



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Plan de especialización para optar por el título de Ingeniero
Agrónomo

***"Señales de navegación y su uso en la maquinaria agrícola:
tránsito controlado"***

Alumno: Perez Paz, Facundo Leonel

Director: Ing. Agr. Barca, Hernán Javier.

Lomas de Zamora, Octubre 2024

CARÁTULA

Denominación del proyecto

"Señales de navegación y su uso en la maquinaria agrícola: tránsito controlado"

Identificación del proyecto

Carrera: Ingeniería Agronómica

Ejecutor: Facundo Leonel Perez Paz

Unidades ejecutoras:

- Facultad de Ciencias Agrarias de la UNLZ
- Escuela de Formación para el Agro Venturino

Director

Apellido y Nombre: Barca Hernán

Cargo: Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Maquinaria Agrícola. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

Dedicación: Simple

Fecha de iniciación del proyecto: Marzo 2024

"Las opiniones expresadas por el autor de este trabajo no representan necesariamente los criterios de la Carrera de Ingeniería Agronómica de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Lomas de Zamora".

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	7
Señales de Navegación en la agricultura de precisión.....	10
Global Navigation Satellite Systems (GNSS).....	10
Componentes del Sistema GNSS.....	11
El segmento espacial.....	12
El segmento de control.....	12
El segmento de usuario.....	12
Global Positioning System (GPS).....	13
Constelación GPS.....	13
Características de la constelación GPS.....	14
La señal del GPS.....	14
Tipos de Señales GPS.....	15
Componentes del sistema GPS.....	16
Segmento Espacial.....	16
Segmento de Control.....	17
Relojes atómicos y osciladores.....	18
Segmento de Usuarios.....	19
Error en la señal GPS.....	19
Fuentes de error en la señal GPS.....	20
Retrasos ionosféricos.....	20
Elevación del satélite.....	21
La densidad de la ionosfera.....	21
Errores en el reloj del Satélite y del Receptor.....	22
Efecto Multitrayectoria.....	22
Dilución de la Precisión.....	23
Receptores de la señal GPS.....	23
Tipos de receptores de la señal GPS.....	24
Precisión de la señal GPS.....	25
Redes de Corrección Diferencial de la señal GPS.....	25
Tipos de correcciones de la señal GPS.....	26
Efecto de las Tormentas Solares en el funcionamiento del GPS.....	27
Movimiento de placas tectónicas.....	28
Importancia del movimiento de las placas tectónicas y la señal GPS.....	28
Precisión y Repetibilidad de la señal GPS.....	29

Efecto del movimiento de las placas tectónicas en la señal GPS.....	29
Marcas comerciales de señal GPS disponibles en el mercado.....	30
Tecnologías asociadas a la agricultura de precisión.....	32
Piloto Automático.....	33
Piloto automático mecánico.....	33
Piloto automático hidráulico.....	34
Banderillero Satelital.....	35
Sistema de guiado óptico (Guidance Claas).....	36
Sistema de guiado por sensores mecánicos (John Deere AutoTrac Row Sense).....	36
Sincronización de equipos de cosecha (John Deere Machine Sync).....	37
Guiado pasivo de implemento agrícola (True Guide implement guidance system).....	38
Guiado activo de implemento agrícola (True Tracker implement steering system).....	39
Giro en Cabecera (AutoTrac).....	40
Tránsito Controlado Agrícola.....	41
CONCLUSIÓN.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Diferentes materiales que componen a los osciladores y cuantos años demoran en perder un segundo	18
Tabla II. Marcas comerciales de señales GPS	30
Tabla III. Calidad de señal según la labor agrícola	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aumento en la adopción de la tecnología en los diferentes años	9
Figura 2. Esquemas de la diferencia entre GPS y GNSS	11
Figura 3. Representación del funcionamiento en conjunto de los tres segmentos del GNSS	11
Figura 4. Esquema de las diferentes frecuencias de las señales GPS	15
Figura 5. Esquema de los 29 satélites que componen la constelación GPS	17
Figura 6. Representación del Segmento de Control GPS. Ubicación de la estación maestra y como las estaciones secundarias se comunican con ella	18
Figura 7. Esquema del cálculo del posicionamiento	20
Figura 8. Desviación de la señal al ingresar a la Ionosfera	20
Figura 9. Representación del efecto en la elevación del satélite	21
Figura 10. Desvío de la señal por los diferentes objetos cerca de los receptores	22

Figura 11. Esquema de dilución de la precisión (DOP)	23
Figura 12. Esquema del funcionamiento de la Antena Beacon y la ubicación de las tres torres marcando el área de cobertura que se obtiene en Argentina	26
Figura 13. Esquema del funcionamiento del Satélite Geoestacionario	27
Figura 14. Representación de las placas tectónicas y los tipos de movimientos que pueden tener	28
Figura 15. Representación de la repetibilidad de la señal GPS y su relación con el movimiento de las placas tectónicas.	29
Figura 16. Componentes del piloto automático mecánico de la marca John Deere (volante, 2 monitores diferentes y el receptor de señal)	34
Figura 17. Diferentes pilotos automáticos hidráulicos presentes en el mercado	34
Figura 18. Ejemplo de banderillero humano y banderillero satelital	35
Figura 19. Funcionamiento del Guidance Claas	36
Figura 20. AutoTrac Row Sense de la marca John Deere	37
Figura 21. Funcionamiento de Machine Sync de la marca John Deere	38
Figura 22. Funcionamiento del True Guide implement guidance system	39
Figura 23. Funcionamiento del True Tracker implement steering system	40
Figura 24 A. Vista en el monitor del giro en cabecera automático	40
Figura 24 B. Vista del lote con giro en cabecera automático	41
Figura 25. Representación de giros en cabecera	41
Figura 26. El lote presenta huellas en todo el lote por el uso indebido del carro tolva	43
Figura 27. Incremento de la densidad aparente a medida que aumenta el número de pasadas	43
Figura 28. Daños causados por el tipo de compactación	44
Figura 29 A. Medición de la superficie de pisado del neumático con el método de la cal	45
Figura 29 B. El recuadro donde no queda cal, es la superficie que está pisando el neumático	45
Figura 30. Diferentes maquinarias agrícolas y como afectan su peso en tn/eje a la compactación subsuperficial, desde el más leve (verde) al más severo (rojo)	46
Figura 31 A. Diferentes tipos de neumático y la relación con la superficie de contacto suelo/rueda diagonal (izquierda), radial (derecha)	47
Figura 31 B. Neumático radial de alta flotación (izquierda), mayor superficie específica que los diagonales y radiales, y ruedas orugas (derecha), el de mayor contacto suelo/neumático	47
Figura 32. Efecto de la incorrecta presión de inflado en los neumáticos	48
Figura 33. Esquema de un módulo de trabajo con tránsito controlado	49

ABREVIATURAS

cm. : centímetros

FM : frecuencia modulada

GNSS : Global Navigation Satellite Systems

GPS : Global Positioning System

km. : kilómetros.

tn : toneladas

RESUMEN

El Sistema Global de Navegación por Satélites (GNSS), está compuesto por una constelación de satélites, los cuales generan señales de diferentes frecuencias, permitiendo obtener un posicionamiento y localización en el globo terráqueo (Baidu, Glonass, GPS, Galileo y OZSS integran el GNSS). En la agricultura de precisión es un requerimiento importante contar con señales de calidad, y que la desviación de la señal sea la menor posible, además, que posea repetibilidad. Esto hace referencia a que la señal no sólo tiene que ser precisa, sino que debe transmitirse siempre en la misma posición. En el mercado se encuentran disponibles numerosos proveedores de señales de navegación que ofrecen diferentes precisiones y tiempos de repetibilidad. En la maquinaria agrícola estas señales fueron adaptadas para realizar agricultura de precisión. El primer uso se da en la adopción del piloto automático, que cuenta con un receptor que permite captar la señal, generando líneas de guiados. Luego el piloto conduce a las máquinas sobre éstas de manera automática. El avance de la tecnología en los últimos años ha generado señales más precisas y con mayores tiempos de repetibilidad. Actualmente se trabaja con piloto automático, banderillero satelital, giros en cabecera automáticos, sistema de guiado óptico, sistema de guiado por sensores mecánicos, sincronización de equipos de cosecha, guiado pasivo de implemento agrícola y guiado activo de implemento agrícola. El tránsito controlado agrícola es una alternativa a la producción actual para solucionar el problema de la compactación del suelo. Esta tecnología propone modular el parque de maquinarias para que siempre circulen sobre las mismas huellas en el lote. Esta forma de producir sólo es posible usando señales de navegación que brinden precisión y repetibilidad, para lograr

transitar siempre por la misma huella.

Palabras clave

Satélites, Señales, Maquinaria, Precisión, Compactación.

INTRODUCCIÓN

El manejo de la variabilidad de los lotes en agricultura y la ambientación, es una temática que está implícita en el pensamiento de los productores desde hace varias décadas. Su implementación requiere de un conocimiento profundo del campo de trabajo, y resulta indispensable contar con herramientas que nos brindan una visión global del sistema productivo. En el año 1983 en Estados Unidos, en la Universidad de Purdue, se empieza a mencionar la posibilidad de producir granos en forma extensiva con la asistencia de computadoras incorporada a la maquinaria agrícola, de esta manera, se pudo pensar en el manejo diferencial de la variabilidad automatizada asistida por artefactos electrónicos (Bragachini *et al.*, 2011). Es posible marcar este momento como el puntapié que dio inicio a la Agricultura de Precisión.

En Argentina, el pionero fue el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Manfredi en el año 1995, quien incorporó la agricultura de precisión, con la ayuda de la empresa D&E y Tecnocampo. Fue en ese año que se realizó el primer mapa de rendimiento de un lote de maíz en Monte Cristo, cercano a la ciudad de Córdoba (Bragachini *et al.*, 2011). La difusión y crecimiento de esta tecnología se vio estrechamente asociado al internet que permitió el intercambio de información (Melchior *et al.*, 2017).

El avance que se ha presentado en tecnologías modernas de geoposicionamiento y Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha permitido en el ámbito agrícola mejorar la eficiencia en el uso de insumos, recursos y mano de obra” (Carvajal y Romero, 2010). Actualmente la agricultura de precisión tuvo un marcado crecimiento, trascendiendo el proyecto del INTA Manfredi, logrando hoy ser considerada una herramienta para los

productores de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), y de Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA).

La agricultura de precisión está cada día más presente en las producciones agrícolas; es tanta la adopción, que siguió creciendo en plena crisis de la maquinaria (1999-2002). Como se observa en la (Figura 1. Fuente: Scaramuzza, 2024) actualmente hay más de 12.000 máquinas agrícolas conectadas; que relevan datos de 18 millones de hectáreas, representando casi un 50% de la superficie que se siembra en Argentina. *Casi el 100% de las máquinas tiene un monitor de siembra y el 95% de las cosechadoras tiene monitor de rendimiento* (Scaramuzza, 2024).

El alcance de la agricultura de precisión a los productores agropecuarios fue de tal magnitud que hoy en día no sólo se busca el mapeo de suelos; sino que se espera alcanzar con el avance de esta tecnología la dosis variable de insumos, el control de siembra, la gestión de la cosecha y la cuantificación de las diferencias de rendimientos en los lotes. Al ambientar (sectorizar), el lote por su rendimiento, se logra ser más eficientes en la aplicación de agroinsumos como fitosanitarios, semillas, etc. (Bragachini et al., 2011). *Las respuestas a las dosis variables para cada insumo y en cada ambiente sectorizado, permite seleccionar los mejores híbridos y/o variedades, realizar aplicaciones uniformes obteniendo importantes beneficios agronómicos y económicos, esto último, cuando el lote presenta una variabilidad que lo justifique* (Bragachini et al., 2011).

En cuanto al futuro de la agricultura de precisión referido a la maquinaria agrícola y sus operaciones, al parecer estarán en mayor medida conectadas con la computadora de la oficina del técnico. La inteligencia electrónica regulará en tiempo real la máquina y tendrá mayores y mejores conocimientos agronómicos que las del operario de máquina. *Para lograr*

la adopción de agricultura de precisión y achicar las brechas de rendimientos, hay que entender que todas las operaciones dependen de un equipo de operarios (Scaramuzza, 2024).

Las máquinas podrán evaluar y segregar la producción por calidad, en forma automática y en tiempo real; logrando ser más eficientes con el uso de los insumos, tener mayor capacidad de trabajo y en conjunto tener una mayor rentabilidad en la producción. Resumiendo, la máquina agrícola del futuro será en las siguientes características más: precisa, eficiente, automatizada, sensorizada, autoguiada y autorregulable, con mayor inteligencia electrónica y desarrollo de comunicación, sensorización y transmisión de datos en tiempo real (Bragachini *et al.*, 2011).

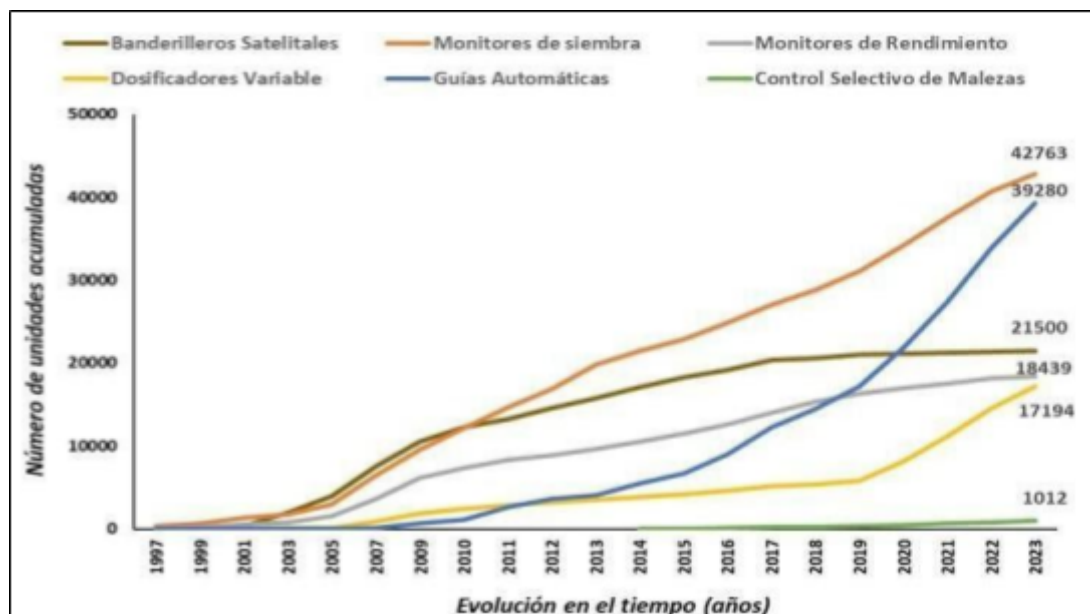


Figura 1. Aumento en la adopción de la tecnología en los diferentes años.

Señales de Navegación en la agricultura de precisión

Las señales de navegación que utilizan las maquinarias agrícolas provienen de los satélites ubicados en el espacio exterior, transmitiendo señales en distintas frecuencias que son captadas por los receptores para realizar las labores en la agricultura de precisión. Todos los satélites que orbitan alrededor de la tierra conforman el Global Navigation Satellite Systems (GNSS).

Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

Los sistemas Global Navigation Satellite Systems (GNSS) son sistemas de posicionamiento mundial por satélite (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014):

- Posicionamiento: obtención de coordenadas de la ubicación del receptor.
- Mundial: el cálculo de esta posición se puede realizar en cualquier lugar de la superficie de la Tierra.
- Satélite: la infraestructura básica está formada por satélites orbitando en torno a la Tierra, emitiendo señales de radio.

El sistema global de navegación por satélite GNSS está compuesto por varias constelaciones de satélites (Figura 2. Fuente: Chowdah, 2022) , capaces de transmitir señales de radiofrecuencia. Las señales permiten obtener la posición y la geolocalización de cualquier receptor en cualquier lugar del globo terrestre (Human, 2016). *Estos sistemas proveen posicionamiento geoespacial autónomo, permitiendo al receptor determinar longitud, latitud, altitud y tiempo local con precisión* (Human, 2016). En la actualidad NAVSTAR GPS (estadounidense), GLONASS (ruso), GALILEO (europeo), COMPASS (chino), IRNSS (indio) y QZSS (japonés), integran al GNSS.

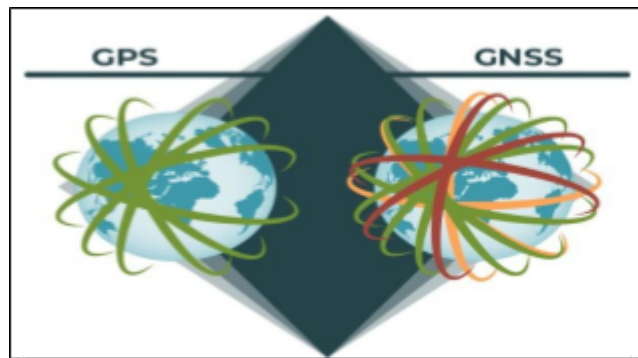


Figura 2. Esquemas de la diferencia entre GPS y GNSS.

Componentes del Sistema GNSS

Los sistemas GNSS consisten de tres grandes componentes, el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario (Figura 3. Fuente: García Álvarez, 2008).



Figura 3. Representación del funcionamiento en conjunto de los tres segmentos del GNSS.

El segmento espacial

El segmento espacial está formado por satélites orbitando aproximadamente a 20.000 km sobre el nivel del mar. Cada sistema que pertenece al GNSS tiene su propia constelación de satélites, ordenados en órbitas para proveer la cobertura deseada. Los satélites transmiten una señal de radiofrecuencia para identificarse, y también proveen su tiempo, órbita y estado (Human, 2016).

El segmento de control

El segmento de control es una red de estaciones de control, monitoreo y comunicación. La estación de control ajusta los parámetros de la órbita del satélite y los relojes de alta precisión, función necesaria para mantener la exactitud de los satélites. Las estaciones de monitoreo, se encuentran distribuidas a lo largo de la superficie terrestre, tienen como objetivo monitorear los estados y las señales de los satélites, y esta información es enviada a la estación de control. La estación de control analiza las señales y transmite las correcciones a los satélites a través de las estaciones de comunicación (Human, 2016).

El segmento de usuario

El segmento de usuario está compuesto de cualquier receptor capaz de recibir y procesar la señal recibida por los satélites que pertenecen al GNSS, de esta manera se obtiene la información espacial y temporal. Los receptores varían desde teléfonos celulares, hasta equipos sofisticados, como los utilizados en agricultura (Human, 2016).

En este trabajo de las constelaciones que componen al sistema global de navegación, describiremos solamente a la constelación Global Positioning System (GPS).

Global Positioning System (GPS)

El GPS fue diseñado con fines militares a partir del año 1973. Tras la Segunda Guerra Mundial, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos buscó una solución al problema de determinar una posición absoluta y precisa sobre cualquier punto de la superficie de la Tierra y en cualquier momento.

Hasta el año 2008, NAVSTAR GPS era el único sistema de posicionamiento global completamente operativo (García Álvarez, 2008). Luego surgieron otros como Transit, Timation, Loran y Decca que fueron proyectos desarrollados para determinar la posición; siendo limitados en la precisión y funcionalidad. Al principio fueron desarrollados para el posicionamiento por navegación (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

Luego el Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS), conocido como GPS Diferencial, representó una revolución para la agricultura, dando la posibilidad de realizar numerosos procesos como gestión de activos, optimización de los insumos usados en la producción, dosis variable en la aplicación de fitosanitarios, trazado de lindes forestales, giros en cabecera, guiado activo y pasivo de implementos; y control y seguimiento en el tránsito de la maquinaria agrícola (García Álvarez, 2008).

Constelación GPS

Los satélites que integran la constelación, fueron lanzados en diferentes fases, cada una de ellas estaban compuestas por grupos de satélites, denominados bloques. Actualmente están orbitando cuatro diferentes bloques según su diseño:

- *Bloque I*: satélites del 1 al 11 lanzados entre los años 1978 y 1985.
- *Bloque II*: satélites del 13 al 21 lanzados en 1989 y 1990.
- *Bloque IIR*: satélites que se lanzaron a partir de 1997.
- *Bloque IIR-M*: últimos tres satélites lanzados al espacio en 2005 y 2006.
- Bloque III: 5 satélites lanzados al espacio entre 2018 y 2023. (Avion Revue, 2023)

Características de la constelación GPS

La constelación está compuesta por 29 satélites en seis planos orbitales y a una altura de unos 20.200 km con un periodo aproximado de 12 horas, que emiten señales en varias frecuencias, proporcionando cobertura global con 4 - 8 satélites por encima del horizonte (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

La señal del GPS

Los sistemas de GPS intercambian información en base a señales a diferentes frecuencias. (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014) (Figura 4, Fuente: Instituto Navarro de Administración Pública, 2014.). Los receptores utilizan esta señal para calcular la ubicación de los satélites, además de realizar los ajustes necesarios para obtener las posiciones precisas. *El receptor utiliza la diferencia de tiempo entre el momento de la recepción de la señal y el tiempo de transmisión para calcular la distancia al satélite* (Léniz, 2020). Cada satélite transmite señales en dos frecuencias básicas: las señales de navegación (códigos) y los datos de navegación y sistema (mensaje).

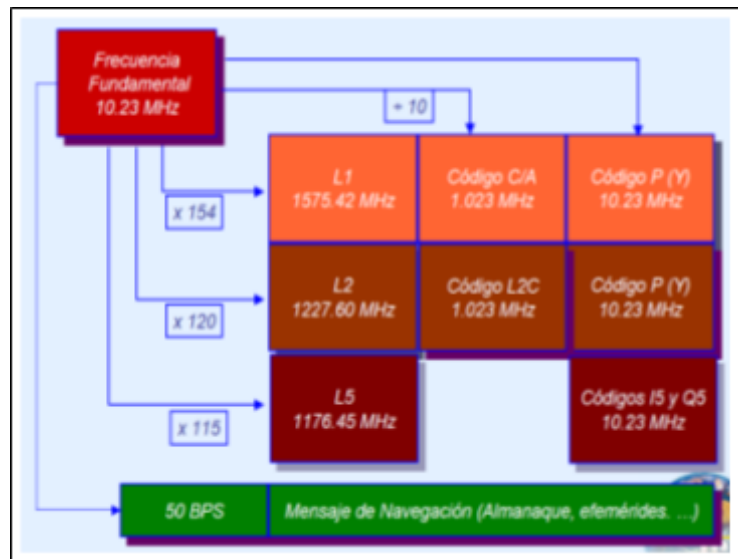


Figura 4. Esquema de las diferentes frecuencias de las señales GPS.

Tipos de Señales GPS

La señal L1

Posee dos códigos:

- Código de alta precisión P (solo uso militar, se encuentra encriptado a un código Y)
- Código menos preciso C/A (uso civil, denominado señal heredada).

Su frecuencia es relativamente lenta, no es muy eficaz para atravesar obstáculos (Chowdah, 2022).

La señal L2

En su lanzamiento solo contenía el código P (exclusivo para uso militar), pero los satélites del Bloque IIR-M transmiten como novedad el código L2C. Este código es de uso civil (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

La frecuencia que utiliza la señal es de 1227,60 MHz, que es más rápida que la L1 y permite que la señal viaje mejor a través de obstáculos como nubes, árboles y edificios.

La señal L5

La señal L5 actualmente es emitida por los satélites del Bloque IIR-M, se encuentra en un periodo de prueba. Esta señal L5 emitirá los códigos I5 y Q5, la señal utiliza una frecuencia de 1176 MHz. Tendrá uso para el transporte de seguridad de la vida y otras aplicaciones que requieran de mucha exigencia, como en la aviación (Chowdah, 2022).

La señal L5 es cuatro veces más potente que las L2C, también posee una estructura mejorada facilitando que los receptores puedan recibirla en cualquier situación. Teniendo disponible una tercera frecuencia, se podrá eliminar el efecto de error en las señales GPS, que se genera por la ionosfera, con mayor facilidad.

Componentes del sistema GPS

Segmento Espacial

El segmento espacial está constituido por la constelación NAVSTAR de satélites GPS, a mayo de 2020, www.GPS.gov confirma que hay 29 satélites operativos (Chowdah, 2022) (Figura 5. Fuente: Terra J. (2006). Estos satélites pueden emitir señales de radio para supervisar y controlar estaciones en la Tierra (Pathak, 2024). Los satélites se encuentran espaciados de tal modo que habitualmente cuatro de ellos están, en teoría, a la vista de cualquier usuario en cualquier parte del mundo (Léniz, 2020).

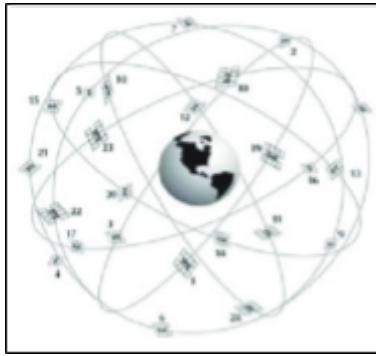


Figura 5. Esquema de los 29 satélites que componen la constelación GPS.

Segmento de Control

El segmento control está formado por una estación maestra ubicada en Colorado Springs (Estados Unidos), que posee el equipamiento y los servicios necesarios para poder realizar el monitoreo de los satélites, telemetría, traqueo, comando, control, generación de los mensajes de navegación y envío de estos mensajes a los satélites (Léniz, 2020). Las estaciones secundarias forman parte de este segmento, se encuentran localizadas en Hawaii, Ascensión, Diego García y Kawajaleinde, traquean los satélites en forma pasiva, acumulando datos de las señales de los satélites sobre variaciones en distancia, y transmitiendo a la estación maestra de control (Léniz, 2020), le brindan información a ésta y a las antenas de tierra formando un enlace bidireccional con los satélites (García Álvarez, 2008) (Figura 6, Léniz, 2020). Sus ubicaciones son muy precisas, de acuerdo con las mediciones realizadas por el World Geodetic System en 1972 y posteriormente en 1984. Es así, que se puede conocer la precisión del GPS, ya que al calcular la posición de la estación por triangulación a partir de la información que envían los satélites GPS, se calcula la desviación sobre la posición exacta

medida de la estación (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014). Las estaciones constan de receptores diferentes y relojes atómicos.



Figura 6. Representación del Segmento de Control GPS. Ubicación de la estación maestra y como las estaciones secundarias se comunican con ella.

Relojes atómicos y osciladores

Es la fuente de la frecuencia patrón que genera las señales GPS. La precisión de un reloj, o más propiamente su estabilidad, se mide sobre un segundo y representa la dispersión de los valores de la frecuencia de banda , en la Tabla I podemos observar los diferentes materiales que componen a los osciladores. (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

Tabla I. Diferentes materiales que componen a los osciladores y cuantos años demoran en perder un segundo.

Tipo de Oscilador	Estabilidad	Tiempo para Perder 1 Segundo
Cristal de Cuarzo	10-9	30 años
Rubidio	10-12	30.000 años
Cesio	10-13	300.000 años
Maser de Hidrógeno	10-14	30.000.000 años

Segmento de Usuarios

El segmento de usuarios está compuesto por cualquier receptor pasivo, que pueden obtener una posición, velocidad y tiempo a partir de una señal. Los receptores de los usuarios tienen la capacidad de recibir y procesar señales de cuatro o más satélites que estén orbitando el globo terráqueo, lo pueden hacer simultáneamente o secuencialmente. El procesador de los receptores, es quien convierte la información de las señales en información para la navegación (Léniz, 2020).

Error en la señal GPS

El receptor tiene en cuenta los retrasos en la propagación de la señal debidos a la ionosfera y a la troposfera (Léniz, 2020). El receptor calcula su posición en tres dimensiones, el cálculo se realiza con la distancia a tres satélites y conociendo la ubicación del satélite que transmite la señal (Figura 7. Fuente: Léniz, 2020). Es importante saber que, para calcular las distancias, el usuario tiene que tener el reloj atómico sincronizado con el sistema de posicionamiento global. El reloj atómico se puede evitar, si se mide con un satélite adicional. De esta manera el receptor utiliza cuatro satélites adicionales para calcular la latitud, la longitud, la altitud y el tiempo (Léniz, 2020).

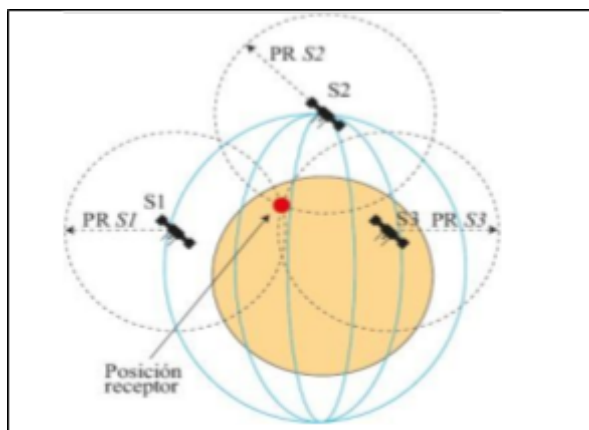


Figura 7. Esquema del cálculo del posicionamiento

Fuentes de error en la señal GPS

Existen diferentes fuentes de error que degradan la posición GPS. Las principales fuentes que provocan los errores de posicionamiento son:

Retrasos ionosféricos

Cuando la señal del satélite atraviesa la ionosfera, se produce el fenómeno similar al de la reflectancia, es decir, la velocidad de la señal disminuye y su dirección inicial sufre una desviación (Figura 8. Fuente: Instituto Navarro de Administración Pública, 2014), provocando un error en el cálculo de la distancia (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

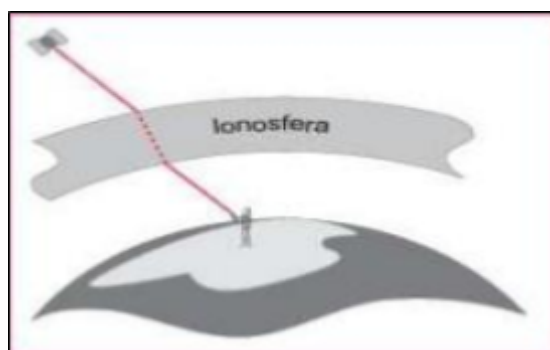


Figura 8. Desviación de la señal al ingresar a la ionosfera.

Elevación del satélite

Las señales de satélites que se encuentran en un ángulo de elevación bajo se verán más afectadas que las señales de satélites que se encuentran en un ángulo de elevación mayor. Esto es debido a la mayor distancia que la señal tiene que viajar a través de la atmósfera (Figura 9. Fuente: Instituto Navarro de Administración Pública, 2014). (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

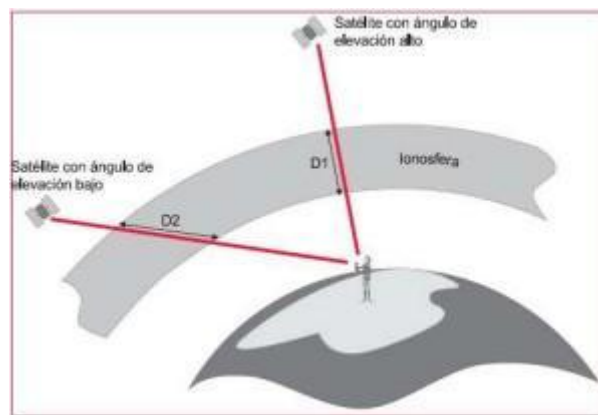


Figura 9. Representación del efecto en la elevación del satélite

La densidad de la ionosfera

La densidad de la ionosfera está afectada por el sol, siendo mínima la influencia por la noche. Durante el día, el efecto de la ionosfera se incrementa y disminuye la velocidad de la señal. La densidad de la ionosfera varía, además, con los ciclos solares (actividad de las manchas solares) y con los efectos de la actividad solar que determina variaciones en el campo magnético terrestre (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

Errores en el reloj del Satélite y del Receptor

Los relojes de los satélites son atómicos y por tanto el error que pueden provocar es despreciable frente al error de los relojes que portan los receptores. Además, el error en el reloj de los receptores varía con el tiempo de modo que debe incluirse como una incógnita más a la hora de resolver el posicionamiento (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

Efecto Multitrayectoria

El error de multitrayectoria se presenta cuando el receptor está ubicado cerca de una gran superficie reflectora, tal como un lago o un edificio (Figura 10. Fuente: Instituto Navarro de Administración Pública, 2014). La señal del satélite no viaja directamente a la antena, sino que llega primero al objeto cercano y luego es reflejada a la antena, provocando una medición falsa. Se corrige mediante el uso de antenas especialmente diseñadas para ello (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

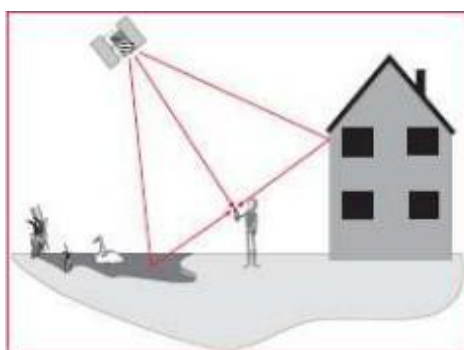


Figura 10. Desvío de la señal por los diferentes objetos cerca de los receptores.

Dilución de la Precisión

La Dilución de la Precisión (DOP) es un valor adimensional que describe la solidez de la figura observable geoméricamente, constituida por el receptor y los vectores que determina el receptor con los satélites a la vista (Figura 11. Fuente: Instituto Navarro de Administración Pública, 2014). Su valor ideal es uno, pero aumenta si la geometría empeora, pudiéndose producir una situación en la que, habiendo suficientes satélites a la vista, deba suspenderse la observación porque la dilución de la precisión supere un valor establecido (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

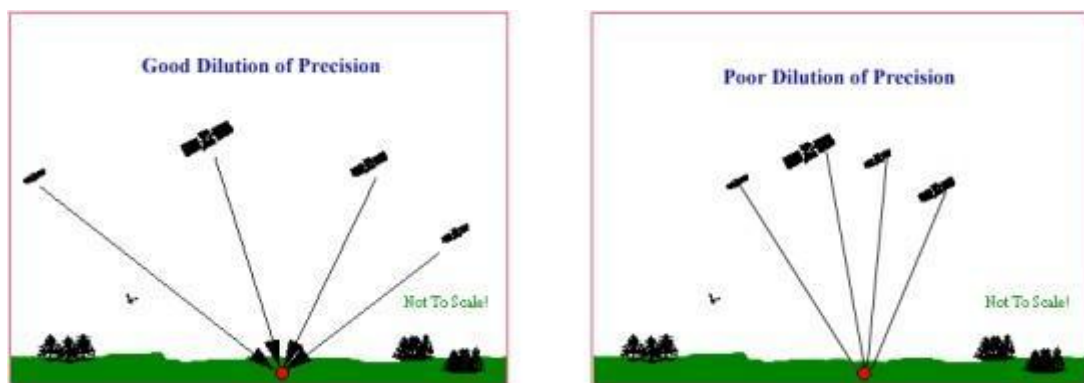


Figura 11. Esquema de dilución de la precisión (DOP)

Receptores de la señal GPS

Los errores, causados por los motivos detallados anteriormente, dependen del tipo de receptor GPS que se disponga, el que deberá estar acorde al uso que se pretende darle, existiendo los que se mencionan a continuación:

Tipos de receptores de la señal GPS

- *Autónomos*

Estos receptores no poseen corrección de señal, tienen un error de trabajo entre cuatro a ocho metros. Se utilizan para actividades que no requieren de precisión, como por ejemplo el seguimiento vehicular, navegación, entre otros (Herrera, 2006).

- *Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS)*

Estos receptores poseen corrección diferencial de la señal GPS en tiempo real, son los que se utilizan comúnmente, tienen un error entre 15 a 30 centímetros. Se utilizan en actividades agropecuarias, como la siembra, cosecha, pulverización, fertilización y laboreos (Herrera, 2006).

- *Omnistar HP*

Trabaja con errores de entre cinco a diez centímetros. (Herrera, 2006). Es idóneo para las aplicaciones de pulverización y laboreo de gran rendimiento en cultivos a gran escala.

- *RTK Fixed (Real Time Kinematic)*

Estos receptores son muy precisos y trabajan con errores de uno a dos centímetros, su desventaja es que necesitan de la construcción de su base y cubren un área de 10 kilómetros de diámetro. Para mitigar esta desventaja los productores utilizan bases fijas geoposicionadas y utilizan RTK móvil, moviendo el receptor logran para cubrir mayor superficie (Herrera, 2006). *Los receptores RTK instalados en tractores para el mapeo de rendimiento o incluso para la aplicación de insumos, otorgan precisión en milímetros* (Charlotte et al., 2014).

Precisión de la señal GPS.

La precisión del posicionamiento mediante técnicas GPS puede variar desde metros a milímetros. Estas precisiones irán variando con el tiempo, por lo que es necesario evaluar la precisión de una medida GPS (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014). *Ésta debería repetirse en momentos distintos del día y en condiciones ionosféricas distintas. Además de las condiciones variables, también influye en la precisión el tipo de equipos/observables empleados y la metodología de observación* (Instituto Navarro de Administración Pública, 2014).

La variación de la precisión en el posicionamiento se debe a la diferencia de sincronización que se produce entre el reloj atómico que tienen los satélites y el reloj digital de los receptores. *Al considerar que la señal toma 0,7 segundos para viajar del satélite hasta el receptor. Así, un error de 1 ns (un nanosegundo) en la sincronización del tiempo, causa un error de 30 cm en términos de posicionamiento geográfico* (Charlotte et al., 2014).

Redes de Corrección Diferencial de la señal GPS

En el mundo se utilizan numerosos sistemas de corrección de señales, sin embargo, en la Argentina las labores que requieren agricultura de precisión, utilizan tres métodos de corrección en la señal del GPS (Herrera, 2006).

Tipos de correcciones de la señal GPS

- Corrección mediante antenas Beacon

Las antenas Beacon tienen una posición fija con coordenadas conocidas, se utiliza esta antena para hacer las correcciones de señales. Las correcciones se realizan mediante emisiones de onda FM. En Argentina hay tres antenas, una ubicada en la localidad de Bolívar (provincia de Buenos Aires), una en la ciudad de San Carlos (provincia de Santa Fé) y una en la localidad de Lajitas (provincia de Salta). Poseen un alcance de 300 km. aproximadamente (desde la base) (Figura 12. Fuente: Herrera M. A. 2006) y requiere un abono anual o de por vida (Herrera, 2006).

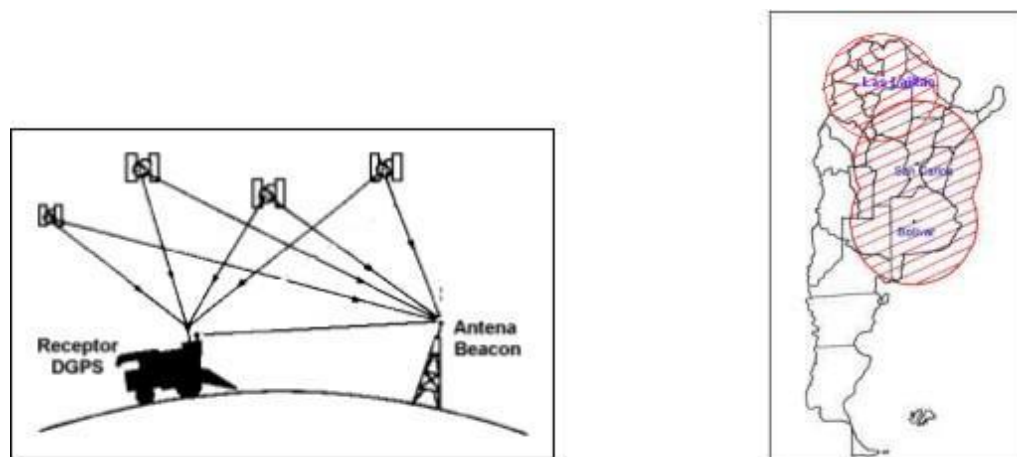


Figura 12. Esquema del funcionamiento de la Antena Beacon y la ubicación de las tres torres marcando el área de cobertura que se obtiene en Argentina.

- Corrección Satelital (satélite geoestacionario):

Según Herrera en 2006, los satélites que se encuentran en una misma posición en relación a la tierra, requieren de un abono anual (Figura 13. Fuente: Herrera M. A. , 2006).

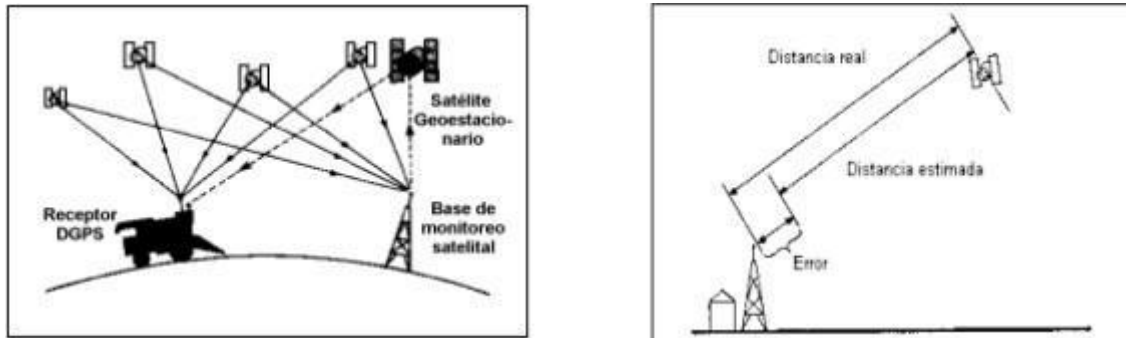


Figura 13. Esquema del funcionamiento del Satélite Geoestacionario.

- Corrección interna en el receptor GPS

El receptor GPS realiza una corrección interna, pudiendo determinar y minimizar el error. El sistema brinda posiciones corregidas con buenos resultados para el guiado de la maquinaria agrícola. El sistema es gratuito, no requiere de abonos, su desventaja son los costos de los equipos (Herrera M. A., 2006).

Efecto de las Tormentas Solares en el funcionamiento del GPS

Las tormentas solares tienen un origen externo, se producen cuando hay un aumento brusco de las partículas solares de tal manera que logran interaccionar con la magnetosfera de la tierra, provocando una alteración en el campo magnético terrestre. Pueden durar desde algunas horas, hasta varios días (Instituto Geográfico Nacional Madrid, España. 2003).

La alteración del campo magnético terrestre genera interrupciones en los sistemas de GPS, afectando las labores que realizan agricultura de precisión.

Movimiento de placas tectónicas

La litosfera terrestre está formada por seis placas tectónicas principales, que tienen el nombre del continente donde se encuentra (placa sudamericana, placa norteamericana, placa africana, placa antártica, placa australiana y la placa euroasiática) y numerosas placas secundarias (Figura 14. Fuente: Redacción National Geographic, 2023).

La interacción de las placas genera la actividad geológica, cuando se acercan o se separan, creando tres tipos de movimientos: convergente (las placas se acercan unas con otras), divergentes (cuando las placas se separan entre ellas) y transcurrentes (la placa se mueve de lado en relación con otra) (Redacción National Geographic, 2023).



Figura 14. Representación de las Placas Tectónicas y los tipos de movimientos que pueden tener.

Importancia del movimiento de las placas tectónicas y la señal GPS

El movimiento de las placas tectónicas tiene gran importancia en las señales GPS, como se mencionó los diferentes movimientos provocan que la señal tenga periodos de repetibilidad, provocando un error en el guiado de la maquinaria agrícola. Es fundamental para realizar agricultura de precisión tener una señal con repetibilidad.

Precisión y Repetibilidad de la señal GPS

- Precisión de la señal GPS

El sistema debe proporcionar un posicionamiento espacial y temporal preciso. Hablamos de un rango de metros en aplicaciones civiles en la actualidad, que varían de un sistema de aumento a otro; y de cm. para aplicaciones militares del GPS (García Álvarez, 2008).

- Repetibilidad de la señal GPS

La repetibilidad hace referencia a que la señal pase siempre por la misma superficie terrestre, sin que se vea afectada por el desplazamiento de las placas tectónicas.

Efecto del movimiento de las placas tectónicas en la señal GPS

El movimiento de las placas tectónicas ocasiona un desplazamiento de la línea de guiado, provocando un incorrecto tránsito de la maquinaria agrícola. Para corregir este efecto será necesario utilizar señales que brinden repetibilidad. De esta manera se logra que el tránsito se realice siempre por la misma línea de guiado (Figura 15. Fuente: Elaboración propia).

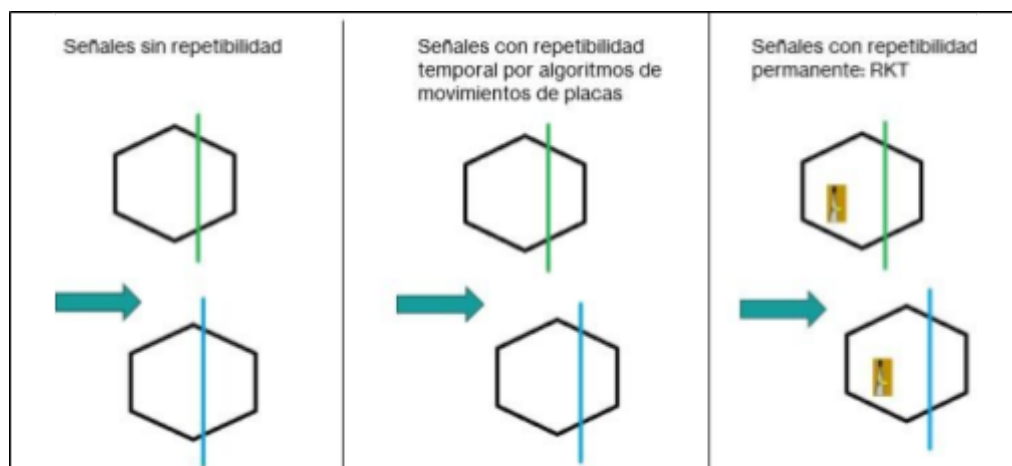


Figura 15. Representación de la repetibilidad de la señal GPS y su relación con el movimiento de las Placas Tectónicas.

Marcas comerciales de señal GPS disponibles en el mercado

En la Tabla II (Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la Facultad de Ciencias Agrarias-Universidad Nacional de Lomas de Zamora (FCA-UNLZ), 2023) se puede observar las diferentes marcas comerciales de señales y que calidad (precisión y repetibilidad) de señal GPS ofrece cada una.

Tabla II. Marcas comerciales de señales GPS

Calidad de la Señal		Marcas de Señales Comerciales				
Precisión	Repetibilidad	Trimble	John Deere	Topcon	Ag Leader	Plantium
Hasta 2,5 cm	Permanente	RTK	RTK	RTK	RTK	RTK
De 2 a 3 cm	Multianual	CenterPoit VRS	SFRTK	RealPoit	TerraStar X	
De 2 a 3 cm	Anual	CenterPoit RTX	SF3	StarPoit Pro	TerraStar C Pro	Platinum RT2
15 cm	No	RangePoit RTX	SF1	StarPoit	TerraStar C	Plantium RT15
30 cm	No	ViewPoit RTX			TerraStar L	eDIF

En la Tabla III (Fuente: Elaboración propia) se puede observar que la calidad de señal necesaria para realizar la labor agrícola.

Tabla III. Calidad de señal según la labor agrícola

Calidad de la Señal		Labor Agrícola
Precisión	Repetibilidad	
Hasta 2,5 cm	Permanente	Siembra Pulverización Fertilización Cosecha Tránsito Controlado
De 2 a 3 cm	Multianual	Siembra Pulverización Fertilización Cosecha Tránsito Controlado
De 2 a 3 cm	Anual	Siembra, Pulverización Fertilización Cosecha
15 cm	No	Pulverización Fertilización
30 cm	No	Trabajos que no requieran precisión: labranzas de suelo

Hasta aquí se detalló el sistema GNSS y su diferencia con el sistema de posicionamiento GPS, describiendo cómo está compuesto y su funcionamiento. Este conocimiento es la base para entender la importancia del geoposicionamiento utilizado en agricultura de precisión, dado que, las maquinarias agrícolas utilizan las señales GPS para el guiado satelital en el lote. No sólo importa el tipo de señal GPS, sino también la calidad, es decir, que posean precisión y repetibilidad para lograr maximizar las labores de sistematización de suelo, labranzas, siembra, fertilización, pulverización, cosecha y demás

tareas.

Hoy en día no se discute la importancia del piloto automático y el banderillero satelital como herramientas tecnológicas para lograr mayores rendimientos y calidad de aplicación de productos fitosanitarios, siendo este último de suma importancia para evitar la subdosis y la sobredosis de productos. Estas tecnologías no pueden faltar a la hora de ingresar al lote para realizar un trabajo específico.

Con una agricultura cada vez más competitiva, la necesidad de hacer más eficiente el manejo de la actividad hace que hoy en día el productor agropecuario argentino incorpore a su paquete tecnológico diferentes herramientas tecnológicas para agricultura de precisión (Villarroel *et al.*, 2014). En la actualidad además del piloto automático y el banderillero satelital, existen otras herramientas tecnológicas en la agricultura de precisión, que utilizan señales GPS para su funcionamiento, ayudando a que se realice un labor más eficiente del lote, entre ellas tenemos: sistema de guiado óptico (Guidance Claas), sistema de guiado por sensores mecánicos (John Deere AutoTrac Row Sense), sincronización de equipos de cosecha (John Deere Machine Sync), guiado pasivo de implemento agrícola (True Guide implement guidance system), guiado activo de implemento agrícola (True Tracker implement steering system), giros en cabecera automáticos (AutoTrac).

Tecnologías asociadas a la agricultura de precisión

Las tecnologías asociadas a la agricultura de precisión utilizan señales de navegación GPS para su funcionamiento. Entre ellas:

Piloto Automático

El piloto automático, es una alternativa tecnológica que utiliza señal GPS, desarrollado para que la maquinaria, como por ejemplo los tractores, sean guiados por el lote con la asistencia mínima del piloto (Alfonso Carvajall O. A. y Romero H. R., 2010). En el año 1996 se usaban marcadores a la hora de sembrar, y con un crecimiento exponencial, en 1997 se incorporó el banderillero satelital, que incorporaba el uso de señales GPS para el guiado de la pulverización en el lote. A partir del año 2000, se empezó a utilizar el piloto automático en diferentes maquinarias e implementos, demostrando el potencial que tenía esta tecnología. *La utilización del piloto automático en estos últimos años evolucionó en función del crecimiento tecnológico de la maquinaria, sus electrocomponentes, en las dimensiones de los mismos, en la electrónica, como así también en la precisión de la señal satelital* (Villarroel *et al.*, 2014) requiere para su funcionamiento de un ordenador móvil, monitor de procesamiento y un receptor de señal GPS. Este sistema se puede montar sobre diferentes tractores y permite incrementar rendimientos, disminuir costos y aprovechar eficientemente la mano de obra existente (Alfonso Carvajall O. A., Romero H. R., 2010) (Alberfo *et al.*, 2010).

Existen en el mercado dos tipos de pilotos automáticos:

Piloto automático mecánico

Son los pilotos que poseen un mayor margen de error, por lo general son sistemas acoplados a la columna de dirección del volante de la maquinaria. Se utilizan en labores donde un error de 6.5 cm. es admisible. Un piloto automático mecánico con el acople y desacople al volante debe estar en no más de diez cm. de error, en cambio el piloto automático

mecánico anexo a la columna de dirección puede rondar en cinco cm. Las partes que componen el piloto mecánico se detallan en la Figura 16 (Fuente: Villarroel et al., 2014).



Figura 16. Componentes del Piloto automático mecánico de la marca John Deere. (volante, 2 monitores diferentes y el receptor de señal).

Piloto automático hidráulico

Son los pilotos que proporcionan mayor precisión. Trabajan con el sistema hidráulico de dirección de la maquinaria agrícola (Figura 17. Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2023). Tienen una respuesta más instantánea que los sistemas mecánicos, a pesar de que los anteriores han mejorado notablemente su reacción.



Figura 17. Diferentes pilotos automáticos hidráulicos presentes en el mercado.

Banderillero Satelital

El banderillero satelital, es un sistema de posicionamiento del equipo, por medio de satélites artificiales (Figura 18. Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2023). Es un método que permite identificar electrónicamente la ubicación de un objeto en el espacio o en este caso sobre la superficie terrestre, posibilitando de esta manera la guía necesaria para las sucesivas pasadas del equipo.

Al momento de realizar una aplicación de agroquímicos se debe garantizar un buen control, ser eficiente en el tratamiento para reducir los costos, disminuir riesgos y contaminación. Una incorrecta señalización entre pasadas, ocasiona inconvenientes como: mayor costo de agroquímicos, daños por sobredosis (fitotoxicidad), mal control por deficiencia de solapamiento (chanchos) y aumento de costos y tiempo por repasadas o retratado de lotes.



Figura 18. Ejemplo de la evolución del Banderillero Humano al Banderillero Satelital

Sistema de guiado óptico (Guidance Claas)

Este sistema fue desarrollado por la empresa Claas; funciona mediante sensores óptico-electrónicos, que definen mediante impulsos de luz el borde entre el lote por cosechar y el lote ya cosechado (Figura 19. Fuente: Villarroel et al., 2014). Tiene la ventaja de trabajar tanto para el lado derecho e izquierdo del mecanismo de corte con una precisión entre cinco a diez cm.

Las cosechadoras se dirigen automáticamente al borde del cultivo mediante el uso de señales GPS, la precisión no se ve afectada por oscuridad o el polvo, tampoco con presencia de malezas. Claas también utiliza el piloto mecánico para los cabezales maiceros, mediante palpadores ubicados entre cada puntera que guían la máquina automáticamente por las hileras (Villarroel *et al.*, 2014).

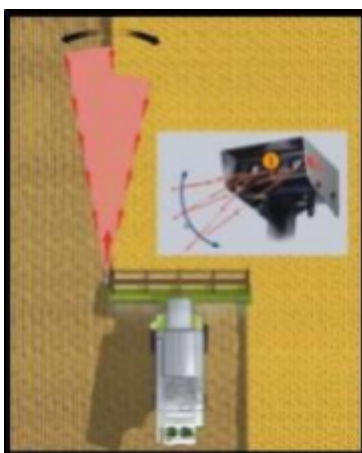


Figura 19. Funcionamiento del Guidance Claas

Sistema de guiado por sensores mecánicos (John Deere AutoTrac Row Sense)

El sistema AutoTrac Row Sense combina el sistema AutoTrac (Piloto automático John Deere) y los sensores de hileras mecánicos (Figura 20. Fuente: Villarroel et al., 2014). Este sistema elimina las limitaciones que normalmente tiene una plataforma convencional al

cosechar maíz. Permite cosechar en cualquier condición de cultivo y lote, por ej. cultivos caídos, campos con curvas y de forma irregular.

Además, facilita la conducción de maquinaria cuando se trabaja con gran ancho de labor. Cuando trabaja en modo AutoTrac Row Sense, ambos sistemas (los sensores de hileras y AutoTrac), actúan de forma conjunta. Cuando los sensores no proporcionan una señal GPS confiable, el sistema AutoTrac toma el control de guiado cambiando de inmediato a modo sensor, cuando las señales de las hileras son nítidas (Villarroel *et al.*, 2014).



Figura 20. AutoTrac Row Sense de la marca John Deere

Sincronización de equipos de cosecha (John Deere Machine Sync)

Esta herramienta tecnológica consiste en la comunicación de la cosechadora a través de radiofrecuencia, el cual crea una red inalámbrica (WIFI) en el campo de alta velocidad para facilitar la comunicación de máquina a máquina (Figura 21. Fuente: Villarroel *et al.*, 2014). Una sola red puede incluir un máximo de diez máquinas, incluyendo cualquier combinación entre cosechadoras y tractores con los carros tolvas. Desde la cabina de la cosechadora se divisa la combinación posible de tractor y cosechadora disponible en su red (Villarroel *et al.*, 2014).

El operador envía la "señal de listo para descarga" y el software proporciona la ubicación de la cosechadora y el estado de llenado de su tolva, determinando la velocidad

de descarga. Esto define la prioridad de combinación para ir a una u otra cosechadora, cuando varias están enviando la señal a la vez, y que sepa determinar si llama a tolvas adicionales si es necesario. Una vez que el tractor y la tolva están junto a su cosechadora, ésta toma control de la velocidad y la ubicación del tractor para que el mismo siga sus movimientos mientras se realiza la descarga del grano. Esto permite minimizar el derrame de granos y el estrés del operador. Otras ventajas que el sistema brinda son: reducir el tiempo de espera, el consumo de combustible, e incluso reducir la compactación del suelo (Villarroel *et al.*, 2014).



Figura 21. Funcionamiento de Machine Sync de la marca John Deere.

Hay otras marcas que ofrecen la misma tecnología, pero se decidió presentar la marca John Deere por ser la más mencionada en la bibliografía.

Guiado pasivo de implemento agrícola (True Guide implement guidance system)

En la actualidad, el uso del piloto automático implica la guía con señales GPS de la maquinaria agrícola (tractor, pulverizadora y cosechadora). En el caso de los implementos remolcados, siguen la guía del tractor. Cuando la labor se realiza en lotes con desniveles, el implemento tiene un leve desplazamiento hacia el lado con mayor depresión, lo cual no es compensado por el piloto automático.

Para solucionar este problema, se desarrolló una herramienta tecnológica denominada guía automática al implemento (True Guide Implement Guidance System). Esta tecnología guía al implemento de manera independiente a la dirección del tractor, trabaja con líneas sucesivas a una misma distancia sin que el implemento tenga la necesidad de acoplarse al piloto automático del tractor (Figura 22.Fuente: Villarroel et al., 2014). Este sistema no permite trabajar con un manejo entre hileras, donde se requiere un control con múltiples pasadas (Villarroel *et al.*, 2014).



Figura 22. Funcionamiento del True Guide implement guidance system

Guiado activo de implemento agrícola (True Tracker implement steering system)

En esta herramienta tecnológica, el implemento se acopla a la guía que va trazando el piloto automático del tractor. Esta tecnología puede realizar una compensación donde los lotes que se encuentran a desnivel, o se requiere trabajar con curvas de nivel (Figura 23.Fuente: Villarroel et al., 2014).

Se utiliza con mucha frecuencia en cultivos donde se trabaja en hileras y es necesario un manejo periódico del entre surco con múltiples aplicaciones, como por ej. en la caña de azúcar (Villarroel *et al.*, 2014).



Figura 23. Funcionamiento del True Tracker implement steering system.

Giro en Cabecera (AutoTrac)

Esta herramienta tecnológica permite realizar los giros en cabecera de manera automática como se observa en las Figuras 24 A y 24 B (Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2023). Posee la ventaja de reducir el tiempo de giro, logrando realizar mayor número de hectáreas por hora y ahorrar combustible, ya que se ahorran metros en el giro (Figura 25. Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2023).



Figura 24 A. Vista en el monitor del giro en cabecera automático.



Figura 24 B. Vista del lote con giro en cabecera automático

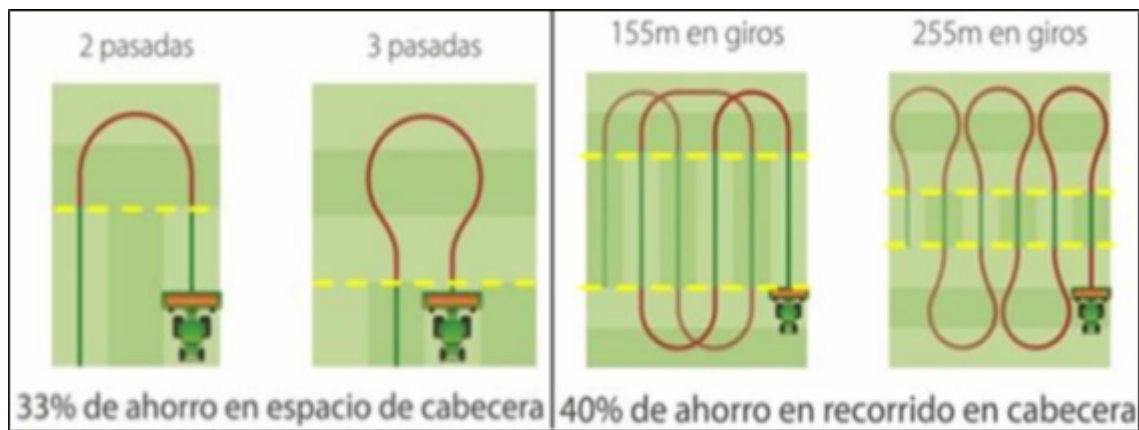


Figura 25. Representación de giros en cabecera.

Con estas herramientas tecnológicas es posible realizar el tránsito controlado agrícola, que surge por la problemática de la compactación del suelo provocada por el tránsito deliberado de la maquinaria agrícola en el lote. Para ello, es necesario contar con señales que posean precisión y repetibilidad.

Tránsito Controlado Agrícola

Las nuevas herramientas tecnológicas vienen acompañadas de nuevas maquinarias agrícolas, que tienen como objetivo realizar las labores en el menor tiempo posible, aumentando el número de hectáreas por hora que conlleva a una mayor productividad. La

contraparte es que esta maquinaria se caracteriza por tener mayor dimensión, peso y capacidad de carga (Masola M. J., 2020 citando a Colombi y Keller, 2019). *El suelo se expone a presiones crecientes aumentando la compactación del suelo, especialmente cuando el tránsito se produce en condiciones de suelo inadecuadas* (Masola M. J., 2020 citando a Keller *et al.*, 2019). La compactación modifica propiedades físicas del suelo, tales como el tipo de estructura, la densidad aparente, la resistencia a la penetración, el volumen total de poros, la distribución del tamaño de los poros y su continuidad y consecuentemente, la conductividad hidráulica y la permeabilidad al aire (Masola, 2020, citando a Koolen, 1994).

La elevada intensidad y el tráfico deliberado de los tractores y las maquinarias agrícolas, en especial las cosechadoras y carro tolvas, generan la compactación del suelo a la hora de realizar las labores, provocando un impacto negativo en el perfil del suelo, siendo mayor cuando se realizan en suelos húmedos y con altas presiones en el área de contacto rueda/suelo (Botta *et al.*, 2007). *Este proceso es considerado la principal causa de la degradación física de los suelos agrícolas del mundo y se atribuye principalmente al tránsito de maquinaria en condiciones de inadecuada humedad de suelo* (Masola, 2020, citando a Horn & Rostek, 2000).

En Argentina, las propiedades físicas y químicas de la totalidad de los suelos agrícolas donde se realizan cultivos, se encuentran en condiciones de deterioro y degradación (Botta *et al.*, 2007). La región pampeana posee un elevado grado de compactación, con muy baja porosidad; siendo los suelos de textura limosa y escasa materia orgánica los más afectados. (Masola, 2020, citando a Taboada, *et al.*, 2008 y Álvarez *et al.*, 2008). Los suelos Argiudoles y Hapludoles de la Pampa Ondulada (zona núcleo agrícola) se encuentran compactados como consecuencia del tránsito repetido y aleatorio de la maquinaria agrícola (Figura 26. Fuente:

Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2024), afectando a la productividad de los cultivos (Botta et al., 2010).



Figura 26. El lote presenta huellas en todo el lote por el uso indebido del carro tolva.

El menor crecimiento y desarrollo de los cultivos se encuentran relacionados a condiciones físicas de un suelo degradado (elevada resistencia del suelo, densidad aparente y reducida porosidad) provocadas por la compactación del suelo (Masola, 2020; Botta et al., 2018). Tanto la densidad aparente como la profundidad y la superficie de suelo compactado, aumentan progresivamente con el número de pasadas (Botta et al. 2007) (Figura 27. Fuente: Balbuena et al., 2003).

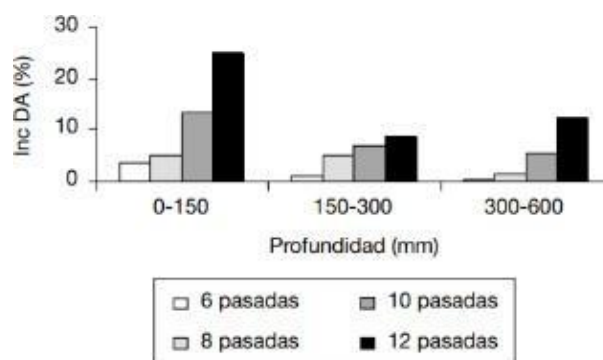


Figura 27. Incremento de la densidad aparente a medida que aumenta el número de pasadas.

Un indicador muy útil para comparar el grado de compactación de los suelos, es la compactación relativa de suelo, que se expresa en porcentaje (%), y es la relación entre la densidad aparente actual del suelo con la densidad máxima de compactación de ese suelo. (Masola, 2020, citando a Eriksson *et al.*, 1974; Håkansson, 1988; Aragón *et al.*, 2000). Este valor de densidad dependerá principalmente de la textura y el contenido de materia orgánica de cada suelo. La compactabilidad presenta una relación inversamente proporcional con el contenido de materia orgánica del suelo; a mayor materia orgánica, mayor es la resistencia a la deformación del suelo (incrementa su elasticidad) (Masola, 2020). La compactación del suelo, como se observa en la Figura 28 (Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2023), se diferencia en superficial y subsuperficial.



Figura 28. Daños causados por el tipo de compactación.

La presión en el área de contacto rueda/suelo es la responsable de la compactación superficial del mismo (Botta *et al.*, 2007). Se la denomina presión específica a la relación rueda/suelo.

La presión específica puede medirse de manera sencilla en la práctica. Como se

observa en la Figura 29 A (Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2024), con la maquinaria agrícola estática se tira cal alrededor de las ruedas, luego se mueve la maquinaria; y el recuadro donde no queda cal es la superficie que está pisando el neumático (Figura 29 B. Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2024). Luego colocando un metro como referencia se toma una foto y esa imagen se sube a una aplicación que mide el área, se calibra usando el metro como diferencia, se marca el perímetro de superficie pisado y de esa manera se obtiene el área de pisado. Para obtener el valor de presión específica, se suma la superficie de pisado de todas las ruedas y se divide por el peso de la maquinaria.



Figura 29 A. Medición de la superficie de pisado del neumático con el método de la cal.



Figura 29 B. El recuadro donde no queda cal, es la superficie que está pisando el neumático.

La compactación subsuperficial es determinada por la masa de los equipos (peso sobre cada eje), según las toneladas por eje se pueden clasificar como se observa en la Figura 30 (Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2023) (Botta *et al.*, 2007).



Figura 30. Diferentes maquinarias agrícolas y como afectan su peso en tn/eje, a la compactación subsuperficial, desde el más leve (verde) al más severo (rojo).

La compactación producida por las toneladas/eje, se relaciona con el tipo de suelo, la intensidad del tránsito y el número de años desde que se originó la compactación (Botta *et al.*, 2007). Por otro lado, la profundidad a la cual se manifiestan los efectos del tránsito de la maquinaria está relacionada con el número de pasadas y con el peso de los equipos (Masola, 2020; Botta *et al.*, 2006). *Para reducir el tránsito de la maquinaria en el lote, los productores en los últimos años han adoptado sistemas de labranza conservacionista, entre los cuales se destaca la siembra directa sin labranza previa* (Botta *et al.*, 2007).

En Argentina, la superficie en sistema de siembra directa es cercana a 30 millones de hectáreas (Masola, 2020). Otras alternativas incluyen el uso de máquinas e implementos más

livianos (para reducir las tn/eje), la reducción del número de pasadas de la maquinaria agrícola y el incremento de la superficie de contacto neumático/suelo, como se observa en la Figura 31 A (Fuente: www.agrotirex.com). Según el tipo de neumático obtenemos mayor presión específica; el neumático radial de alta flotación y la rueda oruga, son los de mayor superficie específica (Figura 31 B. Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2024).

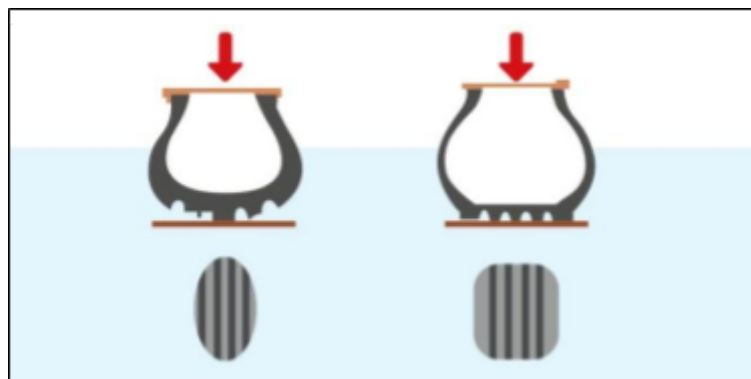


Figura 31 A. Diferentes tipos de neumático y la relación con la superficie de contacto suelo/rueda Diagonal (izquierda), Radial (derecha).



Figura 31 B. Neumático radial de alta flotación (izquierda), mayor superficie específica que los Diagonales y Radiales y ruedas orugas (derecha), el de mayor contacto suelo/neumático.

Diversas alternativas han sido consideradas para reducir o evitar el efecto de la compactación (Masola, 2020). Un punto importante a considerar es que los neumáticos

trabajen con la presión de inflado correcta, para lograr el mayor contacto suelo/neumático (presión específica) (Figura 32. Fuente: www.llantrac.com).

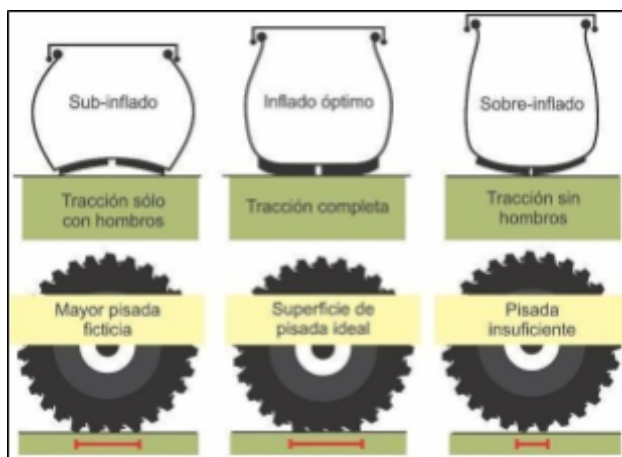


Figura 32. Efecto de la incorrecta presión de inflado en los neumáticos.

Fuente: www.llantrac.com

El tráfico controlado, es otra posibilidad utilizada para reducir la compactación del suelo. (Botta *et al.*, 2007). Esta técnica consiste en realizar un manejo eficiente del tránsito de la maquinaria agrícola en los lotes agrícolas, para reducir la compactación del suelo (Masola, 2020).

El sistema de tránsito controlado de la maquinaria agrícola introduce el principio de no circulación al azar con la maquinaria dentro de los lotes (Masola, 2020). Consiste en establecer dentro de los lotes sendas permanentes de tránsito. Según Masola, 2020, el 95% de la superficie de un lote agrícola experimenta más de una pasada de la maquinaria agrícola, mientras que, al utilizar un sistema de labranza mínima con piloto automático, esta superficie se reduce al 45%. Si a esto, se le adiciona el uso del sistema de tránsito controlado la superficie transitada se reduce a menos del 20%, pudiendo llegar a solo un 10%.

En el resto del lote, al no ser transitado nunca más, mantendrá las propiedades físicas al momento del inicio del tránsito controlado. Las propiedades del suelo irán mejorando con

el tiempo, siempre y cuando se realizan las rotaciones de cultivos correctas, las prácticas de manejo de los cultivos y se utilice el sistema de siembra directa (Masola, 2020).

Según Botta *et al.*, 2007 el uso de tránsito controlado permite mejorar la porosidad del suelo entre 5-70%, mejorar la estructura del suelo, aumentar la infiltración del agua, la conductividad hidráulica y el contenido de materia orgánica. Por otro lado, el aumento de la porosidad del suelo ayuda a reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero entre 20-50%.

Botta *et al.* 2007 demostraron que la reducción del 60% de la intensidad del tránsito durante tres años, permite aumentar el rendimiento del cultivo de soja y reducir el consumo de combustible en un 30%.

El primer paso para la adopción del tránsito controlado consiste en alinear de manera permanente el ancho de la huella de las maquinarias, de manera tal que las máquinas posean un módulo de trabajo(Masola, 2020) (Figura 33. Fuente: Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2023).

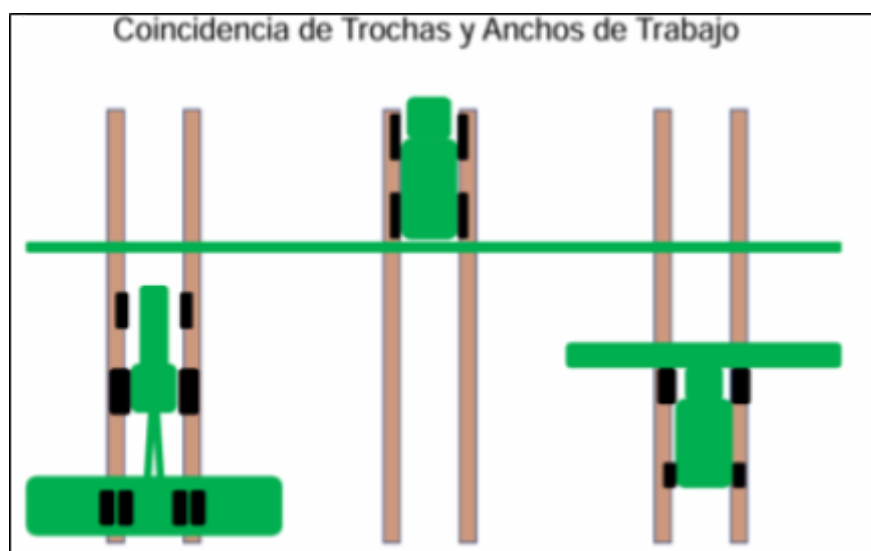


Figura 33. Esquema de un módulo de trabajo con tránsito controlado.

Según Masola, 2020 *una de las principales razones que limitan la adopción de la práctica de tránsito controlado es la necesidad de hacer modificaciones en la maquinaria para que todas tengan el mismo ancho entre los ejes (trocha) y así puedan transitar sobre las mismas sendas.*

Esta es una forma para lograr reducir la superficie compactada, aunque a una superficie mayor a la del tránsito controlado, sin la necesidad de modificar el ancho de trocha de la maquinaria; que es la principal limitante para adoptar esta técnica, por parte de los productores y contratistas. En suelos donde se realiza siembra directa continua, la cosecha debería realizarse en lo posible, bajo la técnica de tránsito controlado (Botta *et al.*, 2007).

La siembra directa combinada con la práctica de tránsito controlado podría ser una tecnología muy útil para disminuir o evitar la compactación en suelos que poseen baja resiliencia. Sin embargo, en Argentina el tránsito controlado no se ha difundido como una práctica para disminuir la compactación del suelo (Masola, 2020).

Los beneficios que se obtienen es un aumento de la porosidad superficial, generando un mayor rendimiento del cultivo, esto se debe a que en la parte superficial del suelo es donde se produce el crecimiento principal de la raíz y la captación de nutrientes (Botta *et al.*, 2007). La capacidad de trabajo efectiva y el consumo de combustible disminuyen debido al menor movimiento de las máquinas y a su uso más eficiente (Botta *et al.*, 2007). La rentabilidad aumenta, al disminuir los costos directos y ya no tener que pasar un subsolador para la descompactación.

Otra alternativa propuesta para iniciar el tránsito controlado (Masola, 2020, citando a Bradford & Peterson, 2010) *es iniciar directamente en suelos donde la calidad física es la*

adecuada, en cambio, para suelos con inadecuada calidad, deben ser descompactados con un subsolador. Este implemento agrícola es el más utilizado para descompactar las capas arables del suelo y las capas subsuperficiales del mismo, llamado comúnmente piso de arado o piso de labranza. Esto favorece el correcto desarrollo radicular de los cultivos.

Con la práctica de subsolado hay que tener cuidado, porque la compactación se propaga a horizontes ubicados más abajo, pudiendo ser considerada irreversible.

Luego de realizar la descompactación del suelo, se implementa el sistema de tránsito controlado asociado a la siembra directa. Si trabajamos con rotaciones de cultivos adecuadas, se logra una rápida recuperación de la calidad física del lote (Masola, 2020). La compactación en las huellas de tránsito irá aumentando en cada pasada, facilitando mayor transitabilidad de la maquinaria. El aumento de transitabilidad en las sendas permite la realización de las labores en condiciones de mayor humedad en el suelo (Masola, 2020).

En Argentina, cuando se realiza la práctica de tránsito controlado se siembra todo el lote, con el beneficio de no dejar de sembrar la superficie transitada. La complicación que trae esta metodología, es el aumento de la densidad aparente de las líneas de tránsito. Por lo que se debe estar atento a la compactación relativa para saber cuándo será necesario realizar un subsolado, solamente sobre la línea de tránsito. Actualmente, se está evaluando sembrar en las líneas de tránsito un cultivo que funcione como “subsolador natural”, los resultados de este ensayo estarán disponibles a fin del año 2024 (Diplomatura de Agricultura de Precisión, dictada por la FCA-UNLZ, 2024 extraído de Pablo Besson).

CONCLUSIÓN

El avance de las tecnologías en las señales de navegación, como el uso de señales GPS, ha sido de suma importancia para desarrollar nuevas prácticas agrícolas. Logrando obtener mayor precisión en las labores de siembra, pulverización y cosecha. En este trabajo se detalló cómo las diferentes herramientas tecnológicas, como los sistemas de guiado y automatización, se aplican al tránsito controlado agrícola; presentando una solución efectiva para la problemática de la compactación de los suelos, producto del tránsito deliberado de la maquinaria agrícola en los lotes.

El tránsito controlado agrícola es una alternativa para mejorar la calidad física y química del suelo, aumentando el rendimiento de los cultivos, junto a un ahorro de combustible y el aumento de la productividad de la maquinaria.

En definitiva, la adopción del tránsito controlado agrícola y el uso de señales de navegación con precisión y repetibilidad de calidad, marcan la dirección a seguir para una agricultura más sustentable y productiva. Es de suma importancia que se siga investigando y adaptando herramientas tecnológicas a la agricultura de precisión, buscando ser más eficiente en la realización de labores agrícolas, en el uso de insumos y aplicación de fitosanitarios.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso Carvajal O. A., Romero H. M. (2010). *Evaluación de un sistema de Piloto Automático de Tractor en plantaciones de palma de aceite*. CENIAVANCES.
- Avion Revue. (2023). Se lanza el sexto satélite GPS III. Disponible en: <https://www.avionrevue.com/espacio/se-lanza-el-sexto-satelite-gps-iii/>.
- Balbuena R., Botta G., Draghi L., Rosatto H., Dagostino C. (2003). *Compactación de suelos. Efectos del tránsito del tractor en sistemas de siembra directa*. Departamento de Ingeniería Rural. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales UNLP, Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra. Facultad de Agronomía UBA y Departamento de Tecnología. Universidad Nacional de Luján.
- Botta G., Pozzolo O., Bomben M., Tourn M., Soza E., Rosatto H., Adriana Gili A., Ressia J., Rivero D., Vázquez J., Stadler S. (2007). *Aplicación del Tráfico controlado en la cosecha de maíz (Zea mays L.): Efecto sobre rendimientos del cultivo y las propiedades físicas del suelo*. Facultad de Agronomía, Cátedra de Maquinaria Agrícola. Universidad de La Pampa y Facultad de Agronomía, Cátedra de Maquinaria Agrícola. Universidad de Buenos Aires.
- Bragachini M., Méndez A., Scaramuzza F., Progetti F. (2011). *Historia y Desarrollo de la Agricultura de Precisión en Argentina*. Proyecto Agricultura de Precisión EEA INTA Manfredi. Disponible en: www.agriculturadeprecision.org
- Chowdah (2022). *Comparación entre GPS y GNSS*. Sparkfun Start Something Disponible en: www.sparkfun.com/news/4276
- Diplomatura de Agricultura de Precisión (2023). *Agricultura de Precisión y Nuevas Tecnologías para el Agro*. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora.
- Diplomatura de Agricultura de Precisión (2024). *Agricultura de Precisión y Nuevas Tecnologías para el Agro*. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora.
- García Álvarez D. A. (2008). *Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System)*. Escuela Politécnica Superior-Universidad Autónoma de Madrid.

- Herrera M. A. (2006). *Banderillero Satelital Funcionamiento y Uso*. Facultad de Ciencias Agropecuarias- Universidad Nacional de Entre Ríos.
- Human F. N. (2016). *Sistema Global de Navegación Satelital y Sensado de Temperatura Para Vehículos*. Escuela de Ciencia y Tecnología-Universidad Nacional de San Martín (UNSAM).
- Instituto Geográfico Nacional Madrid, España. (2003). *¿Qué son las tormentas geomagnéticas?*. Disponible en: www.ign.es/resources/docs/IGNCnig/Tormentas_geomagneticas.pdf.
- Instituto Navarro de Administración Pública (2014). *GPS de Precisión*. SITMA (Sistema de Información Territorial de Navarra). Sitio web: www.sitna.navarra.es
- Charlotte L. E., Brandão Z. N., Moreira de Faria C., (2014). *Creación de mapas de manejo con datos espaciales*. Researchgate. Disponible en: www.researchgate.net/publication/267654739.
- Léniz D. R. (2020). *Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)*. Disponible en: www.navegacion.tripod.com/ayudas-electronicas.html
- Masola M. J. (2020). *Propagación Lateral de la Compactación por Tránsito de la Maquinaria Agrícola: ¿Afecta la calidad del suelo, el intercambio gaseoso y la productividad de los cultivos?*. Facultad de Ciencias Agrarias-Universidad Nacional del Litoral.
- Oficina Nacional de Coordinación de Posicionamiento, Navegación y Sincronización Basados en el Espacio (2014). Disponible en: www.GPS.gov/.
- Pathak A. (2024). *Tecnología GNSS vs GPS: Explicación de las principales diferencias*. Geekflare. Disponible en: www.geekflare.com/es/gnss-vs-gps-technology
- Redacción National Geographic (2023). *¿Qué son las placas tectónicas y qué ocasiona sus movimientos?*. National Geographic-Medio Ambiente. Disponible en: www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-son-las-placas-tectonicas-y-que-ocasiona-sus-movimientos.
- Scaramuzza F. (2024). *En Argentina hay más de 12.000 máquinas conectadas que envían datos de 18 millones de hectáreas: la transformación de las empresas*

agropecuarias hacia la agricultura 5.0. Congreso de Agricultura de Precisión del INTA Manfredi. Disponible en:

www.news.agrofy.com.ar/noticia/210635/argentina-hay-mas-12000-maquinas-conectadas-que-envian-datos-18-millones-hectareas.

- Terra J. (2006). *Esquema de la constelación NAVSTAR*. Disponible en: www.researchgate.net/figure/Figura-21-Esquema-de-la-constelacion-NAVSTAR_fig1_261250644.
- Scaramuzza F. D., Méndez A., Vélez J. (2014). *El Piloto Automático en la Agricultura*. Red Agricultura de Precisión - INTA EEA Manfredi.