada estaba en Valladolid, España, a 42 km del receptor.
- Configuración 12: Equivalente a la configuración 8, pero la estación de referencia utilizada estaba en Olmedo, Valladolid, España, a 14 km del receptor.
- Configuración 13: Equivalente a la Configuración 8, pero la referencia era una Estación de Referencia Virtual (VRS; en inglés: *Virtual Reference Station*) en la ubicación del receptor.
- Configuración 14: El receptor Harxon TS108PRO se configuró con RTK. Las correcciones diferenciales GNSS se obtuvieron de un receptor base Harxon TS103 conectado por radio al TS108PRO. El receptor base estaba a 5 m.

La velocidad de posicionamiento de todas las configuraciones anteriores se fijó en 5 Hz. Los demás parámetros de configuración de los receptores se dejaron por defecto.

Para cada configuración se realizaron pruebas en estático y en dinámico.

Las pruebas en estático se realizaron colocando dos receptores Navilock NL-8022MP, tres receptores Novatel Smart2, nueve receptores Harxon TS108PRO y una base Harxon TS103, en un tejado con buena visibilidad a cielo abierto (ver Figura 4.3.a). Se conectó un ordenador portátil a los catorce receptores a través de un hub USB (ver la Figura 4.3.b). El ordenador portátil, que ejecutaba la aplicación Tera Term en Windows, adquirió las tramas NMEA de los catorce receptores durante veinticuatro horas, el día 22 de marzo de 2023.

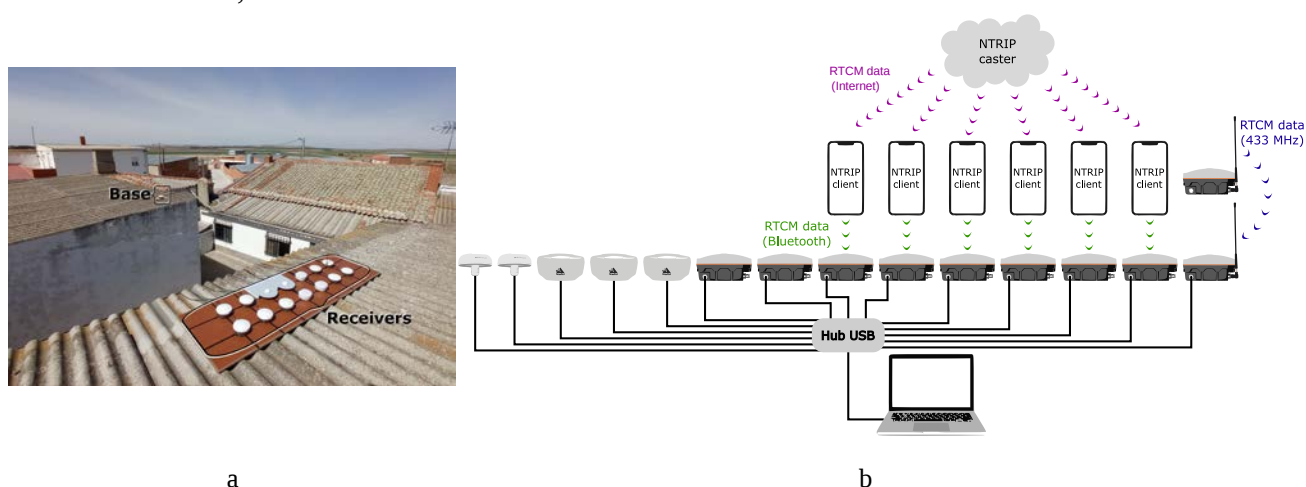


Figura 4.3. Imágenes de la adquisición de datos de la prueba estática: (a) receptores adquiriendo datos en un tejado y (b) diagrama de la conexión entre receptores, receptor base y ordenador portátil.

Para cada configuración, se obtuvieron cinco posiciones de latitud y longitud por segundo a partir de las tramas NMEA de tipo RMC, obteniéndose un total de $24 \times 60 \times 60 \times 5 = 432.000$ posiciones de latitud y longitud. Cada posición de latitud y longitud se convirtió a coordenadas cartesianas Norte, Este, Abajo (NED; en inglés: *North, East, Down*) (66). Se representaron mapas de puntos, histogramas de distancias respecto al punto de referencia con su respectiva función de distribución, gráficos de error respecto la posición inicial durante los primeros 30 minutos y se calcularon algunos parámetros estadísticos.

Para calcular la posición de cada uno de los catorce receptores, se calculó la media de los 432.000 puntos obtenidos por las dos configuraciones más precisas, la 13 y la 14, representadas en color rojo en la Figura 4.4, y colocadas durante las pruebas en los extremos para facilitar los cálculos y se utilizaron estos puntos como referencia para calcular la posición verdadera del resto de receptores.

En el resto de configuraciones de la 1 a la 12, se consideraron dos posiciones: la posición denominada en el artículo como posición verdadera del receptor, calculada a partir de las dos posiciones de los receptores RTK de las configuraciones 13 y 14 y a partir de las distancias mostradas en la misma figura y la posición denominada en el artículo como posición media del receptor calculada a partir de la media de los 432.000 puntos obtenidos por cada receptor.

De esta manera la posición verdadera y media de los receptores de las configuraciones 13 y 14 coincide.

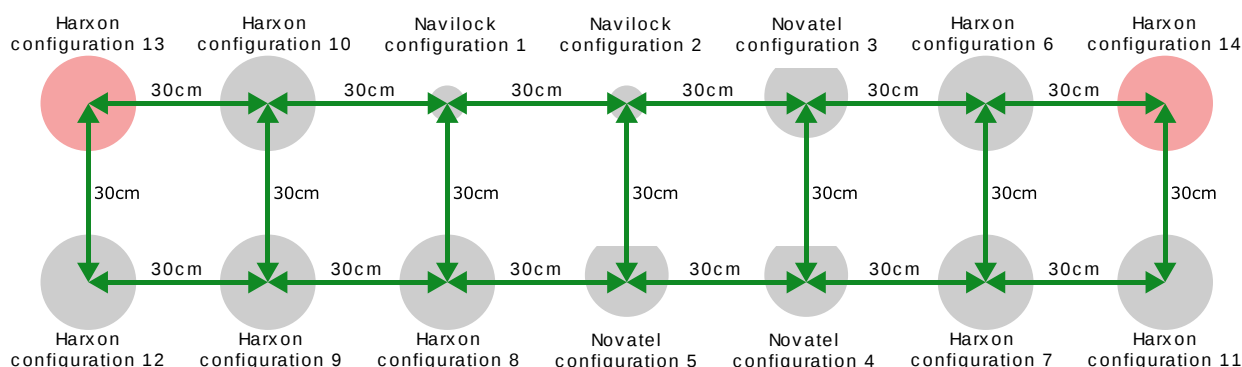


Figura 4.4. Posiciones relativas de los receptores en las pruebas estáticas. La posición de los receptores representada en color gris se obtuvo a partir de la posición verdadera calculada de los receptores en color rojo, y las distancias mostradas en la figura.

En las pruebas en dinámico se hizo pasar el tractor por una trayectoria recta tres veces cada 15 minutos para cada configuración. Las trayectorias tenían 300 m de largo y la velocidad del tractor era de 1m/s, por lo que se recogían datos durante 5 minutos. El tractor era guiado por el autoguiado con los receptores de cada una de las 14 configuraciones. Durante los 10 minutos hasta el comienzo de la siguiente pasada, el tractor se conducía manualmente y se colocaba de manera adecuada en el origen de la trayectoria. Durante estos 10 minutos no se recogían datos o se descartaban. La segunda pasada se realizó a los 15 minutos del comienzo de la primera y la tercera pasada se realizó a los 30 minutos del comienzo de la primera.

Para tomar la trayectoria de referencia se utilizó la configuración 14 en la que las correcciones se recibían a través de la base situada en la misma finca de las pruebas. La antena de referencia se situó en un bastidor en la parte trasera del tractor para que le afectaran lo menos posible los balanceos del tractor durante la trayectoria. Los datos de la antena que daba posiciones al autoguiado y de la antena de referencia se capturaron en un ordenador portátil situado en la cabina del tractor. Para poder comparar las posiciones recibidas por ambas antenas se transformaron las posiciones y se proyectaron sobre el eje trasero del tractor utilizando los datos de inclinación del sistema INS del autoguiado.

Anteriormente a la realización de las pruebas, la parcela se había arado para que no tuviera hierba y se había alisado para que no tuviera baches que dificultaran el guiado del tractor. La parcela era plana y prácticamente no tenía ninguna inclinación.

Para cada configuración, se representaron gráficas con las tres trayectorias y se calcularon algunos parámetros estadísticos.



Figura 4.5. Tractor John Deere durante la prueba en dinámico con la antena de referencia en el bastidor

4.4 Resultados

Las figuras de la Figura 4.6.a a la Figura 4.19.a muestran un gráfico de las posiciones adquiridas en cada configuración durante 24 horas. Los puntos azules corresponden a las 6 primeras horas, los verdes al tiempo entre la hora 6 y la 12, los rojos al tiempo entre la hora 12 y la 18, y los amarillos a las 6 últimas horas. Las figuras de la Figura 4.6.a a la Figura 4.19.a se presentan con rangos de abscisas $[-6.43, 6.43]$ y de ordenadas $[-5, 5]$. Estos rangos son un compromiso entre presentar la mayoría de los puntos en configuraciones de baja precisión y no presentar los puntos demasiado juntos en las configuraciones de alta precisión. Para presentar un número de puntos visible, sólo se ha representado en la figura uno de cada 100 puntos.

Las figuras de la Figura 4.6.b a Figura 4.19.b muestran dos gráficos. El primero es un histograma de las distancias euclideas de los puntos a la posición media del receptor. Este histograma puede considerarse una función de densidad de probabilidad (PDF; en inglés: *Probability Density Function*) de las distancias de los puntos a la posición media. El segundo gráfico de la las figuras de la Figura 4.6.b a la Figura 4.19.b es la Función de Distribución Acumulativa (CDF; en inglés: *Cumulative Distribution Function*) asociada a la función PDF anterior.

Las figuras de la Figura 4.6.c a la Figura 4.19.c se generaron a partir de los puntos obtenidos en los primeros 30 minutos. Para cada punto se calculó y presentó la distancia al primero. Esta distancia puede considerarse un error con respecto al punto inicial, ya que los receptores se encontraban en la misma posición. Con el fin de presentar un número visible de puntos, sólo se presentó uno de cada 8 puntos.

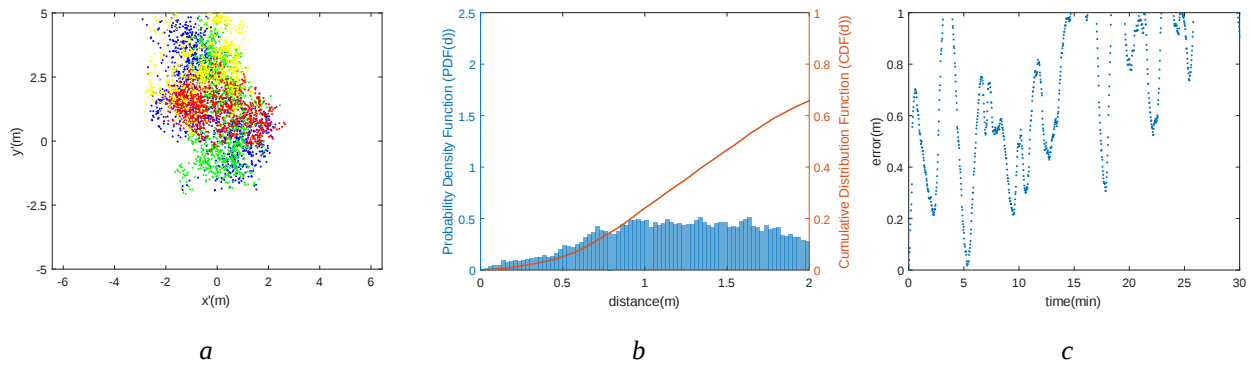


Figura 4.6. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Navilock NL-8022MP sin SBAS de la Configuración 1: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 5.42% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 26 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico.

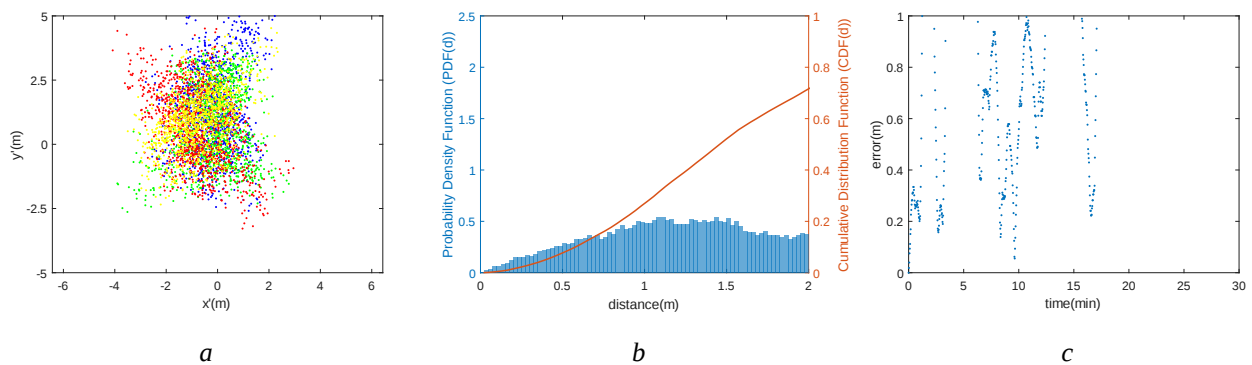


Figura 4.7. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Navilock NL-8022MP con SBAS de la Configuración 2: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 0.86% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 18 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico. Además, a partir de los 18 minutos, todos los valores son un error de 1 m.

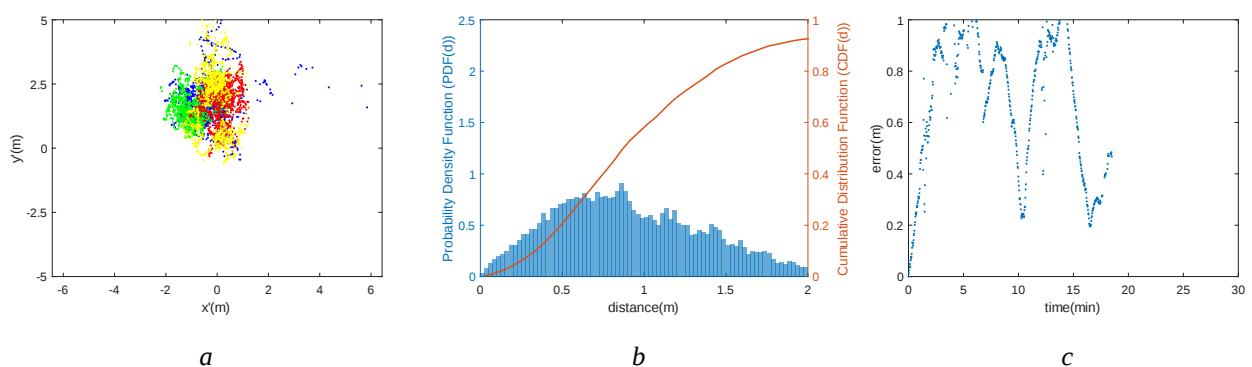


Figura 4.8. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 sin SBAS y GLIDE desactivado de la Configuración 3: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 2.94% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de las 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 19 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico. Además, a partir de los 18 minutos, todos los valores tienen un error de 1 m.

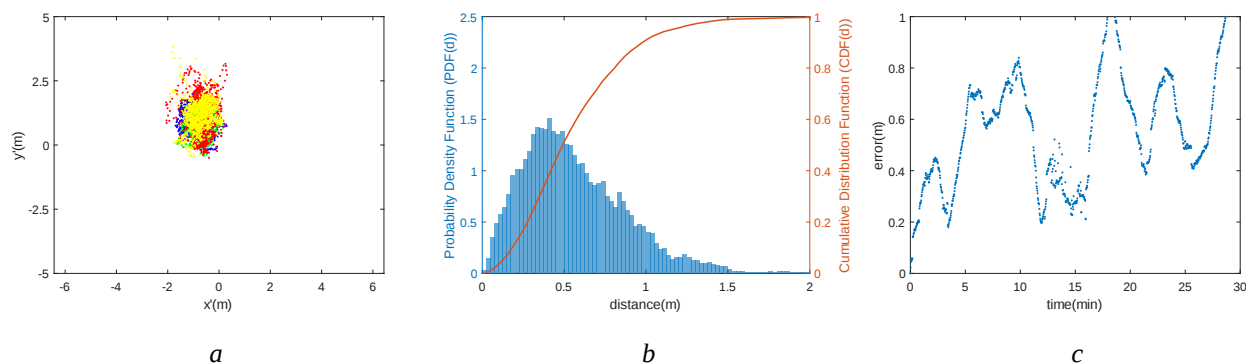


Figura 4.9. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS y sin GLIDE de la Configuración 4: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial. Obsérvese que, en el gráfico c, algunos puntos superan un error de 1 m y quedan fuera del gráfico.

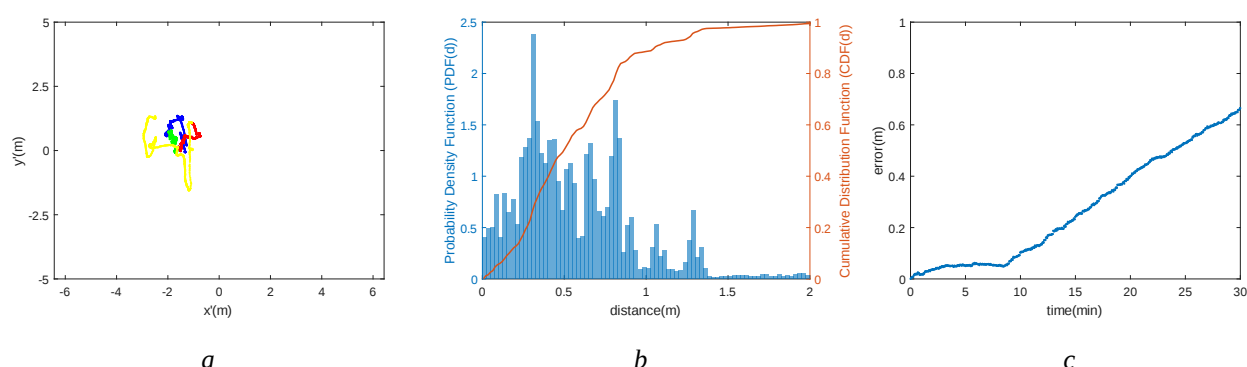


Figura 4.10. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS y con GLIDE de la Configuración 5: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

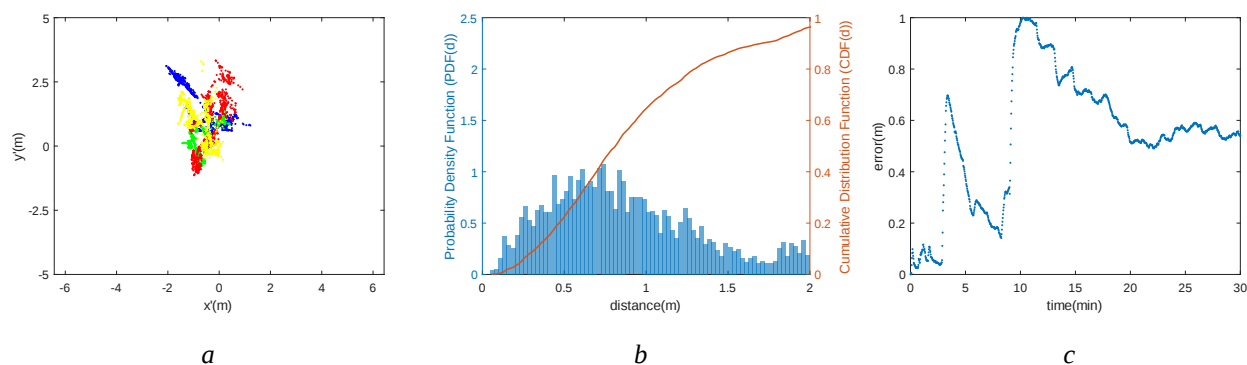


Figura 4.11. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO sin SBAS de la Configuración 6: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

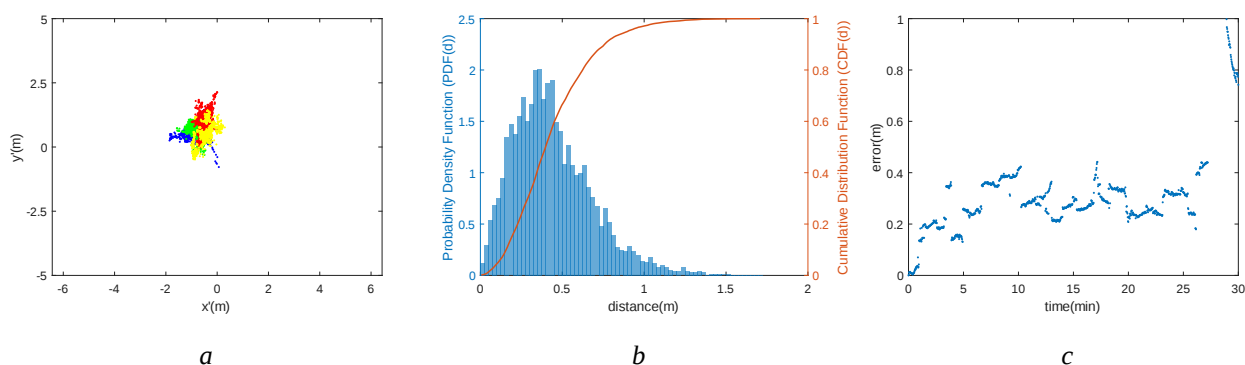


Figura 4.12. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con SBAS de la Configuración 7: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

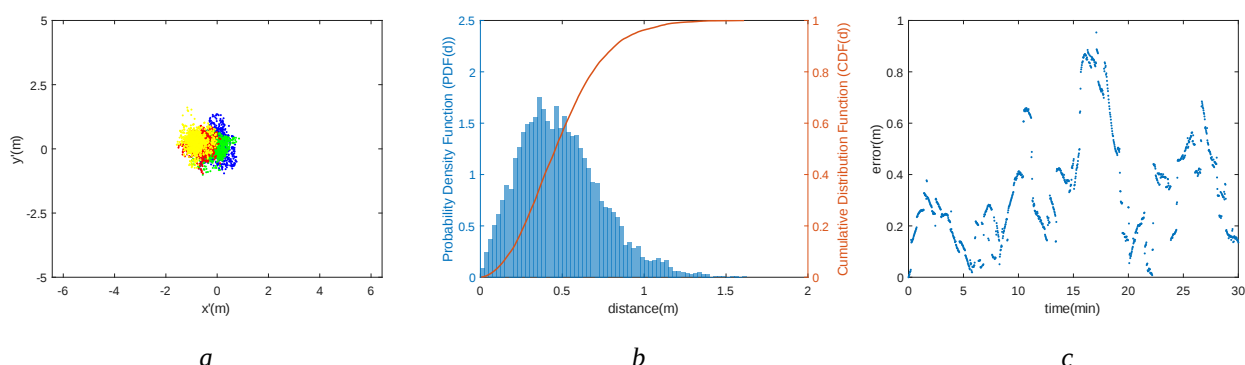


Figura 4.13. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Girona, a 645km del receptor de la Configuración 8: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

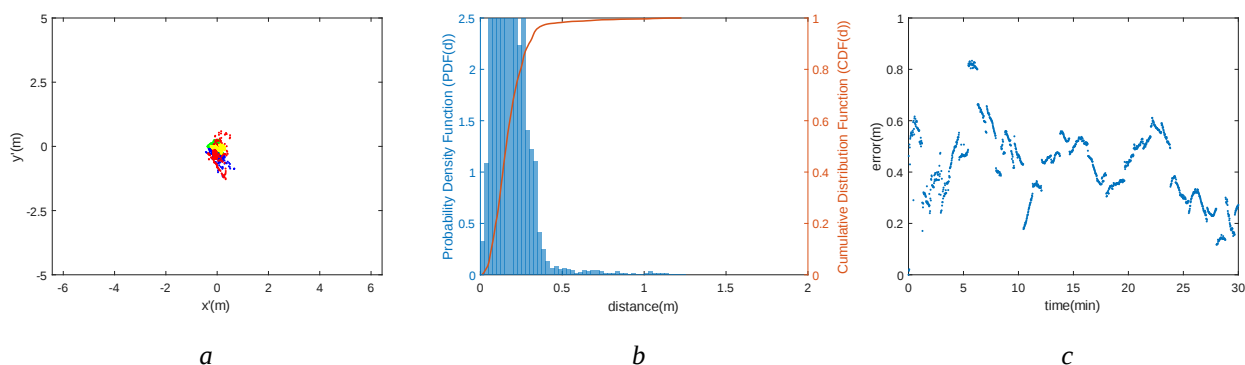


Figura 4.14. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Mérida, a 296 km del receptor de la Configuración 9: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial. Nótese que, para comparar los gráficos de diferentes configuraciones, la escala Y no se ha modificado con los gráficos de configuraciones anteriores, y algunas barras de la Función de Densidad de Probabilidad (Gráfico b) están por encima de los límites del gráfico.

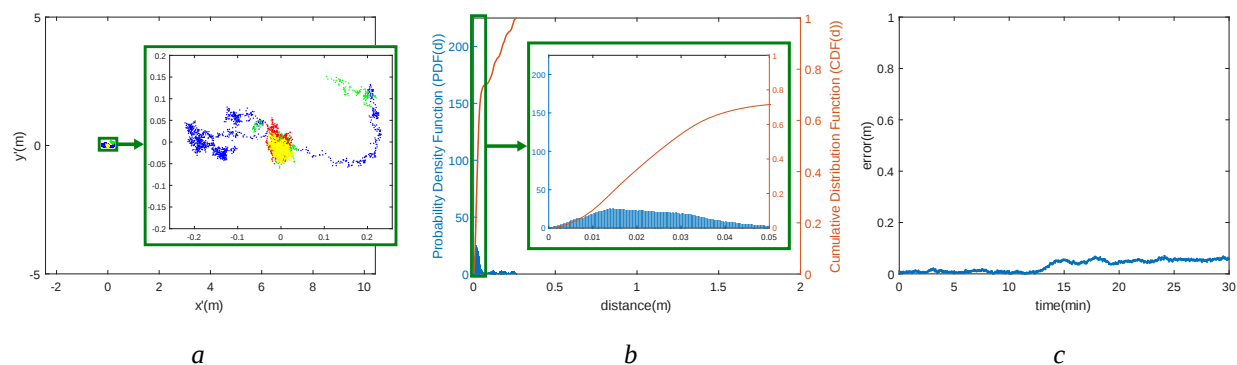


Figura 4.15. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Aranda de Duero, a 99 km del receptor de la Configuración 10: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulada calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

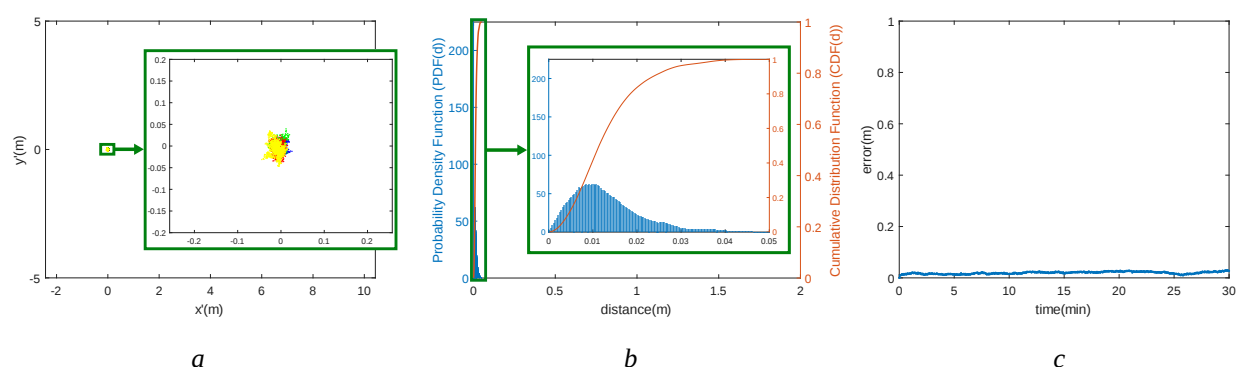


Figura 4.16. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Valladolid, a 42 km del receptor de la Configuración 11: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulada calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

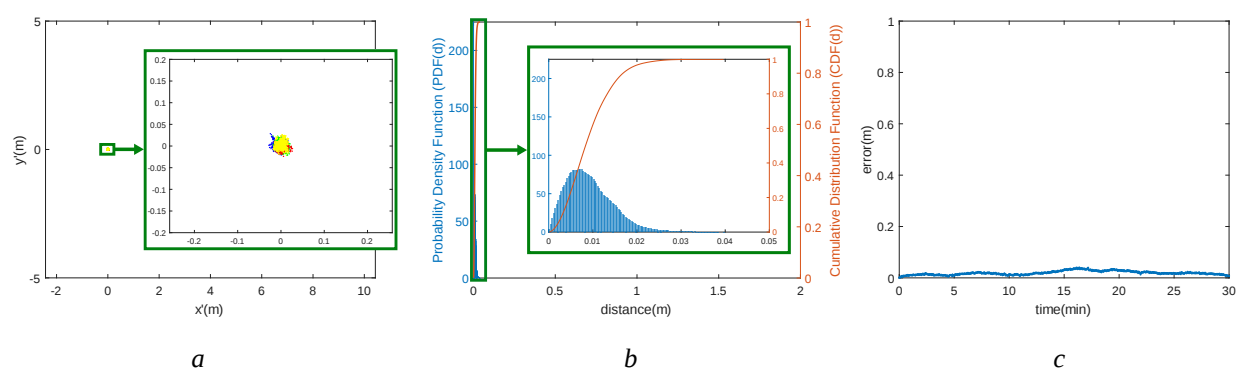


Figura 4.17. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Olmedo, a 14 km del receptor de la Configuración 12: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulada calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

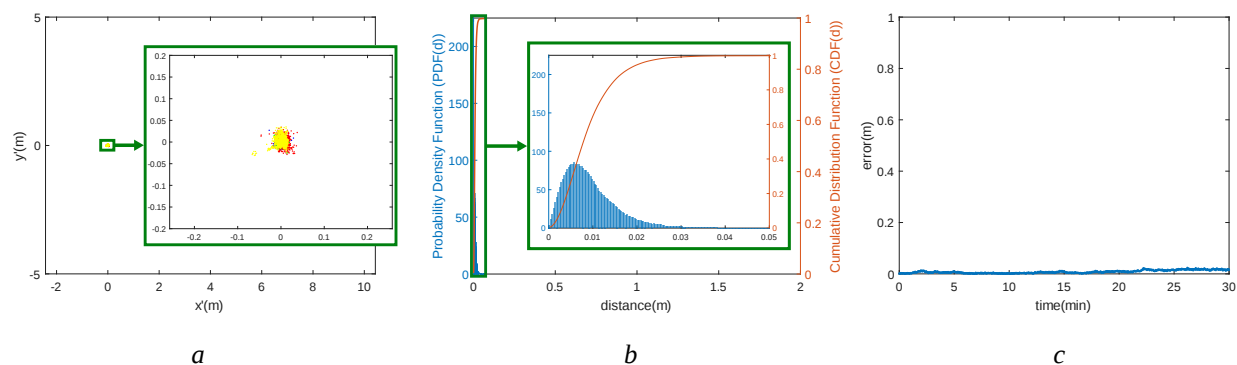


Figura 4.18. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con una Estación de Referencia Virtual en la ubicación del receptor de la Configuración 13: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

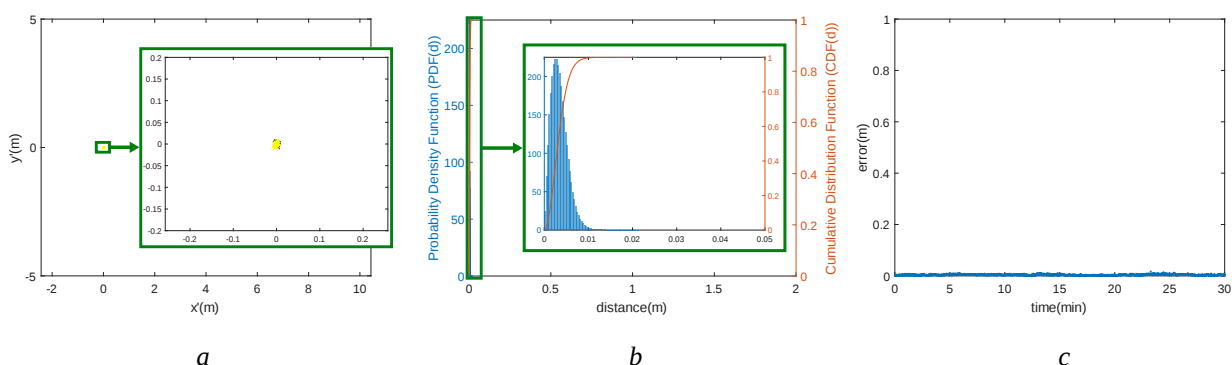


Figura 4.19. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK de la base Harxon TS103 a 5 m del receptor de la Configuración 14: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

La Tabla 1 presenta tres parámetros estadísticos calculados a partir de los datos de las pruebas en estático para cada configuración: (i) el error medio, que es la distancia media al punto de referencia, (ii) el error cuadrático medio (RMS), que es la raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado, y da gran peso a los errores grandes, y (iii) la desviación estándar (SD), que mide la cantidad de variación de los errores. Estos seis parámetros se muestran respecto a dos puntos de referencia: la posición media del receptor y la posición verdadera del receptor, calculados como se describe en la sección Métodos de la prueba estática.

Configuraciones	Error medio		Error RMS		SD	
	PM	PV	PM	PV	PM	PV
Configuración 1: Receptor Navilock NL-8022MP sin SBAS	1.84	2.49	2.16	2.93	1.14	1.55
Configuración 2: Receptor Navilock NL-8022MP con SBAS	1.62	1.88	1.84	2.14	0.89	1.02
Configuración 3: Receptor Novatel Smart2 sin SBAS y sin GLIDE	1.07	2.07	1.33	2.33	0.78	1.06
Configuración 4: Receptor Novatel Smart2 con SBAS y sin GLIDE	0.57	1.36	0.66	1.44	0.33	0.47
Configuración 5: Receptor Novatel Smart2 con SBAS y con GLIDE	0.57	1.81	0.68	1.87	0.37	0.45
Configuración 6: Receptor Harxon TS108PRO sin SBAS	0.91	1.29	1.04	1.47	0.51	0.69
Configuración 7: Receptor Harxon TS108PRO con SBAS	0.44	1.05	0.50	1.09	0.24	0.30
Configuración 8: receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 645 km del receptor.	0.49	0.66	0.55	0.73	0.25	0.32
Configuración 9: Receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 296 km del receptor.	0.18	0.20	0.22	0.24	0.12	0.13
Configuración 10: receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 99 km del receptor.	0.061	0.061	0.092	0.094	0.069	0.071
Configuración 11: receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 42 km del receptor.	0.013	0.014	0.015	0.016	0.008	0.009
Configuración 12: receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 14 km del receptor.	0.009	0.009	0.011	0.011	0.005	0.005
Configuración 13: Receptor Harxon TS108PRO con NRTK con una Estación de Referencia Virtual en la ubicación del receptor.	0.009	0.009	0.012	0.012	0.007	0.007
Configuración 14: Receptor Harxon TS108PRO con RTK con la base TS103 a 5 m del receptor.	0.003	0.003	0.004	0.004	0.002	0.002

Tabla 1: Error CEP, error R95, error R99.7, error medio, error RMS y desviación típica, calculados para cada configuración en base a dos puntos de referencia: la posición media (PM) y la posición verdadera (PV). Los valores se expresan en metros.

Las figuras de la Figura 4.20 a la Figura 4.33 muestran las trayectorias adquiridas durante las pruebas en dinámico para cada configuración. Cada figura contiene tres subfiguras con distintas ampliaciones en el eje vertical. En las figuras a el eje vertical está escalado entre -5 y 5 metros, en las figuras b el eje vertical está escalado entre -0.5 y 0.5 metros y en las figuras c el eje vertical está escalado entre -0.1 y 0.1 metros. La primera trayectoria se muestra en color verde, la segunda trayectoria se muestra en color azul y la tercera trayectoria se muestra en color rojo. En la figura, además se muestran dos líneas de referencia en color lila. La línea lila continua muestra la referencia absoluta o año a año y la línea discontinua muestra la referencia para relativa o pasada a pasada. Esta referencia está situada en el punto medio de todos los puntos de la primera trayectoria.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE SISTEMAS GRATUITOS DE CORRECCIÓN GNSS PARA EL GUIADO DE TRACTORES

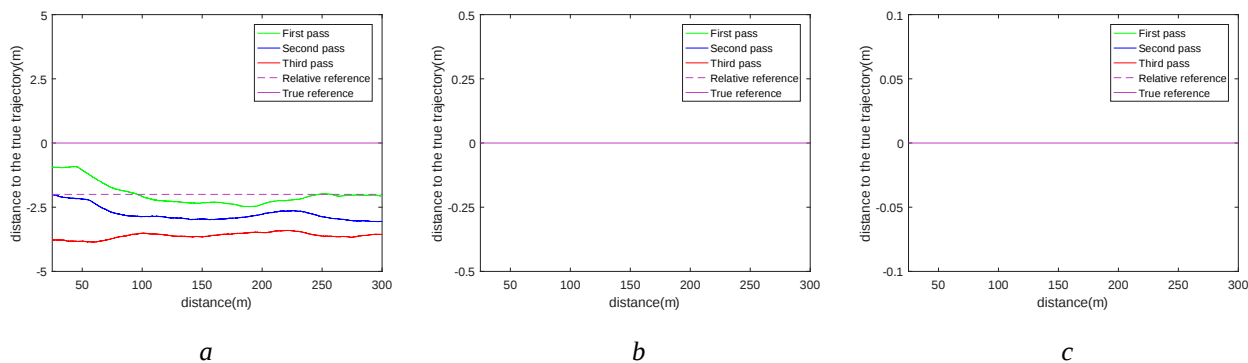


Figura 4.20. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Navilock NL8022MP sin SBAS de la Configuración 1. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

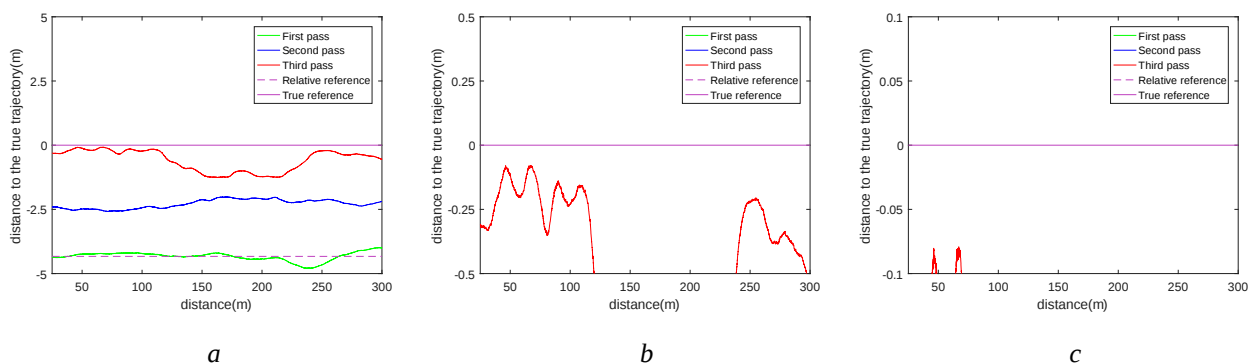


Figura 4.21. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Navilock NL8022MP con SBAS de la Configuración 2. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

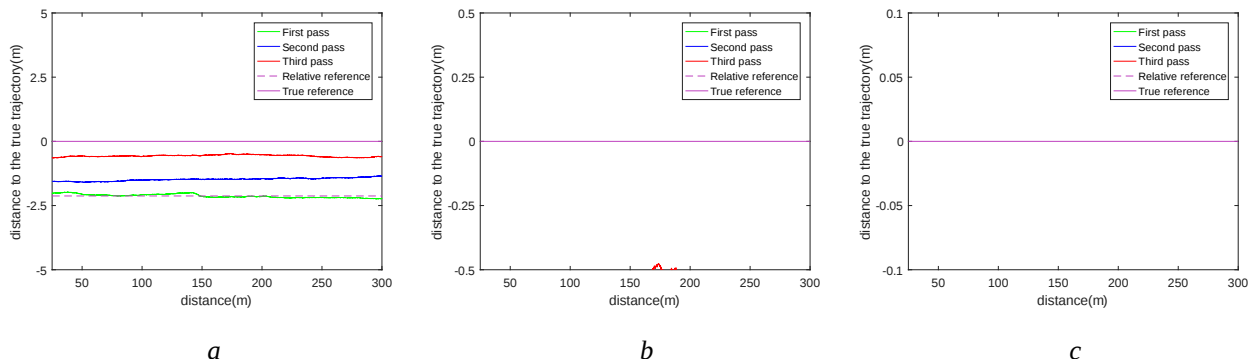


Figura 4.22. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Novatel Smart2 sin SBAS y sin GLIDE de la Configuración 3. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

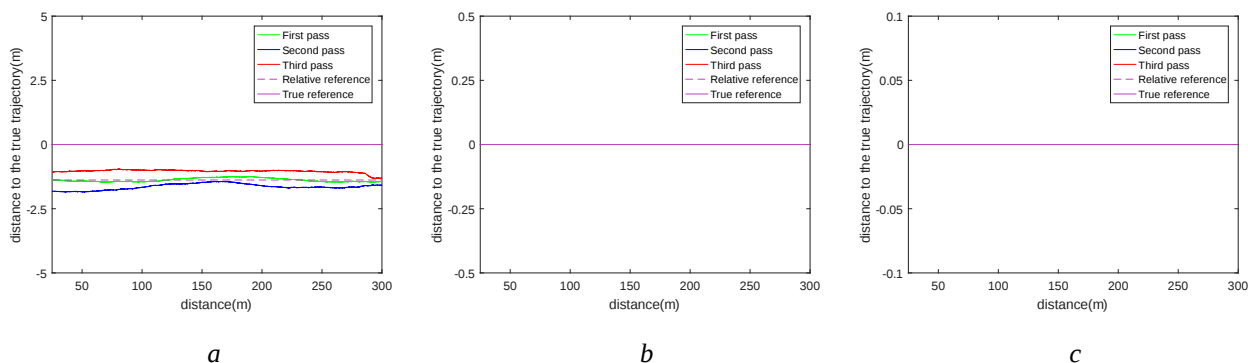


Figura 4.23. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Novatel Smart2 con SBAS y sin GLIDE de la Configuración 4. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE SISTEMAS GRATUITOS DE CORRECCIÓN GNSS PARA EL GUIADO DE TRACTORES

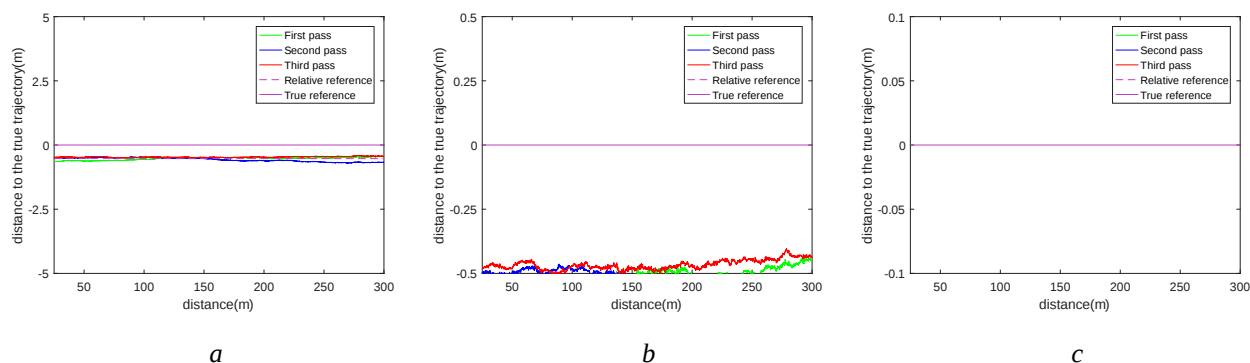


Figura 4.24. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Novatel Smart2 con SBAS y con GLIDE de la Configuración 5. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

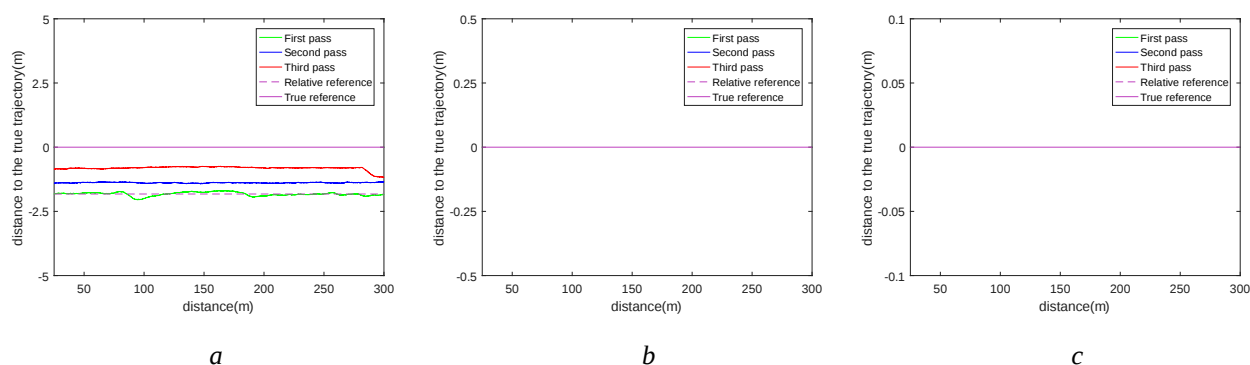


Figura 4.25. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO sin SBAS de la Configuración 6. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

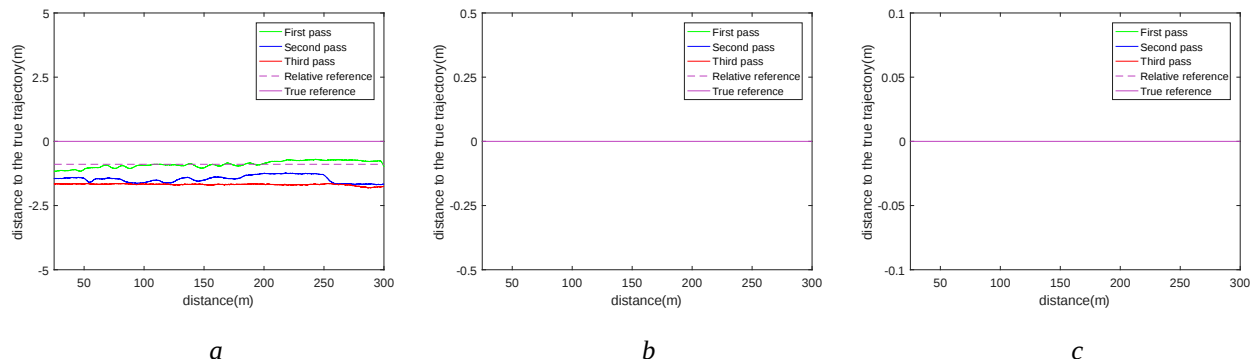


Figura 4.26. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con SBAS de la Configuración 7. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

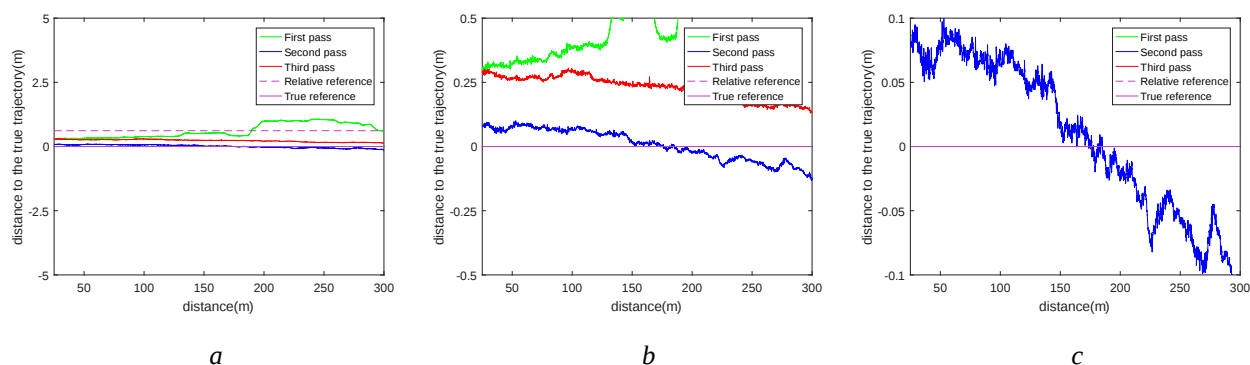


Figura 4.27. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Girona a 645 km de receptor de la Configuración 8. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE SISTEMAS GRATUITOS DE CORRECCIÓN GNSS PARA EL GUIADO DE TRACTORES

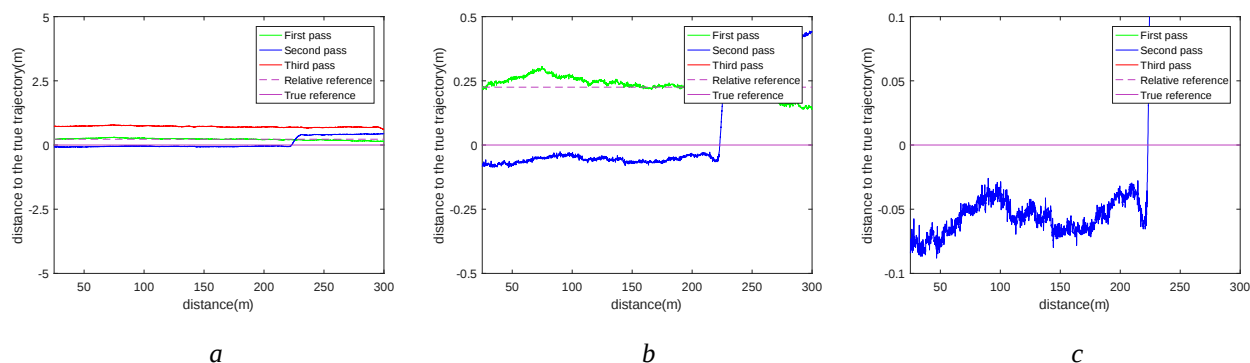


Figura 4.28. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Mérida a 296 km de receptor de la Configuración 9. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

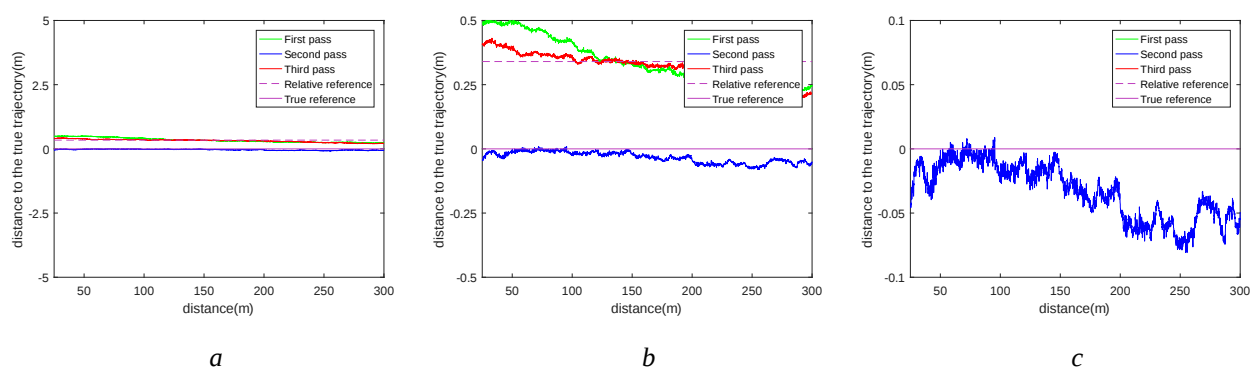


Figura 4.29. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Aranda de Duero a 99 km de receptor de la Configuración 10. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

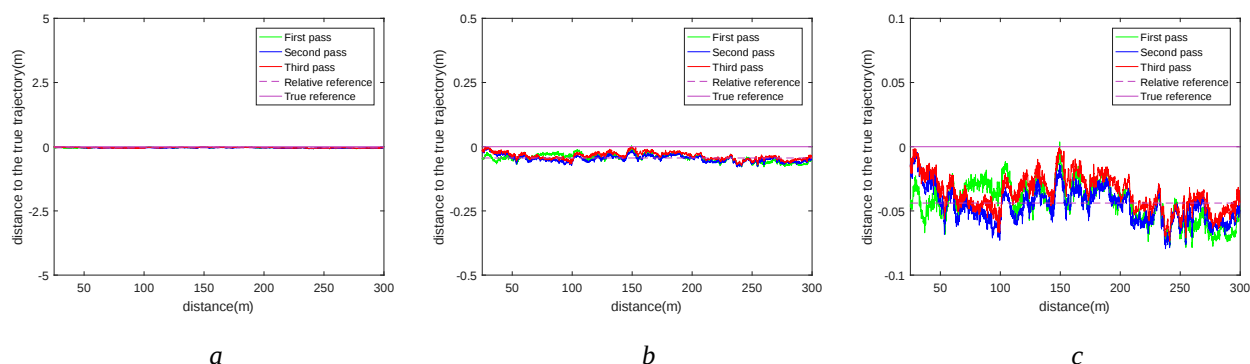


Figura 4.30. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Valladolid a 42 km de receptor de la Configuración 11. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE SISTEMAS GRATUITOS DE CORRECCIÓN GNSS PARA EL GUIADO DE TRACTORES

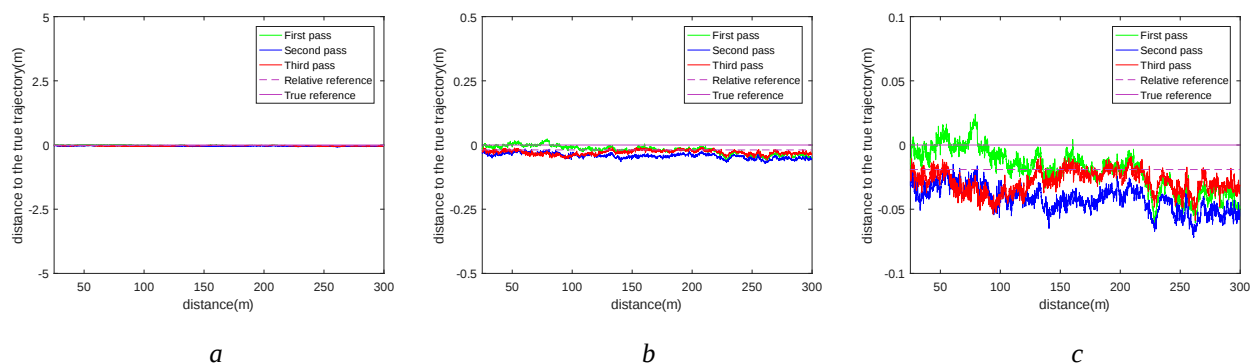


Figura 4.31. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Olmedo a 14 km de receptor de la Configuración 12. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

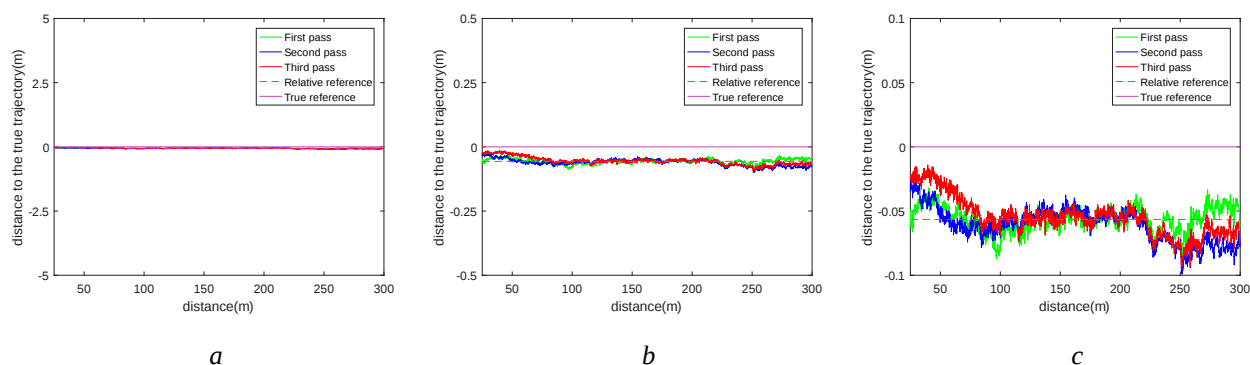


Figura 4.32. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con una Estación de Referencia Virtual en la ubicación del receptor de la Configuración 13. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

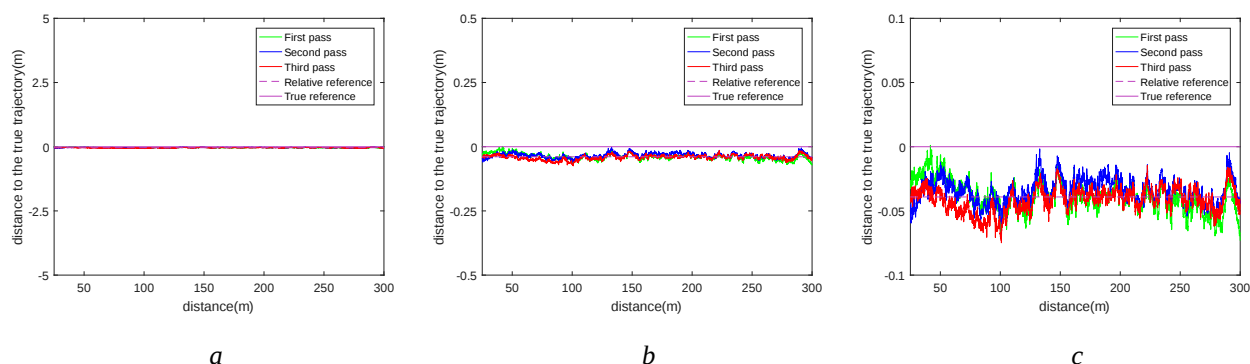


Figura 4.33. Gráficos obtenidos en las pruebas en dinámico del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la base Harxon TS103 a 5 m del receptor de la Configuración 14. El eje vertical se muestra entre (a) -5 y 5 m, (b) -50 y 50 cm y (c) -10 y 10 cm.

La Tabla 2 presenta tres parámetros estadísticos calculados a partir de los datos de las pruebas de guiado para cada configuración: (i) el error medio, (ii) el error RMS y (iii) la desviación estándar. Estos tres parámetros se muestran respecto a dos puntos de referencia: la referencia absoluta, que es la trayectoria real respecto a la antena de referencia que es la configuración de mayor precisión y la referencia relativa que es la trayectoria recta paralela a la referencia absoluta que pasa por el punto medio de todos los puntos de la primera pasada.

Configuraciones	Error medio		Error RMS		SD	
	referencia relativa	referencia absoluta	referencia relativa	referencia absoluta	referencia relativa	referencia absoluta
Configuración 1: Receptor Navilock NL-8022MP sin SBAS	0.60	2.79	0.72	2.88	0.40	0.72
Configuración 2: Receptor Navilock NL-8022MP con SBAS	0.52	2.43	0.66	2.89	0.36	1.56
Configuración 3: Receptor Novatel Smart2 sin SBAS y sin GLIDE	0.55	1.39	0.64	1.53	0.33	0.64
Configuración 4: Receptor Novatel Smart2 con SBAS y sin GLIDE	0.22	1.36	0.26	1.38	0.13	0.26
Configuración 5: Receptor Novatel Smart2 con SBAS y con GLIDE	0.06	0.52	0.07	0.53	0.04	0.07
Configuración 6: Receptor Harxon TS108PRO sin SBAS	0.35	1.34	0.41	1.40	0.22	0.42
Configuración 7: Receptor Harxon TS108PRO con SBAS	0.31	1.34	0.35	1.39	0.15	0.35
Configuración 8: receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 645 km del receptor.	0.22	0.30	0.30	0.42	0.20	0.29
Configuración 9: Receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 296 km del receptor.	0.27	0.36	0.30	0.45	0.14	0.27
Configuración 10: receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 99 km del receptor.	0.16	0.23	0.18	0.28	0.09	0.15
Configuración 11: receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 42 km del receptor.	0.012	0.042	0.015	0.045	0.009	0.015
Configuración 12: receptor Harxon TS108PRO con NRTK con la estación de referencia a 14 km del receptor.	0.012	0.031	0.015	0.034	0.009	0.015
Configuración 13: Receptor Harxon TS108PRO con NRTK con una Estación de Referencia Virtual en la ubicación del receptor.	0.010	0.057	0.013	0.059	0.009	0.013
Configuración 14: Receptor Harxon TS108PRO con RTK con la base TS103 a 5 m del receptor.	0.009	0.038	0.011	0.040	0.007	0.011

Tabla 2. Error medio, error RMS y desviación estándar para las pruebas en dinámico de cada configuración. Cada dato se muestra respecto a dos puntos de referencia: la referencia relativa y la referencia absoluta

4.5 Discusión

El error RMS que el GNSS autónomo produjo en el Navilock NL-8022MP, el Novatel Smart2, y el Harxon TS108PRO, fue, respectivamente, de 2.93, 2.33 y 1.47 metros para la referencia de posición verdadera en pruebas estáticas (ver Tabla 1). Estos datos indican un guiado con errores superiores al metro para el guiado a largo plazo e indican la necesidad de tomar la referencia en la parcela cada vez que se inicia la labor. Para las pruebas de guiado en el corto plazo, con la referencia relativa, el error RMS que el GNSS autónomo produjo en el Navilock NL-8022MP, el Novatel Smart2, y el Harxon TS108PRO, fue, respectivamente, de 0.72, 0.64 y 0.41 (ver Tabla 2). Estos datos indican errores ligeramente por debajo del metro para tareas en el corto plazo. La precisión submétrica a corto plazo entre pasadas obtenida con el posicionamiento GNSS autónomo cuando la referencia es una pasada anterior realizada en la última hora permitiría un guiado GNSS regular en la fertilización (67,68). El guiado con este posicionamiento es mucho más preciso que el guiado manual para implementos de tractor de gran anchura de trabajo (69). Los resultados obtenidos en las pruebas estáticas para el largo plazo y en las pruebas en guiado en el corto plazo concuerdan con los estudios de Stombaugh en la que indica que el error a largo plazo es tres veces mayor aproximadamente que el error entre pasadas a corto plazo (3).

El error RMS que el GNSS+EGNOS produjo en el Navilock NL-8022MP, el Novatel Smart2, y el Harxon TS108PRO, fue, respectivamente, de 2.14, 1.44 y 1.09 metros para la referencia de posición verdadera en pruebas estáticas (ver Tabla 1). Estos datos muestran una ligera mejora de precisión del error a largo plazo frente a la opción sin EGNOS. Los resultados de las pruebas de guiado para GNSS + EGNOS en el corto plazo con la referencia relativa produjeron un error RMS en el Navilock

NL-8022MP, el Novatel Smart2, y el Harxon TS108PRO, respectivamente, de 0.66, 0.26 y 0.35 metros (ver Tabla 2). Estos resultados muestran que el error ha disminuido muy ligeramente para los receptores Navilock y Harxon con la opción GNSS + EGNOS respecto a la opción de GNSS autónomo. Algunos autores como Grunwald et al. apenas notaron mejoras con el uso de EGNOS y Ciecko afirmó que en algunos casos EGNOS puede ser inestable (70). Para el receptor Novatel la disminución del error ha sido un poco mayor, de casi el 60 % al utilizar la opción EGNOS frente a no usarla. Krasuski y Wierzbicki obtuvieron un aumento de precisión de alrededor del 29% para la latitud y del 46% para la longitud (71); Yoon et al. obtuvieron un aumento de precisión del 40% (72); Tabti et al. notaron ligeras mejoras utilizando EGNOS (73); y Vázquez et al. encontraron una precisión similar a la que hemos obtenido para el receptor Novatel, afirmando que el GNSS con EGNOS puede soportar precisiones de paso a paso a corto plazo de 25 cm para el 95% del tiempo (49). Los datos obtenidos en nuestro estudio indican una ligera mejora tanto en el corto plazo como en el largo plazo utilizando EGNOS. Las pruebas de guiado en el corto plazo para la opción GNSS + EGNOS han ofrecido precisiones en torno a 0.5 m, lo que permite precisión suficiente para la fertilización y una precisión regular para la aplicación de herbicidas (67,68), siendo necesario tomar la referencia siempre al inicio de la labor.

El error RMS que produjo GNSS+EGNOS+GLIDE en el Novatel Smart 2 fue de 1.87 metros para la referencia de posición verdadera de la prueba estática (ver Tabla 1). Claramente, GLIDE no influyó en el error estático a largo plazo. La no reducción del error RMS en los ensayos estáticos de 24 horas es normal porque la tecnología GLIDE se centra en reducir el error entre pasadas a corto plazo, pero no el error a largo plazo. Neumann et al. explicaron la base de la tecnología GLIDE (74). Ford y Hamilton propusieron y probaron un filtro aparentemente similar al utilizado en GLIDE (75). El fabricante proporciona en su ficha técnica un gráfico claramente similar al de la Figura 4.10.c que hemos obtenido (14). El error RMS que produjo GNSS+EGNOS+GLIDE en el Novatel Smart 2 fue de 0.07 metros para la referencia relativa de la prueba de guiado en el corto plazo (ver Tabla 2). Esta precisión a corto plazo obtenida con el posicionamiento GNSS+EGNOS+GLIDE permitiría un buen guiado en la fertilización y la pulverización, y un guiado regular en la siembra, la cosecha y el laboreo (67,68) siendo necesario tomar la referencia al inicio de la labor.

El error RMS que NRTK produjo en el Harxon TS108PRO utilizando las estaciones base a 645 km, 296 km, 99 km, 42 km, 14 km y con VRS fue de 0.73, 0.24, 0.094, 0.016, 0.011 y 0.012 metros respectivamente para la referencia de posición verdadera de la prueba estática (ver Tabla 1). Estos datos indican una clara dependencia de la precisión con la distancia entre la base y el receptor. El fabricante de las antenas indica en su ficha técnica que la relación entre la precisión y la longitud entre la base y el receptor es de 1 cm + 1 ppm (23). Para los casos estudiados, se puede considerar que es una aproximación buena. Otros autores también estudian la influencia con la distancia con dependencias similares (76,77). Para el NRTK con estaciones base a menos de 50 km se obtienen precisiones buenas para todo tipo de aplicaciones en el largo plazo con errores inferiores a 2 cm, no siendo necesario situar la referencia al comenzar la labor. Al contrario, para distancias mucho mayores, sí será necesario situar la referencia al comenzar la labor. Generalmente las redes RTK se diseñan para que la distancia máxima a cualquier base no sea superior a 50 km (78). El error RMS que NRTK produjo en el Harxon TS108PRO utilizando las estaciones base a 645 km, 296 km, 99 km, 42 km, 14 km y VRS fue de 0.30, 0.30, 0.18, 0.015, 0.015 y 0.013 metros respectivamente para

la referencia relativa en las pruebas de guiado (ver Tabla 2). Para el NRTK con estaciones base a más de 50 km se obtienen errores de unas pocas decenas de centímetros, esto permitiría un buen guiado en la fertilización y la pulverización, y un guiado regular en la siembra, la cosecha y el laboreo (67,68). Para el NRTK con estaciones base a menos de 50 km se obtienen errores inferiores a 2 centímetros, permitiendo un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas, sin ninguna restricción temporal.

El error RMS que RTK produjo en el Harxon TS108PRO fue de 0,004 metros para la referencia de posición verdadera de la prueba estática (ver Tabla 1) y de 0.011 metros en la prueba de guiado con la referencia relativa (ver Tabla 2), mejorando la precisión respecto a NRTK. RTK permite un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas sin restricciones, sin embargo, RTK requiere que los agricultores coloquen una costosa estación de referencia cerca del tractor, y entonces, no se justifica el uso de RKT si hay NRTK disponible para los agricultores.

4.6 Conclusiones

Este estudio concluye que (i) los receptores GNSS de bajo coste sin datos de corrección permiten guiar el tractor con errores típicos entre pasadas a corto plazo de aproximadamente 1 metro RMS, precisión que permitiría un guiado regular en la fertilización cuando la referencia es una pasada anterior realizada en la última hora, (ii) EGNOS mejora ligeramente la precisión de guiado permitiendo alcanzar errores de pasada a pasada a corto plazo inferiores al metro RMS, precisión que permitiría un buen guiado para fertilización y un guiado regular en pulverización (iii) GLIDE mejora el guiado de precisión entre pasadas a corto plazo. La precisión de nivel submétrico de GNSS+EGNOS+GLIDE alcanza precisiones de 10 cm y permitiría un guiado aceptable en fertilización y pulverización, y un guiado regular en siembra, cosecha y labranza, (iv) NRTK ofrece un guiado de precisión a corto y largo plazo de 2 cm, precisión que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas con una única restricción: al menos una estación de referencia debe estar a menos de 50 km del tractor, y (v) RTK alcanza una precisión de guiado a corto y largo plazo de 1 cm, que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas sin restricciones, pero requiere colocar una costosa estación de referencia cerca del tractor, no estando entonces justificado el uso de RTK si los agricultores disponen de NRTK.

Capítulo 5: Conclusiones

Capítulo 5: Conclusiones

En este Trabajo Fin de Máster se ha realizado un estudio sobre la precisión de receptores y tecnologías GNSS aplicadas al guiado de tractores con autoguiado. A partir del análisis del estado del arte y de los resultados obtenidos en el estudio se pueden extraer varias conclusiones.

En primer lugar, los autores resaltan los beneficios del uso de receptores y tecnologías GNSS en términos de reducción de costos y mejor aprovechamiento de insumos. Señalan que una mayor precisión en el trabajo disminuye los solapamientos entre pasadas, lo que reduce el consumo de insumos y, en consecuencia, los costos. Del mismo modo, minimiza las áreas sin tratar, lo que mejora la eficiencia en las labores agrícolas. Esta reducción de costes está relacionada con la precisión con la que se efectúan las labores agrícolas, la cual depende tanto del modo de guiado, siendo el autoguiado el que ofrece mejores resultados, seguido del guiado asistido y, por último, el guiado manual, como de las tecnologías utilizadas.

Teniendo en cuenta esta relación entre precisión y eficiencia, en este estudio se han analizado las precisiones obtenidas para distintas tecnologías de guiado, permitiendo evaluar su idoneidad para diferentes aplicaciones agrícolas:

En el caso del modo autónomo, los resultados muestran valores en torno a los 2 m RMS en el largo plazo lo que hace necesario situar la referencia cada vez que se comienza la labor. La precisión en el corto plazo está en torno al 1 m RMS. Estas precisiones pueden ser válidas para aplicaciones que requieran gran ancho de trabajo como máquinas de herbicidas o abonadoras. Para aplicaciones de un ancho de trabajo menor como la siembra o la cosecha la precisión es insuficiente.

La incorporación de correcciones SBAS ha permitido pequeñas mejoras respecto a la precisión obtenida en autónomo tanto en el largo como en el corto plazo, por lo que de manera similar a utilizar únicamente GNSS, puede ser válida para aplicaciones que requieran gran ancho de trabajo, siendo insuficiente para aplicaciones que requieren mayor exactitud en la trayectoria del vehículo y siendo siempre necesario situar la referencia al comenzar a trabajar.

La tecnología GLIDE ha demostrado ser efectiva en el corto plazo, manteniendo una variación controlada del error, evitando saltos bruscos entre posiciones consecutivas. La combinación de GNSS + SBAS + GLIDE ha mejorado aún más la precisión en el corto plazo, permitiendo su uso en labores con anchos de trabajo inferiores a 10 m, como la siembra o la labranza, donde errores de hasta 10 cm pueden ser aceptables. Sin embargo la precisión en el largo plazo de GNSS + SBAS +

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

GLIDE tiene errores superiores al metro RMS, lo que hace necesario indicar la referencia al comenzar a trabajar.

En cuanto a la tecnología NRTK, los resultados han confirmado su capacidad para proporcionar un posicionamiento altamente preciso, con errores del orden de centímetros, lo que la hace adecuada para prácticamente cualquier tipo de aplicación agrícola. Además, esta precisión centimétrica permite la repetición de trayectorias año tras año sin desviaciones significativas. Sin embargo, se ha observado que la precisión NRTK tiende a degradarse a medida que aumenta la distancia con respecto a la estación base. Según los resultados obtenidos, se recomienda mantener una base RTK a menos de 50 km para garantizar precisiones cercanas a los 2 cm.

Por último, RTK mediante una base propia en la misma parcela alcanza una precisión de guiado a corto y largo plazo de 1 cm, que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas sin restricciones, pero requiere colocar una costosa estación de referencia cerca del tractor, no estando entonces justificado el uso de RTK si los agricultores disponen de NRTK con bases a menos de 50 km.

Capítulo 6: Líneas futuras

Capítulo 6: Líneas futuras

Este estudio ha proporcionado una evaluación de la precisión de distintos receptores GNSS y tecnologías de corrección en el ámbito del autoguiado agrícola. No obstante, se puede seguir ampliando el estudio de diversas maneras. A continuación, se proponen varias líneas de investigación futura:

Una posible línea de trabajo futuro es la evaluación del rendimiento de nuevas tecnologías de corrección, como el servicio HAS (*High Accuracy Service*) de Galileo, el cual ofrece correcciones gratuitas tanto a través de señal satelital como por Internet. Comparar su desempeño frente a EGNOS, RTK y NRTK permitiría conocer su viabilidad en aplicaciones de autoguiado agrícola y determinar si su precisión es suficiente para diversas labores en el campo.

Otro aspecto a explorar es el análisis de los servicios de corrección de pago, como TerraStar de NovAtel, StarFire de John Deere o Atlas de Hemisphere, que ofrecen precisiones centimétricas con cobertura global. Evaluar su relación costo-beneficio en comparación con los métodos analizados hasta el momento permitiría valorar su aplicación en distintos escenarios agrícolas, considerando tanto la inversión inicial como los costos de suscripción.

Otro punto sería evaluar cómo factores ambientales, como la nubosidad, la lluvia, la niebla o la actividad ionosférica, afectan la precisión de los distintos sistemas GNSS, dado que las pruebas realizadas en este Trabajo Fin de Máster se llevaron a cabo en condiciones climáticas óptimas. Un estudio a lo largo de un año completo permitiría analizar el impacto estacional de estas condiciones y desarrollar estrategias para mitigar su influencia en el guiado de precisión.

Por último, la irrupción de la Inteligencia Artificial en distintos ámbitos abre nuevas oportunidades para mejorar la precisión de los sistemas de autoguiado. La implementación de modelos de aprendizaje automático capaces de predecir y corregir errores GNSS en tiempo real podría suponer una mejora significativa en la precisión sin necesidad de infraestructuras adicionales. Esta línea de investigación permitiría desarrollar sistemas más eficientes y adaptativos, capaces de optimizar el guiado incluso en condiciones adversas.

Estas líneas futuras permitirían ampliar este estudio y seguir avanzando en mejora de la precisión y fiabilidad de los sistemas de autoguiado para agricultura de precisión.

Referencias

1. Navigation Satellites. In: Satellite Technology. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd; 2014. p. 614–57.
2. <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/basic-concepts/reception>. 2025.
3. Stombaugh T. Satellite-based Positioning Systems for Precision Agriculture. In 2018. p. 25–35.
4. <https://acolita.com/como-funcionan-los-dispositivos-gps-trilateracion-vs-triangulacion/>. 2025.
5. <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/basic-concepts/computation>. 2025.
6. <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/gnss-error-sources>. 2025.
7. Saurabh Godha. Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated With GPS for Land Vehicle Navigation Application. [Calgary, Alberta]: UNIVERSITY OF CALGARY; 2006.
8. Ebbesen Schultz C. INS and GPS integration. [Lyngby, Denmark]: University of Denmark; 2006.
9. <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/resolving-errors/multi-frequency-multi-constellation>. 2025.
10. Stephan Sand ADCM. Introduction. In: Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley; 2014. p. 1–20.
11. Teunissen PJG, Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Teunissen PJG, Montenbruck O, editors. Cham: Springer International Publishing; 2017.
12. <https://es.wikipedia.org/wiki/SBAS>. 2025.
13. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/PPP_Standards. 2025.
14. <https://novatel.com/products/firmware-options-pc-software/gnss-receiver-firmware-options/glide>. 2025.
15. https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_navegaci%C3%B3n_inercial. 2025.
16. <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/sensor-fusion/gnss-ins-systems>. 2025.

17. Tirrerton DH, Weston JL, American Institute of Aeronautics and Astronautics. Strapdown inertial navigation technology. 2nd ed. 2004.
18. Woodman OJ. An introduction to inertial navigation. Cambridge; 2007 Aug.
19. <https://es.wikipedia.org/wiki/Gir%C3%B3scopo>. 2025.
20. https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter. 2025.
21. <https://www.navilock.com/produkt/62529/merkmale.html?setLanguage=es>. 2025.
22. <https://novatel.com/products/gps-gnss-smart-antennas/smart2>. 2025.
23. <https://en.harxon.com/product/detail/156>. 2025.
24. <https://en.harxon.com/product/detail/90>. 2025.
25. <https://tractordrive.es/>. 2025.
26. Stafford JV, Ambler B. In-field location using GPS for spatially variable field operations. *Comput Electron Agric*. 1994 Oct;11(1):23–36.
27. S. C. Borgelt, J. D. Harrison, K. A. Sudduth, S. J. Birrell. Evaluation of GPS for Applications in Precision Agriculture. *Appl Eng Agric*. 1996;12(6):633–8.
28. van Zuydam RP. Centimeter-Precision Guidance of Agricultural Implements in the Open Field by Means of Real Time Kinematic Dgps. In 1999. p. 1023–34.
29. Dunn PK, Powierski AP, Hill R. Statistical evaluation of data from tractor guidance systems. *Precis Agric*. 2006 Jul 23;7(3):179–92.
30. Gan-Mor S, Clark RL, Upchurch BL. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Comput Electron Agric*. 2007 Nov;59(1–2):31–8.
31. Baio FHR. Evaluation of an auto-guidance system operating on a sugar cane harvester. *Precis Agric*. 2012 Feb 9;13(1):141–7.
32. Perez-Ruiz M, Slaughter DC, Gliever C, Upadhyaya SK. Tractor-based Real-time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant. *Biosyst Eng*. 2012 Jan;111(1):64–71.
33. J. Carballido MPRLEJA. Comparison of Positional Accuracy between RTK and RTX GNSS Based on the Autonomous Agricultural Vehicles under Field Conditions. *Appl Eng Agric*. 2014 Jul 14;361–6.
34. Kabir MdSN, Song MZ, Sung NS, Chung SO, Kim YJ, Noguchi N, et al. Performance comparison of single and multi-GNSS receivers under agricultural fields in Korea. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2016 Jan;9(1):27–35.
35. R.Guzmán JARNCMLJGMRABRB. Autonomous hybrid gps/reactive navigation of an unmanned ground vehicle for precision viticulture -VINBOT. In Barcelona; 2016.

36. Lipiński AJ, Markowski P, Lipiński S, Pyra P. Precision of tractor operations with soil cultivation implements using manual and automatic steering modes. *Biosyst Eng.* 2016 May;145:22–8.
37. Santos AF dos, Correa LN, Gírio LAS, Paixão CSS, Silva RP da. POSITION ERRORS IN SOWING IN CURVED AND RECTILINEAR ROUTES USING AUTOPILOT. *Engenharia Agrícola.* 2018 Aug;38(4):568–76.
38. Radicioni F, Stoppini A, Brigante R, Brozzi A, Tosi G. GNSS Network RTK for Automatic Guidance in Agriculture: Testing and Performance Evaluation. In 2020. p. 19–35.
39. Nguyen N Van, Cho W. Performance Evaluation of a Typical Low-Cost Multi-Frequency Multi-GNSS Device for Positioning and Navigation in Agriculture—Part 2: Dynamic Testing. *AgriEngineering.* 2023 Jan 11;5(1):127–40.
40. Azmi MA, Mohammad R, Pebrian D El. A computer-based mapping approach for evaluating straight-line accuracy of autopilot tractor traversing the oil palm field terrain. *Smart Agricultural Technology.* 2022 Dec;2:100033.
41. Zhang N, Wang M, Wang N. Precision agriculture—a worldwide overview. *Comput Electron Agric.* 2002 Nov;36(2–3):113–32.
42. Auernhammer H. Precision farming — the environmental challenge. *Comput Electron Agric.* 2001 Feb;30(1–3):31–43.
43. Shannon K, Clay DE, Newell RK. Precision Agriculture Basics. Kent Shannon D, Clay DE, Kitchen NR, editors. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America; 2018.
44. Cisternas I, Velásquez I, Caro A, Rodríguez A. Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Comput Electron Agric.* 2020 Sep;176:105626.
45. Lowenberg-DeBoer J, Erickson B. Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption. *Agron J.* 2019 Jul;111(4):1552–69.
46. Perez-Ruiz M, Martínez-Guanter J, Upadhyaya SK. High-precision GNSS for agricultural operations. In: *GPS and GNSS Technology in Geosciences.* Elsevier; 2021. p. 299–335.
47. Magiera W, Vārna I, Mitrofanovs I, Silabrieds G, Krawczyk A, Skorupa B, et al. Accuracy of Code GNSS Receivers under Various Conditions. *Remote Sens (Basel).* 2022 May 30;14(11):2615.
48. Alkan RM, Erol S, İlçi V, Ozulu İM. Comparative analysis of real-time kinematic and PPP techniques in dynamic environment. *Measurement.* 2020 Oct;163:107995.

49. Vázquez J, Lacarra E, Morán J, Sánchez MA, González A, Bruzual J. EDAS (EGNOS Data Access Service) Differential GNSS Corrections: A Reliable Free-of-Charge Alternative for Precision Farming in Europe. *Annual of Navigation*. 2019 Dec 1;26(1):46–58.
50. Steigenberger P, Seitz M, Böckmann S, Tesmer V, Hugentobler U. Precision and accuracy of GPS-derived station displacements. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2012;53–54:72–9.
51. Schaefer M, Pearson A. Accuracy and precision of GNSS in the field. In: *GPS and GNSS Technology in Geosciences*. Elsevier; 2021. p. 393–414.
52. Pérez-Ruiz M, Carballido J, Agüera J, Gil JA. Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles. *Precis Agric*. 2011 Oct 26;12(5):639–52.
53. İlçi V. Accuracy comparison of real-time GNSS positioning solutions: Case study of Mid-North Anatolia. *Measurement*. 2019 Aug;142:40–7.
54. Garrido MS, de Lacy MC, Ramos MI, Borque MJ, Susi M. Assessing the accuracy of NRTK altimetric positioning for precision agriculture: test results in an olive grove environment in Southeast Spain. *Precis Agric*. 2019 Jun 24;20(3):461–76.
55. El-Rabbany ahmed. *Introduction to GPS: The Global Positioning System*. 2002.
56. Hemisphere GNSS Technical Reference Guide [Internet]. 2025 [cited 2025 Apr 2]. Available from: https://www.subseatechnologies.com/media/files/files/31889a85/Hemisphere_GNSS_Technical_Reference_Guide_v1.07.1_STI.pdf
57. Marucci A, Colantoni A, Zambon I, Egidi G. Precision Farming in Hilly Areas: The Use of Network RTK in GNSS Technology. *Agriculture*. 2017 Jul 20;7(7):60.
58. Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Comput Electron Agric*. 2000 Jan;25(1–2):169–94.
59. Bell T. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. *Comput Electron Agric*. 2000 Jan;25(1–2):53–66.
60. Reid JF, Zhang Q, Noguchi N, Dickson M. Agricultural automatic guidance research in North America. *Comput Electron Agric*. 2000 Jan;25(1–2):155–67.
61. Li S, Zhang M, Ji Y, Zhang Z, Cao R, Chen B, et al. Agricultural machinery GNSS/IMU-integrated navigation based on fuzzy adaptive finite impulse response Kalman filtering algorithm. *Comput Electron Agric*. 2021 Dec;191:106524.
62. Khot LR, Tang L, Steward BL, Han S. Sensor fusion for improving the estimation of roll and pitch for an agricultural sprayer. *Biosyst Eng*. 2008 Sep;101(1):13–20.

63. Zhang Q, Chen Q, Xu Z, Zhang T, Niu X. Evaluating the navigation performance of multi-information integration based on low-end inertial sensors for precision agriculture. *Precis Agric.* 2021 Jun 14;22(3):627–46.
64. Nagasaka Y, Saito H, Tamaki K, Seki M, Kobayashi K, Taniwaki K. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit. *J Field Robot.* 2009 Jun;26(6–7):537–48.
65. Sun H, Slaughter DC, Ruiz MP, Gliever C, Upadhyaya SK, Smith RF. RTK GPS mapping of transplanted row crops. *Comput Electron Agric.* 2010 Apr;71(1):32–7.
66. Grewal MS, Andrews AP, Bartone CG. *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration.* Wiley; 2020.
67. Lange AF, Peake J. Precision Agriculture. In: *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century* [Internet]. Wiley; 2020. p. 1735–47. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119458555.ch56>
68. Barna R, Tóth K, Nagy MZ, Solymosi K. Technical characteristics of global navigation satellite systems and their role in precision agriculture. *Journal of Agricultural Informatics.* 2020 Jul 17;11(1).
69. Balsari P, Tamagnone M. An Automatic Tractor Guidance. *IFAC Proceedings Volumes.* 2000 Jul;33(19):21–6.
70. Ciećko A. Analysis of the EGNOS quality parameters during high ionosphere activity. *IET Radar, Sonar & Navigation.* 2019 Jul 8;13(7):1131–9.
71. Krasuski K, Wierzbicki D. Application the SBAS/EGNOS Corrections in UAV Positioning. *Energies (Basel).* 2021 Jan 31;14(3):739.
72. Yoon H, Seok H, Lim C, Park B. An Online SBAS Service to Improve Drone Navigation Performance in High-Elevation Masked Areas. *Sensors.* 2020 May 27;20(11):3047.
73. Tabti L, Kahlouche S, Benadda B, Beldjilali B. Improvement of Single-Frequency GPS Positioning Performance Based on EGNOS Corrections in Algeria. *The Journal of Navigation* [Internet]. 2020/01/17. 2020;73(4):846–60. Available from: <https://www.cambridge.org/core/article/improvement-of-singlefrequency-gps-positioning-performance-based-on-egnos-corrections-in-algeria/7DC38DB809932684DB7EFC7F0B652170>
74. Neumann J, Ellum C, Salycheva A, Culling B. Technologies for Optimized Pass-to-Pass Positioning Performance. In 2016. p. 3579–87.
75. Ford TJ, Hamilton J. A New Positioning Filter: Phase Smoothing in the Position Domain. *Navigation.* 2003 Jun;50(2):65–78.

76. Gökdaş Ö, Özlüdemir MT. A Variance Model in NRTK-Based Geodetic Positioning as a Function of Baseline Length. *Geosciences* (Basel). 2020 Jul 9;10(7):262.
77. Baybura T, Tiryakioğlu İ, Uğur MA, Solak Hİ, Şafak Ş. Examining the Accuracy of Network RTK and Long Base RTK Methods with Repetitive Measurements. *J Sens*. 2019 Nov 18;2019:1–12.
78. European Global Navigation Satellite Systems Agency. PPP-RTK market and technology report.