

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA



**PRINCIPALES TECNOLOGÍAS USADAS EN LA AGRICULTURA DE
PRECISIÓN**

Por:

JUAN PABLO RIVERA HERNÁNDEZ

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Saltillo, Coahuila, México.

Junio, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA AGRICULTURA DE
PRECISIÓN

Por:

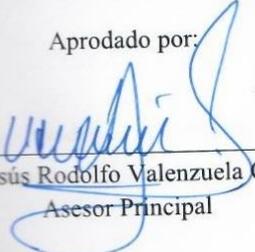
JUAN PABLO RIVERA HERNÁNDEZ

MONOGRAFÍA

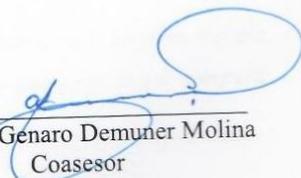
Presentada a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para
obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Aprobado por:


Dr. Jesús Rodolfo Valenzuela García
Asesor Principal


M.C. Juan Francisco De La Peña Casa
Coasesor


M.C. Genaro Demuner Molina
Coasesor




M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México.
Junio de 2021

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Agradezco a mi Dios por darme las bendiciones, dicha, salud y fortaleza para vencer las adversidades de llegar con bien hasta este instante.

A mi Alma Terra Mater:

Por abrirme las puertas a la educación superior, abrigarme como a todos los estudiantes de la narro, permitirme darme identidad dentro de sus instalaciones e historia.

A mis Maestros:

Gracias a todos los docentes del departamento de maquinaria agrícola quienes me ayudaron a crecer en mi formación tanto profesional como personal. Un agradecimiento especial al M.C. Juan Antonio Guerrero y M.C. Héctor Uriel Serna por su labor más allá de ser docentes.

A mi asesor:

Dr. Jesús Rodolfo Valenzuela por brindarme la confianza y el apoyo para el desarrollo y culminación de mi trabajo, así como de mis estudios.

A mis compañeros:

Gracias a mis compañeros de la generación CXXVII por los momentos a lo largo de nuestra estancia en la universidad. De igual manera a todas aquellas personas con la que compartí el 424, gracias por todo durante mi estancia en Saltillo.

DEDICATORIAS

A mi madre:

Sra. Eva Hernández Cervantes por siempre estar a mi lado y ser un ejemplo de amor incondicional de madre, motivándome siempre a nunca darme por vencido.

A mis ángeles:

A mi padre J. Jesús Rivera Sandoval y mi hermano José Francisco Rivera Hernández que me cuidan desde el cielo, gracias por dar la vida por mí, no se les defraudara.

A mis hermanos:

Blas, Hugo y Abraham, son mi mas grande ejemplo a seguir, por todos los consejos y apoyo a su hermanito, somos la misma sangre.

A mis amigos:

Luis Ángel, Baltazar, Esteban, Toño y Lorenzo, esta va por ustedes, porque yo no tengo amigos, yo tengo familia.

A mis padrinos y abuela:

Sr. Ignacio Ramos, Sra. Estela Hernández y Sra. Enedina Cervantes, por los consejos y el apoyo económico en tiempos difíciles y tenerme siempre en sus oraciones.

A mi paloma:

Katterine Liliana Cruz Rodríguez, las cosas no se dieron de la mejor manera, pero aun así aquí estamos, por esa compañía y compartir los mejores momentos a lo largo de mi vida y mis estudios, te quiero.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIAS.....	IV
INDICE DE FIGURAS	VIII
INDICE DE CUADROS	X
1. RESUMEN.....	11
2. JUSTIFICACION.....	12
3. OBJETIVOS.....	13
3.1. Objetivo General	13
3.2. Objetivos Específicos	13
4. EVOLUCIÓN E IMPORTACIÓN DE LA AGRICULTURA.....	14
5. COMIENZO Y CONCEPTO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	16
5.1. Definiciones para la Agricultura de Precisión.....	19
5.2. Objetivo y ventajas de la Agricultura de Precisión.....	20
5.3. Antecedentes y crecimiento en la Agricultura de Precisión	21
6. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)	22
6.1. Funcionamiento	23
6.2. Triangulación de satélites	24
6.3. Medición de distancia	26
6.4. Control de tiempo	27
6.5. Determinación de la posición de los satélites	29
6.6. GPS en la agricultura de precisión	30
7. MONITOR DE RENDIMIENTO	32

7.1. Mapas de rendimiento	33
8. MANEJO DE SITIO ESPECÍFICO.....	35
8.1. Mapas de prescripción	38
8.2. Mapas de diagnostico	39
9. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA	40
9.1. Historia y antecedentes de los SIG	41
9.2. Componentes de un SIG	44
9.2.1. Datos.....	44
9.2.2. Software.....	44
9.2.3. Hardware	45
9.2.4. Personal	45
9.2.5. Métodos	45
9.3. Funciones de los SIG	45
10. AGRICULTURA DE PRECISION MODERNA	47
10.1. Vehículos autónomos	48
10.2. Vehículos Autónomos Aéreos	48
10.2.1. Drones.....	48
10.2.2. Tipos de Drones.....	49
10.2.3. Características.....	53
10.2.4. Componentes mecánicos	54
10.2.5. Componentes eléctricos.....	54
10.2.6. Rendimiento	55
10.2.7. Diferencias y Usos.....	56
10.3. Vehículos semiautomáticos	57
10.3.1. Funciones.....	59

10.3.2. Beneficios	59
10.3.3. Modelos actuales en el mercado.....	60
10.4. Tractores Autónomos	61
10.4.1. Case IH: Magnum.....	61
10.4.2. Kubota: X Tractor.....	63
10.4.3. John Deere	65
10.5. Vehículos Autónomos en la Agricultura	66
10.5.1. Antecedentes de Uso	66
10.5.2. Características y tecnología usada.....	72
10.5.3. Ventajas y desventajas.....	75
11. CONCLUSION	76
12. BIBLIOGRAFIA.....	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación de Agricultura de Precisión	16
Figura 2: Etapas de la Agricultura de Precisión	17
Figura 3: Esquema de la constelación NAVSTAR	23
Figura 4: Medición de la distancia a un satélite.	24
Figura 5: Intersección de la medición de dos satélites.	25
Figura 6: Intersección de tres satélites.....	25
Figura 7: Intersección de cuatro satélites..	26
Figura 8: Comparación de los códigos pseudo aleatorios del receptor y el satélite, para determinar la distancia que los separa.	27
Figura 9: Medición de distancia a los satélites, en dos dimensiones.....	29
Figura 10: Mapa de rendimiento, pixelado(izquierda) y suavizado(derecha). Muestra diferentes niveles de rendimiento según la leyenda.	33
Figura 11: Representación de mapa de diagnóstico, de rendimiento y/o de prescripción para el manejo de sitio específico.....	36
Figura 12: Drone de ala rotatoria con control remoto y smartphone.....	49
Figura 13: Drone ala fija.....	51
Figura 14: Tipo de Drone de ala rotatoria	52
Figura 15: Drone híbrido	52
Figura 16: Componentes de un autoguiado	58
Figura 17: Funciones de un autoguiado.....	59
Figura 18: Autoguiado montado en la cabina de un tractor	58
Figura 19: Tractor autónomo Magnum de CASE IH	62
Figura 20: Tractor autónomo X Tractor de Kubota.....	63

Figura 21: Tractor autónomo de la marca John Deere	65
Figura 22: Agrobot	67
Figura 23: Braco robótico de Agrobot.....	67
Figura 24: Kiwifruit Picker	68
Figura 25: Kiwifruit Picker recolectando kiwis	68
Figura 26: Proyecto presentado por Blue River Technology	69
Figura 27: Aplicación de químicos sobre maleza.....	69
Figura 28: Recolector de manzanas de Abundat Robotics	70
Figura 29: Vinerobot realizando recorrido	70
Figura 30: HA-100 robot colaborativo	71
Figura 31: HA-100 robot trabajando	71
Figura 32: Vinbot	72

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Etapas para la aplicación de Agricultura de Precisión.....	18
Cuadro 2: Comparación de rendimientos según el tipo de Drone	555
Cuadro 3: Diferencias y usos del tipo de drones	566
Cuadro 4: Comparación de autoguiados.....	60
Cuadro 5: Ventajas y desventajas de los vehículos autónomos terrestres	75

1. RESUMEN

Se investigó en diferentes fuentes de información la historia y las tecnologías que se han y están usando en torno a la Agricultura de Presión. Un concepto que, aunque no muy nuevo ha venido haciendo cosas grandes, adoptando ideas surgidas en otros ámbitos como la industria, la electrónica, la programación, la mecánica y la robótica, aplicándolos en la agricultura con el fin de hacer más productivo el campo, ahorrando insumos y monitoreando la cosecha. Teniendo una idea de cómo ha trascendido a lo largo del tiempo esta tecnología, o mejor dicho como la tecnología ha estado cambiando a la agricultura al paso de los años, podemos tener una noción de a dónde vamos y que futuro podemos encontrar en el campo agrícola. Hoy siglo XXI, estamos más que consientes que no se debe desperdiciar los recursos naturales, en cualquier ámbito el aprovechamiento de los insumos, así como no producir más daño colateral al medio ambiente es el primordial objetivo. La Agricultura de Presión nos permite hoy en día trabajar de manera más eficiente el primer sector económico a niveles internacionales, por ello un repaso a su historia nos abre las puertas al conocimiento y que ideas a futuro estamos esperando de este maravilloso concepto.

Palabras clave: *Agricultura de Precisión, Insumos, Historia.*

2. JUSTIFICACION

Con la realización de esta investigación se obtendrá un panorama de como la Agricultura de Precisión ha evolucionado a lo largo de los años. Se contará con la información del surgimiento de este concepto, que tecnología fue empleada, como ha cambiado hasta la actualidad, así como también la renovación que le ha dado a la agricultura. Del mismo modo se recopilará la información de cómo han adoptado esta tecnología las empresas de maquinaria agrícola en sus equipos y que tendencias se esperaran.

Al ser un tema de auge a nivel mundial y la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro una institución agraria, tener este tipo de información en esta monografía tiene un beneficio para todo aquel que necesite consultar el tema, ya sea en el campus universitario o agentes externos.

En el departamento de maquinaria agrícola, el beneficio es directo sirviendo para la investigación, docencia y estudio del mismo.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Investigar y exponer la información más relevante sobre las tecnologías que han marcado la historia de la Agricultura de Precisión, con el fin de tener un panorama de la evolución de este concepto.

3.2. Objetivos Específicos

- Investigar la historia, tecnologías, concepto y desarrollo de la Agricultura de Precisión
- Consultar y estudiar el concepto de Manejo de Sitio específico.
- Explicar el uso de drones, tractores autónomos, mapas de rendimiento, mapas de prescripción y maquinaria censada en el campo agrícola como parte de la automatización en la Agricultura de Precisión.
- Dar un panorama sobre la Agricultura de Precisión en el futuro.

4. EVOLUCIÓN E IMPORTACIÓN DE LA AGRICULTURA

En épocas antiguas los humanos con la necesidad de supervivencia comenzaron con la caza y pesca de distintos animales, con el paso del tiempo y realizando nuevos descubrimientos desarrollaron técnicas para el cultivo de distintas plantas y frutos, generando así nuevas formas de alimentarse. Donde las herramientas que utilizaban eran la hoz o pala o si el agricultor contaba con recursos necesarios eran utilizados los tractores, de manera que su producción era escasa y se limitaba para el propio consumo del agricultor y su familia. En los años 60's y 90's se realizaron investigaciones para mejorar el rendimiento de cultivos, así como la calidad de los mismo generando una revolución en la forma en que hoy en día se realizan los procedimientos y el uso de distintas maquinarias. (agricoladofra, 2021)

A lo largo de los años los humanos han desarrollado herramientas y técnicas para la siembra de distintos tipos de cultivo, abarcando más del 30% de la superficie de labranza en el mundo, desarrollando uno de los más grandes comercios internacionales, puesto que hoy en día la agricultura es una fuente muy importante de ingresos para los países que se dedican a ello, puesto que la exportación de frutas y verduras se ha hecho una necesidad indispensable en la vida, ya que no en todos los países se puede realizar la siembra de frutos y vegetales, les es necesario importar desde otros países o continentes los frutos necesarios para la alimentación cotidiana. Y teniendo en cuenta las tendencias de alimentación sana que se viven hoy en día es indispensable contar con este tipo de cultivos. (agricoladofra, 2021)

Con todo esto se pudo definir a la agricultura como “el arte de cultivar tierra” proveniente del latín agri (campo) y cultura (cultivo) y es el conjunto de actividades y conocimientos desarrollados por el hombre, destinados a cultivar la tierra y cuya finalidad es

obtener productos vegetales (como verduras, frutos, granos y pastos) para la alimentación del ser humano y del ganado (Yirda, 2019).

La agricultura es una de las principales actividades del sector primario de cada nación, siendo el recurso más importante con el que cuenta el hombre para su subsistencia, una porción de los productos agrícolas es consumida de manera directa y otra es proporcionada a la industria para obtención de alimentos derivados, materiales textiles, químicos o manufactureros (Yirda, 2019).

Hoy en día la forma en que se cultivan la plantas es totalmente diferente a lo que antiguamente se hacía, puesto que con el desarrollo de las tecnologías se han implementado una variedad de semillas de alto rendimiento, prácticas de riego inteligente, aplicación con drones especializados, fertilizantes y plaguicidas orgánicos, sembrar varios tipos de cultivos al mismo tiempo, lo que se conoce como rotación de cultivos, etc. Conforme avanzan las tecnologías se van creando nuevas maquinarias que ayudan en los procesos de la preparación del suelo, el riego, la siembra de las semillas, la recolección del cultivo, la fertilización y el control de plagas, en cada una de estas actividades se necesita la participación de maquinaria moderna haciendo más sencillo, rápido y efectivo los métodos y técnicas de siembra (agricoladofra, 2021).

5. COMIENZO Y CONCEPTO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN

A partir de la década del '70, se comenzó a delinear un nuevo concepto de agricultura con los estudios sobre automatización de máquinas agrícolas. En forma complementaria, a fines de la década del '80 y comienzos del '90, con la liberación del sistema de posicionamiento global por satélite (GPS) para uso civil, fue posible desarrollar equipos inteligentes que permitieron el manejo localizado de las prácticas agrícolas, con una mayor eficiencia de aplicación de insumos, reduciendo el impacto sobre el medio ambiente y en consecuencia, disminuyendo los costos de la producción de alimentos. A ese conjunto de procesos y sistemas aplicados se los denomina Agricultura de Precisión (AP) (Figura 1) (E. Mantovani, 2006).

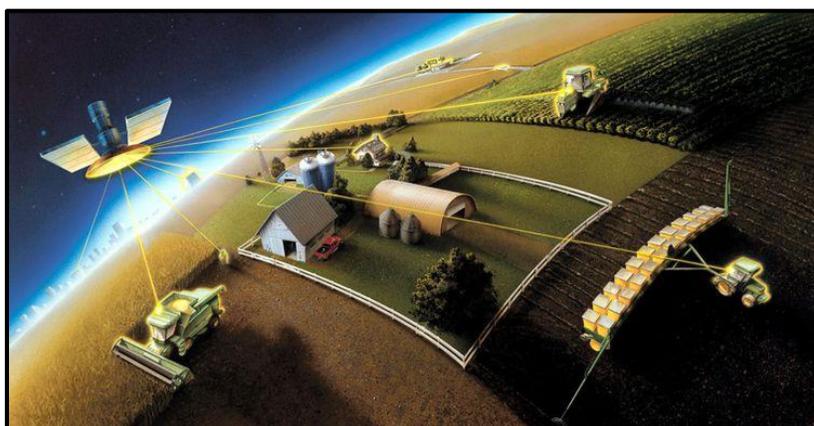


Figura 1: Representación de Agricultura de Precisión

Fuente: <https://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/abc-rural/2019/11/06/la-agricultura-de-precision-es-el-presente/>

Las características del suelo y del cultivo varían en el espacio (distancia y profundidad) y en el tiempo. La agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de esos insumos,

dependiendo del potencial y de la necesidad de cada punto de las áreas de manejo (E. Mantovani, 2006).

Por lo tanto, para entender y aplicar la agricultura de precisión, es necesario definir dos conceptos básicos:

1. Variabilidad espacial: expresa las diferencias de producción en un mismo campo, en una misma temporada y cosecha.
2. Variabilidad temporal: expresa los cambios de producción en un mismo campo, en distintas temporadas de cosecha.

De acuerdo con AGCO (2005) (Figura 2). Los agentes involucrados en el desarrollo y adopción de las prácticas de agricultura de precisión suelen dividir este conjunto de tecnologías en tres etapas diferentes (Cuadro 1).

1. Recolección de datos.
2. Procesamiento e interpretación de la información.
3. Aplicación de insumos.

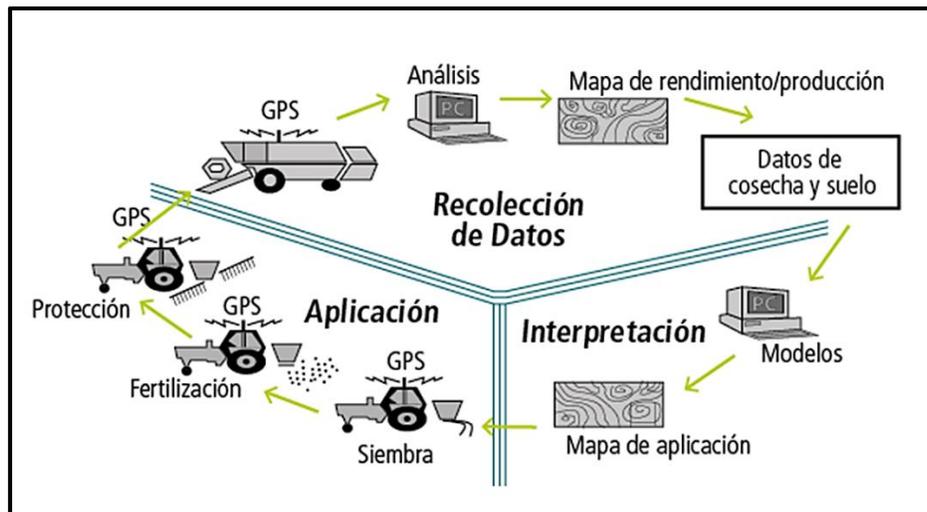


Figura 2: Etapas de la Agricultura de Precisión
Fuente: AGCO 2005

Cuadro 1: Etapas para la aplicación de Agricultura de Precisión

Etapa	Tecnología Involucrada	Actividades
<i>Recolección e ingreso de datos</i>	<ul style="list-style-type: none"> → Sistemas de posicionamiento global → Sistemas de información geográfica → Instrumentos topográficos → Sensores Remotos → Sensores directos 	<ul style="list-style-type: none"> → Medición de la topografía del suelo → Muestreo de suelo en grilla → Recorrido de los cultivos para la detección de plagas y enfermedades → Monitoreo de Rendimientos → Medición directa de propiedades del suelo y cultivos → Sensoriamiento remoto de suelos y cultivos → Digitalización de mapas
<i>Análisis, procesamiento e interpretación de la información</i>	<ul style="list-style-type: none"> → Programas de SIG → Sistemas expertos → Programas estadísticos → Experiencia del operador 	<ul style="list-style-type: none"> → Análisis de dependencia espacial → Confección de mapas de evaluación → Confección de mapas de prescripción → Otras
<i>Aplicación diferencial de insumos</i>	<ul style="list-style-type: none"> → Tecnología de dosis variable → Pulverización asistida por GPS → Programas computacionales 	<ul style="list-style-type: none"> → Aplicación de variable de nutrientes → Aplicación de variable de plaguicidas → Siembra diferencial de variedades y aplicación de variable de semilla.

Fuente: Ortega, R (2000). Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio específico.

5.1. Definiciones para la Agricultura de Precisión

- I. La agricultura de precisión (AP) integra diversas tecnologías para optimizar la productividad de un cultivo, al mismo tiempo que minimiza su impacto ambiental. Una vez que se reconoce, localiza, cuantifica y registra la variabilidad espacial y temporal de cada unidad agrícola, es posible proporcionar un manejo diferenciado en cada sitio específico (Chosla, 2001).
- II. La AP es el reconocimiento de la variedad espacial y temporal, los suelos y los cultivos, y consecuentemente, de la importancia de proporcionar un manejo agronómico específico que tenga en cuenta esas diferencias. La agricultura de precisión, conocida también como agricultura específica por sitio, usa tecnologías de información espacial, tales como los sistemas de posicionamiento global (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG), para mejorar las decisiones agronómicas de diferentes cultivos (Lisarazo y Alfonso, 2010).
- III. La AP es un concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas, basado en la existencia de variabilidad en campo. Requiere el uso de las tecnologías de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores, satélites e imágenes aéreas junto con Sistemas de Información Geográfica (SIG), para estimar, evaluar y entender dichas variaciones. La información recolectada puede ser usada para evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar fertilizantes y otras entradas necesarias y predecir con más exactitud la producción de los cultivos (Gil, 2008).
- IV. Maroni (2007) menciona que la agricultura de precisión podría definirse como un conjunto de prácticas agrícolas utilizadas para identificar y registrar la variabilidad de ciertos parámetros agronómicos dentro de un mismo lote. Sobre la base de dicha

información se aplican dosis variables de insumos posicionándolos en el lote acorde a la necesidad de un nivel de productividad prefijado.

5.2. Objetivo y ventajas de la Agricultura de Precisión

De acuerdo con el Grupo Sensor (1993), el objetivo de la AP con la automatización es aumentar la productividad de los campos, reduciendo el trabajo mediante la automatización de aquellas tareas que puedan ser automatizadas. Reducción de insumos mediante la aplicación inteligente de los mismos, realizando mediciones a través de sensores altamente precisos, y haciendo uso de tecnologías avanzada. Aumentar la simplicidad y la comodidad de los productores, al igual que la de sus trabajadores y jornaleros, facilitando su labor diaria. Aumentar la rentabilidad para el productor agropecuario (esto se logra gracias a los puntos anteriores, es decir, una reducción en la mano de obra y en los insumos necesarios para lograr los mismos resultados o incluso mejores).

Por lo mencionado en el texto anterior podemos derivar las siguientes ventajas:

- Capacidad de recabar datos en tiempo real sobre las variables que se dan en los campos de cultivo.
- Reducción del uso de insumos y la mano de obra, por lo que se abarata el coste.
- Aumento de la calidad del producto, ya que se cumplen exactamente los requerimientos del cultivo.
- Eficiencia en el uso del agua.
- Disminución del impacto ambiental derivado de esta actividad, por el menor uso de agroquímicos y el aprovechamiento racional del agua.
- Alarma ante incidencias climáticas, como las heladas o la lluvia.

5.3. Antecedentes y crecimiento en la Agricultura de Precisión

E. Mantovani (2006) menciona que se pueden describir dos líneas de desarrollo de la agricultura de precisión para entender sus antecedentes y su evolución a lo largo del tiempo: la agronómica y la ingeniería agrícola.

La línea agronómica, citada por Robert (1999), refiere a los trabajos de las décadas del '70 y '80, en Minnesota, Estados Unidos, sobre la utilización de métodos de investigación de campo para conocer mejor la variabilidad de los factores de suelo y planta, incluyendo análisis de suelo, muestreo del suelo, fotografía del área y análisis de cultivos. En estos años fue posible establecer el primer concepto de variabilidad de suelo y planta en los campos, así como los potenciales beneficios de manejo de sitio, en vez de toda el área sembrada.

La línea de la ingeniería agrícola se refiere a la evolución de las máquinas agrícolas, utilizando sensores y GPS para mapeo y aplicación de insumos con dosis variada. De acuerdo con Blackmore (1997), la empresa Massey Ferguson fue, en 1982, la primera compañía en producir una cosechadora comercial con sistema de mapeo de productividad de granos. A partir de entonces diversas empresas de maquinaria agrícola comenzarían a trabajar en proyecto de AP para sus equipos.

En la mayoría de las cosechadoras disponibles en el mercado mundial, que operan dentro del concepto de agricultura de precisión, encontramos los siguientes componentes del sistema de monitoreo de rendimiento de granos (Morgan and Ess, 1997):

- i. Sensores para medir el flujo de los granos
- ii. Humedad de los granos
- iii. Velocidad de cosecha

- iv. Indicador de posición de la plataforma de corte de la cosechadora
- v. Monitor de funciones de las operaciones
- vi. GPS.

Los mapas de rendimiento de granos se elaboran a partir de la información recibida por esos sensores y procesada por un software como, por ejemplo, un Sistema de Información Geográfica (SIG). De acuerdo con Moore (2000), a lo largo del tiempo, se produjo el siguiente esquema de desarrollo:

- i. 1982 Desarrollo del monitor de rendimiento
- ii. 1984 Desarrollo del sistema de posicionamiento
- iii. 1985/96 Desarrollo de la tecnología de dosis variable
- iv. 1991 Primer sistema de monitoreo de rendimiento vendido en Europa.
- v. 1996 Lanzamiento de los modelos comerciales de monitoreo de rendimiento.

6. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global, conocido por sus siglas en inglés GPS (Global Positioning System), es un sistema de radionavegación satelital operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. Este sistema está diseñado para que un observador pueda determinar cuál es su posición en la Tierra, con una cobertura sobre todo el planeta, en todo momento y bajo cualquier condición climática (M. Claret, 2006).

Si bien el sistema GPS fue diseñado esencialmente con fines militares, el uso civil se ha difundido debido a su utilidad en las más variadas disciplinas, que van desde las netamente científicas, como la geodesia y tectónica, hasta fines comerciales como el geomarketing,

pasando por fines puramente recreacionales. Otro factor importante en su difusión ha sido el bajo costo, ya que el uso del sistema es gratuito. Sólo es necesario contar con un receptor GPS, cuyo precio varía según el nivel de precisión que se quiere obtener.

M. Claret; S. Best y L. León (2006) recabaron información acerca del funcionamiento, triangulación, medición de distancia, control de tiempo y determinación de posición de los satélites de la constelación NAVSTAR, explicando de esta manera cómo funciona el GPS.

6.1. Funcionamiento

El sistema GPS se basa en la constelación de satélites NAVSTAR (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) que comenzó su operación entre los meses de febrero y diciembre de 1978, con el lanzamiento de los primeros cuatro satélites. Luego se llegó a un total de 24 satélites ubicados en seis planos orbitales, que tienen una inclinación de 55° con respecto al Ecuador (Figura 3). Los satélites se encuentran a una distancia aproximada de 20.000 km de la Tierra y describen una órbita elíptica, casi circular, de doce horas de duración (L. León, 2006).

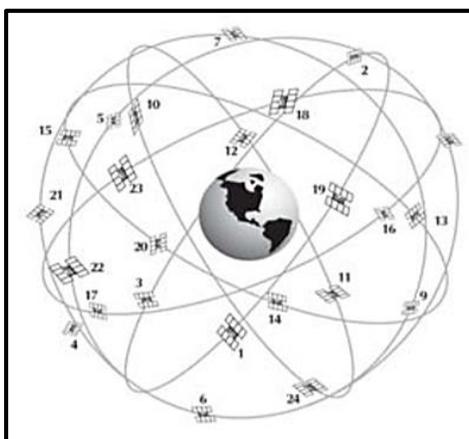


Figura 3: Esquema de la constelación NAVSTAR

Fuente: Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable.

Con esta configuración se garantiza que en cualquier lugar de la Tierra habrá al menos cuatro satélites sobre el horizonte en todo momento, número mínimo requerido para obtener una posición mediante un receptor GPS (L. León. 2006).

6.2. Triangulación de satélites

Para determinar una posición sobre la superficie de la Tierra, se calcula la distancia desde el punto geográfico hasta el grupo de satélites que actúa como puntos de referencia de alta precisión. Si conocemos nuestra distancia a un satélite, podemos estimar dicha distancia como el radio de una esfera con centro en el satélite (Figura 4), por lo que nosotros estaríamos ubicados en algún punto de la superficie de esta esfera (S. Best, 2006).

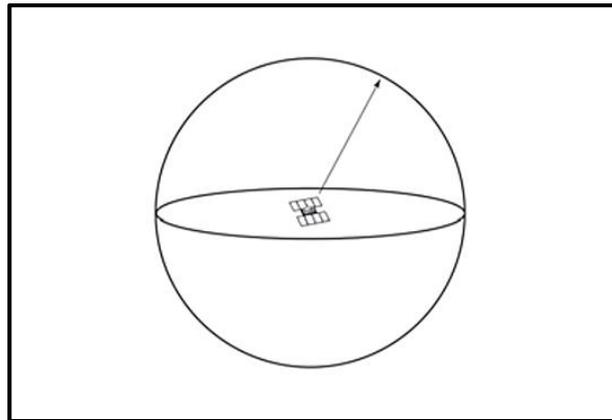


Figura 4: Medición de la distancia a un satélite. (Nuestra posición es un punto en la superficie de la esfera generada con radio a la distancia del satélite al receptor GPS).

Fuente: Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable.

Al determinar el receptor GPS la distancia a un segundo satélite se puede generar otra esfera, con lo que la búsqueda de nuestra posición se reduce a la intersección de las dos esferas (Figura 5).

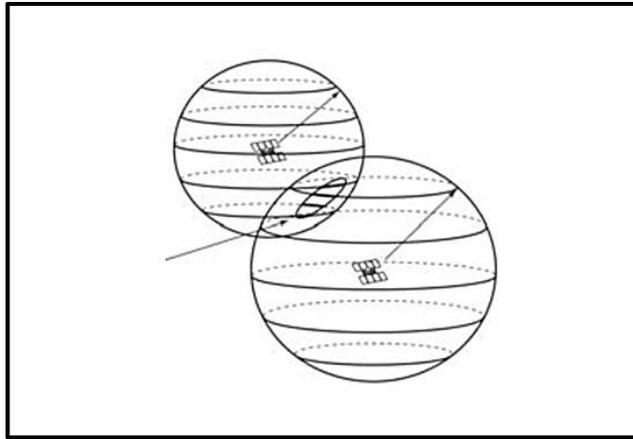


Figura 5: Intersección de la medición de dos satélites. (Intersección de dos esferas es un círculo).
Fuente: Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable.

Al conocer la distancia a un tercer satélite la intersección de las tres esferas se reduce a dos puntos (Figura 6). Una de estas posiciones puede ser descartada como una respuesta no válida, por dar una posición muy lejana de la superficie de la Tierra o porque se mueve a una alta velocidad.

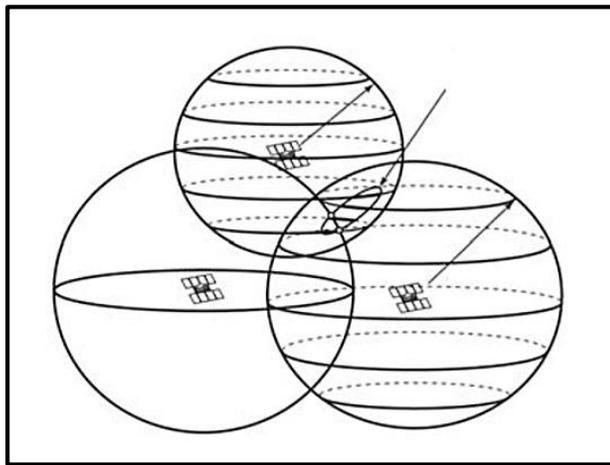


Figura 6: Intersección de tres satélites. (Con tres satélites ya se puede determinar una posición en dos dimensiones).
Fuente: Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable.

A pesar de que podríamos determinar nuestra posición con sólo tres satélites, metodología conocida como posicionamiento 2D, en la práctica es necesaria la información

de un cuarto satélite para resolver adecuadamente las ecuaciones que determinan las coordenadas X, Y, Z y el tiempo, para obtener una precisión aceptable (Figura 7).

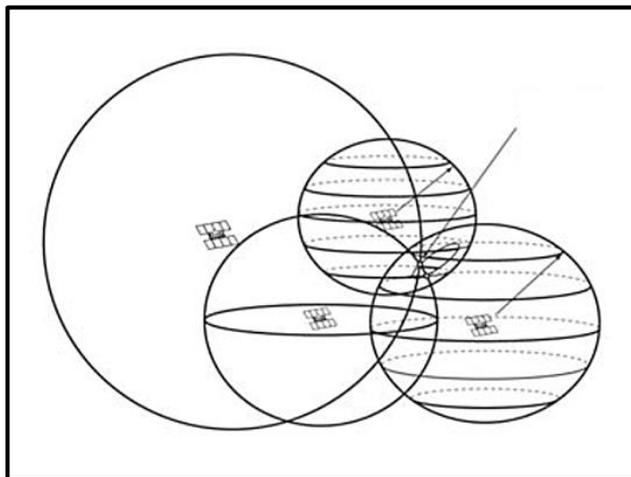


Figura 7: Intersección de cuatro satélites. (Con cuatro satélites se puede obtener una posición confiable reduciendo las posibilidades a un solo punto).

Fuente: Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable.

6.3. Medición de distancia

Para resolver el problema de la triangulación, el receptor GPS primero debe determinar la distancia a los satélites, para lo cual se vale de las señales de radio emitidas por cada uno de ellos, midiendo cuánto tardan en llegar desde el satélite al receptor (S. Best, 2006).

Matemáticamente es un problema sencillo, similar a los problemas del colegio en que se pregunta qué distancia recorre un tren que viaja a 120 km/h durante 2 horas. En el caso del GPS estamos midiendo una señal de radio que viaja a la velocidad de la luz, aproximadamente 300.000 km/seg. Para determinar cuánto tiempo tarda la señal en llegar, tanto el satélite como el receptor generan una señal con un código pseudo aleatorio en forma simultánea. El receptor GPS examina el código que está recibiendo desde el satélite y determina cuánto tiempo ha transcurrido desde que generó el mismo código (Figura 8). Sólo

falta multiplicar este tiempo por la velocidad de la luz y ya tenemos la distancia (S. Best, 2006).

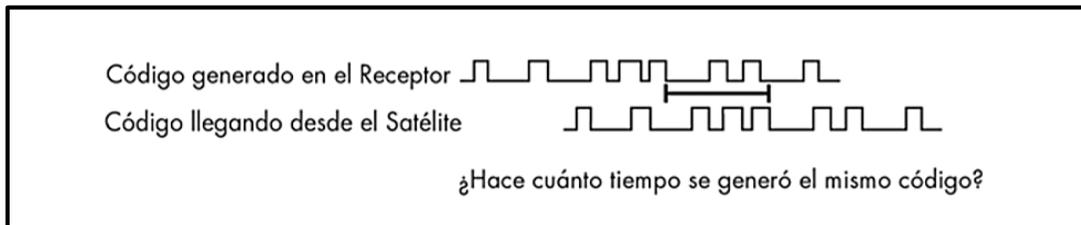


Figura 8: Comparación de los códigos pseudo aleatorios del receptor y el satélite, para determinar la distancia que los separa.

Fuente: Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable.

El código pseudo aleatorio corresponde a una sucesión muy complicada de pulsos “on” y “off”. La complejidad del código permite asegurar que el receptor GPS no se sintonice accidentalmente con otra señal. Esta complejidad también dificulta la interferencia intencional por parte de terceros que pretendan manipular o dificultar el funcionamiento del sistema GPS (S. Best, 2006).

Dado que cada satélite tiene su propio y único código pseudo aleatorio, esta complejidad también permite garantizar que el receptor no se confunda accidentalmente de satélite. Este código le da la posibilidad al Departamento de Defensa de Estados Unidos de controlar el acceso al sistema GPS en caso necesario (S. Best, 2006).

6.4. Control de tiempo

S. Best, (2006), nos dice que la distancia se determina calculando el tiempo que tarda la señal de radio en llegar al receptor, pero debemos tener presente que, si esta medición se realiza con un desvío de una milésima de segundo, a la velocidad de la luz, significa un error

de aproximadamente 300 km. Debido a esto, la sincronización de la emisión del código entre el satélite y el receptor debe ser prácticamente perfecta.

M. Claret, (2006) refleja que para asegurar una adecuada medición del tiempo, se cuenta con relojes atómicos a bordo de cada satélite, los que cuentan con una precisión de un nanosegundo. Sin embargo, en el caso de los receptores es impracticable el uso de estos relojes, entre otras cosas, debido al altísimo costo que ello implicaría para cada receptor (costos por sobre los USD 50.000 a USD 100.000). Por este motivo se utilizan relojes de menor precisión, los que usualmente son de cuarzo con una alta estabilidad, especialmente diseñados para el uso en el GPS.

Como se explicó S. Best (2006) más arriba se puede calcular una posición con tan sólo tres satélites, pero el sistema ha sido diseñado de modo que permita corregir el error de sincronización en el reloj del receptor, mediante la medición de un cuarto satélite.

Con relojes perfectos la intersección de las distancias a todos los satélites sería un punto único que indicaría nuestra posición. Pero con relojes imperfectos, una cuarta medición, realizados como control cruzado, no intersecará en el punto calculado con los tres satélites iniciales. Cuando esto ocurre la computadora del GPS atribuirá la diferencia a una desincronización con la hora universal utilizada por el sistema, por lo que el reloj interno será automáticamente adelantado o atrasado hasta que permita que las mediciones de las distancias coincidan en un solo punto (M. Claret, 2006).

De esta forma se puede tener un reloj de precisión atómica en la palma de la mano, por lo que el sistema GPS no sólo trae como beneficio determinar posiciones sino también un control de tiempo altamente preciso (Figura 9) (M. Claret, 2006).

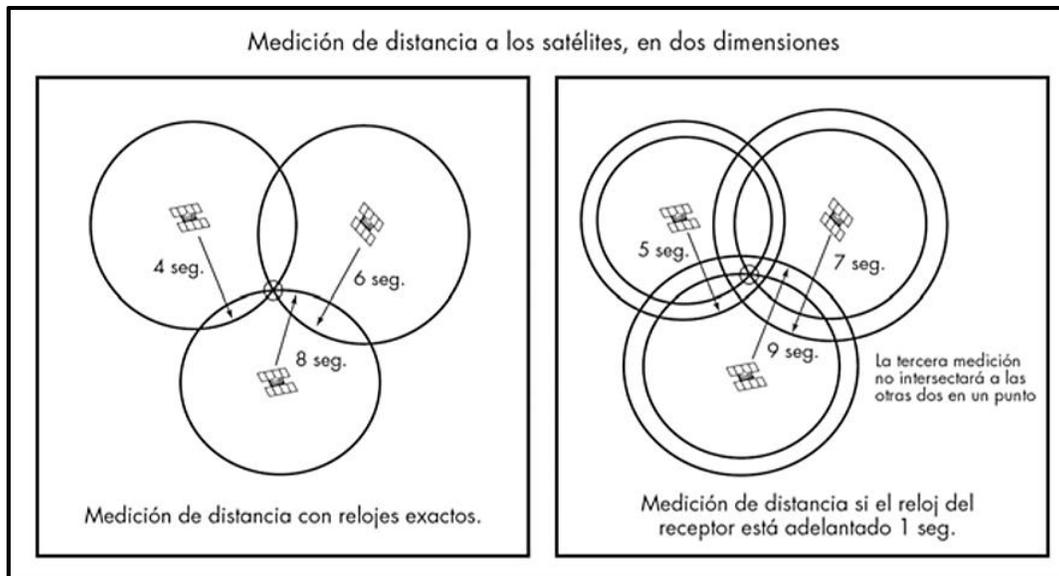


Figura 9: Medición de distancia a los satélites, en dos dimensiones. (Es sistema realiza un ajuste del reloj interno del receptor GPS).

Fuente: Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable.

6.5. Determinación de la posición de los satélites

L. León y M , Claret (2006) Menciona que para utilizar los satélites como puntos de referencia necesitamos saber, exactamente, dónde están en el momento en que se realiza la medición. Recordemos que esta posición será el centro de una esfera de radio igual a la distancia al receptor que, intersectada con otras esferas, nos dará nuestra posición en la Tierra.

Cada satélite de la constelación NAVSTAR está a una distancia aproximada de 20.000 km de la Tierra, en una órbita sumamente estable por lo que también predecible mediante ecuaciones matemáticas (L. León y M , Claret. 2006).

Los receptores GPS tienen en su memoria un almanaque que les permite saber dónde está cada satélite en un momento determinado. Este almanaque es actualizado con las efemérides que corresponden a los datos que el Segmento de Control transmite a cada satélite,

con información sobre las correcciones en los cálculos de las órbitas, luego de los continuos monitoreos realizados por este Segmento, mediante radares muy precisos que les permiten determinar la exacta altura, posición y velocidad de cada satélite (M , Claret. 2006).

6.6. GPS en la agricultura de precisión

Las aplicaciones de los sistemas de posicionamiento global y de navegación en la agricultura pueden ser muy diversos. No obstante, las más comunes que se pueden citar son las siguientes: determinación de los límites de la finca, parcela o milpa, guiado automático de maquinaria agrícola, asignar las coordenadas a las muestras tomadas con objeto de elaborar los mapas de producción u otra característica y determinar la actuación en cada punto. Un ejemplo de esto último, sería distribución de la dosis de fertilizante y fitosanitario en función de las coordenadas (Riquelme, 2011).

En la misma línea, los sistemas de navegación también resultan muy útiles en la agricultura. Estos sistemas son muy necesarios en explotaciones grandes a la hora de aplicar los tratamientos fitosanitarios y los fertilizantes. En estas tareas se emplea maquinaria agrícola pesada, y pequeños errores en la conducción pueden provocar que una franja del cultivo quede sin tratar (pérdidas de producción), que se aplique una sobredosis (perjuicios medio ambientales y económicos), etc. Los sistemas de navegación también resultan de gran utilidad en casos concretos, como la aplicación de los herbicidas sistemáticos que se deben aplicar durante el crepúsculo, así como en el guiado del vehículo cuando las condiciones atmosféricas son adversas. Por ello, no es de extrañar que numerosos investigadores trabajen en este campo (Riquelme, 2011).

El GPS se ha convertido en la herramienta más potente para el posicionamiento, proporcionando posiciones espaciales para puntos fijos o en movimiento, con una precisión que varía desde los pocos milímetros hasta un par de decenas de metros. Todos los receptores GPS muestran la ubicación de un punto mediante coordenadas. Estas pueden ser geográficas (geodésicas) o cartesianas, pero en general los GPS muestran las coordenadas geográficas a menos que se programe de otra manera. Las coordenadas geográficas se expresan en latitud, longitud y altura, siendo las unidades de las primeras dos en grados, minutos, y segundos por ser ángulos y la altura se expresa en metros o pies. Estas coordenadas se basan en un sistema de tres ejes con centro en el centro de masa de la tierra (Manfredi, 2000).

Las coordenadas geográficas se pueden definir de la siguiente manera (INTA, 2000):

- Longitud: es el ángulo que se forma, en el centro de la tierra, entre el plano del meridiano de Greenwich y el plano del punto a ubicar. Para la longitud se toma como cero el meridiano de Greenwich, y va hasta $+180^\circ$ hacia el Este y -180° hacia el Oeste.
- Latitud: es el ángulo entre el plano del Ecuador y el plano formado por el punto a ubicar y el centro de la tierra. Va de 0 a 90° , siendo 0 el Ecuador, y $+90^\circ$ el polo Norte y -90° el polo Sur. Estos se denominan paralelos.
- Altura o Altitud: se expresa en metros o pies, tomando como referencia el nivel del mar; es decir que se le da alguna unidad de longitud y se pronuncia sobre el nivel del mar abreviándose s.n.m. (en caso de ser una altura superior a esta). Por ejemplo, la cima del Monte Everest se encuentra a 8848 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar).

7. MONITOR DE RENDIMIENTO

La utilidad primaria de los sistemas de monitoreo de la producción (en adelante, monitores de rendimiento) es la evaluación de la variabilidad espacial del rendimiento dentro de una parcela o explotación. Los monitores de rendimiento no miden directamente el rendimiento (o producción por unidad de superficie), sino que estiman el rendimiento relativo en función de la tasa de flujo de masa de grano. Junto a un receptor GPS, los monitores de rendimiento proporcionan una evaluación de la variabilidad espacial del rendimiento en una superficie. Finalmente, el sistema de monitores de rendimiento y el procesado de los datos, permite la elaboración de mapas de rendimiento, y estos mapas permiten evaluar la producción en cada zona de la parcela (Pionner, 2020).

La superficie que abarcan los puntos de rendimiento está compuesta por el ancho de la plataforma de la cosechadora y la distancia recorrida por la cosechadora en el tiempo que tarda en grabar un dato y otro. A su vez, si el monitor de rendimiento de la cosechadora está conectado a un GPS esos datos componen un mapa de rendimiento (Agrobit, 2020).

Los datos del monitor de rendimiento permiten evaluar el rendimiento del cultivo en el conjunto (y en cada zona) de la parcela, e informar en la toma de decisiones (muestreos de suelo, enmiendas y abonados, nivelaciones de terreno), y plantear estrategias de agricultura de precisión (Agrobit, 2020).

Los mayores avances que se logran en lo que respecta a monitores de rendimiento son en las pantallas y en la simplicidad de los programas de mapeo, que han ido logrando las diferentes empresas para comodidad del usuario. Básicamente, se han logrado transformar a los monitores que poseían gran cantidad de teclas, en monitores de pantalla activa, pudiéndose visualizar en la pantalla de cuarzo las teclas que el usuario deberá apretar para

pasar de una pantalla a otra, que conducen a un objetivo, como puede ser información general de lotes, cargas, velocidad, flujo de trabajo, rendimiento, etc., o también, acceder a pantallas de calibración de peso, distancia, humedad, vibración entre otros factores dependiendo del monitor con el que se trabaje (Pionner, 2020).

7.1. Mapas de rendimiento

Mapa de rendimiento (Figura 10), es la representación gráfica de una serie de datos geoposicionados de rendimiento y humedad de granos obtenidos mediante una cosechadora equipada con un monitor de rendimiento y un receptor DGPS (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial). Los mapas de rendimiento permiten cuantificar la variabilidad existente en lotes de cultivo (Amuchastegui, 1999).

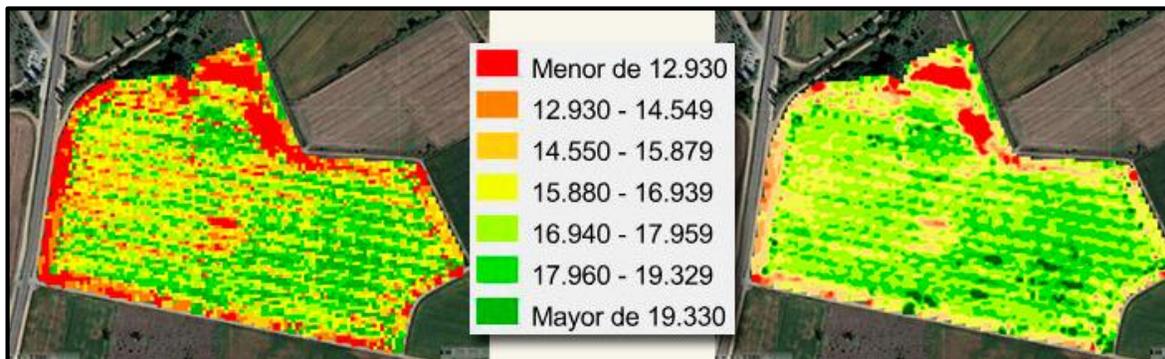


Figura 10: Mapa de rendimiento, pixelado(izquierda) y suavizado(derecha). Muestra diferentes niveles de rendimiento según la leyenda.

Fuente: https://www.pioneer.com/web/site/spain/programs_services/information/monitor_rendimiento

Lago (2011) define los mapas de rendimiento (MR) como imágenes georreferenciadas con una escala de colores que indican el rendimiento de un punto en específico. Por lo general, son desarrollados por especialistas en la agricultura, donde los interesados (agricultores, cosechadores y productores) deben pagar un precio alto para

obtenerlos. Los MR son entradas para el proceso de aplicación de Dosis Variable (DV) de los distintos químicos que necesita un cultivo (fertilizante, herbicida, riegos, etc.). Las cosechadoras, fertilizadoras y otras máquinas, necesitan da la instalación de una computadora abordo para el control y monitoreo, también es válido el uso de sensores de flujo para medir y registrar el rendimiento puntual.

Los datos recogidos a través de las diferentes capas de información pueden ser mapas de rendimiento de cultivos anteriores, fotografía aérea, mapas topográficos, imágenes satelitales, experiencias anteriores del productor o bien mapas de suelo de áreas homogéneas, permite definir dentro de un lote sitios con potencialidad de rendimiento muy diferentes, bien definidas. Si el área y las diferencias de rendimiento justifican agronómica y económicamente el tratamiento diferencial de los insumos, se podría comenzar con la siguiente etapa, que consiste en la caracterización de los ambientes y posterior diagnóstico de la aplicación de insumos (semillas y/o fertilizante) en forma variable, estos cambios de dosis y densidades pueden lograrse dado que existen en el mercado navegadores, controladores, actuadores y GPS que posibilitan realizar los cambios de dosis y densidades en tiempo real siguiendo prescripciones o recomendaciones que son encargadas previamente en monitores de máquinas inteligentes (Reynolds, 2014).

La información que se obtiene de un mapa de rendimiento es una herramienta básica para la agricultura de precisión, ya que permite visualizar y también cuantificar la variedad espacial que se puede encontrar en un lote. Una adecuada utilización de mapas de rendimiento requiere de técnicas para poder acondicionar los datos que el mapa nos ofrece, eliminando errores podemos obtener una mejor lectura de los datos y ello nos ayudara a

realizar una lectura más acertada de la información que contengan los mismos para poder tomar decisiones a futuro más acertadas (Labandibar, 2014).

Los mapas de rendimiento son la mejor herramienta para la declinación de zonas de manejo o la declinación de zonas donde se muestran los diferentes factores que afectan la producción, ya que el rendimiento del cultivo es el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas de una finca (Bongiovanni, 2006).

El mapa de rendimiento produce información detallada de la productividad del campo y brinda parámetros para diagnosticar y corregir los problemas de bajo rendimiento en algunas áreas del campo o estudiar las causas por las cuales el rendimiento es más elevado en algunas zonas del terreno. Un monitor de rendimiento es un sistema que recoge la información procedente de distintos sensores y con la ayuda de un software calcula el rendimiento de un cultivo en el tiempo y el espacio, basándose en la información de localización de cada parcela proporcionada por el sistema GPS (Garcia y Flego, 2005).

8. MANEJO DE SITIO ESPECÍFICO

El área de mayor desarrollo dentro de la AP es el Manejo de Nutrientes Sitio-Específico (MNSE), también llamado Tecnología de Dosis Variables (TDV), que corresponde a la aplicación variable de dosis de fertilizantes de acuerdo al nivel de fertilidad de cada sector de manejo homogéneo dentro del potrero, lo cual significa que no se trabaja, necesariamente con una sola dosis de fertilizante, sino que con tantas dosis como áreas significativamente homogéneas existan en la explotación. (Ortega y Flores, 2008).

El manejo de sitio específico, significa tratar áreas menores dentro de lotes de una manera distinta a la que se manejaría el lote entero. El manejo de sitio específico reconoce e identifica variaciones en tipo de suelo, color y productividad dentro de lotes. Luego se trata de manejar esa variabilidad en una escala mucho menor que en las practicas normales. Incluye recolectar, interpretar y manejar gran cantidad de datos agronómicos detallados, de lugares precisos en los lotes en un intento de ajustar y mejorar la eficiencia de la producción de cultivos (Terry, 2000).

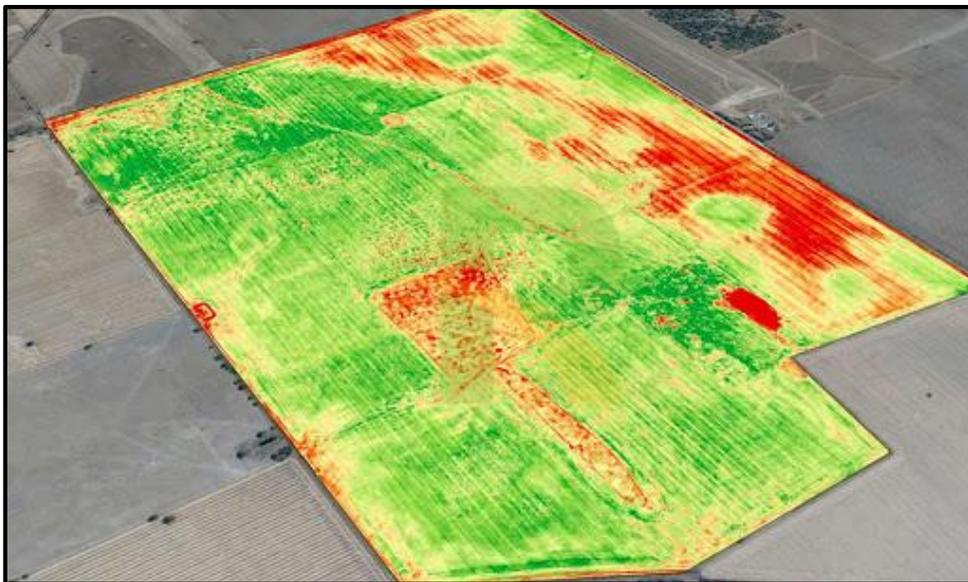


Figura 11: Representación de mapa de diagnóstico, de rendimiento y/o de prescripción para el manejo de sitio específico

Fuente: <http://www.rastrsgis.com/es/la-importancia-de-la-agricultura-de-precision/>

Pagani (2013), menciona que el manejo de sitio específico de nutrientes es la tecnología de procesos que permite diagnosticar y variar espacialmente los niveles de nutrientes y enmiendas a aplicar (Figura 11). Con el fin de alcanzar el nivel óptimo de cada nutriente en cada parte del lote.

El manejo de sitio específico mejora la rentabilidad al incrementar los rendimientos y reducir el costo de los insumos. Esto no implica tácticamente que se vayan a utilizar menos insumos, sino que es más eficiente su uso, obteniendo más rendimiento por unidad de superficie (Espinosa, 2016).

Las aplicaciones de insumos agrícolas por sitio específico se pueden implementar dividiendo un campo en zonas más pequeñas; que sean más homogéneas en las propiedades de interés que el campo en su totalidad. Un manejo de sitio específico se define como una porción del terreno que tiene una combinación homogénea de factores limitantes del rendimiento para los que se requiere de una dosis de un insumo agrícola en específico (Doerge, 1998). Así, el manejo de sitio específico en un campo puede ser diferente para los diferentes insumos. El manejo de un sitio puede ser delimitado por más de un insumo agrícola. En este caso, se aplica una dosificación simple para cada insumo dentro del sitio. El número de los diferentes sitios dentro de un mismo campo está en función de la variabilidad natural del campo, la extensión del terreno y ciertos factores de manejo. El tamaño mínimo de un sitio está limitado por la habilidad del agricultor para diferenciar regiones dentro de un campo.

En AP existen dos aproximaciones para la aplicación variable de insumos. La primera de ellas se basa en el muestreo y mapeo de los factores de producción a ser manejados en forma diferencial (fertilidad del suelo, malezas, etc.) y la posterior elaboración de mapas de prescripción para la aplicación variable de los insumos (fertilizantes, herbicidas, etc.). La segunda aproximación es el sensoramiento directo del suelo y/o el cultivo para la aplicación inmediata de los insumos en forma variable. El uso de una u otra dependerá del nivel tecnológico disponible y del costo de operación involucrado (INIA, 1999).

8.1. Mapas de prescripción

El mapa de prescripción es la clave para realizar una correcta aplicación selectiva de herbicidas y lograr el control deseado de las malezas presentes en el lote. Para elaborar los mapas de prescripción se parten de imágenes aéreas georreferenciadas del lote, tomadas previamente. Es importante mencionar que las imágenes no deben ser muy antiguas y deben reflejar en la situación real presente en el lote (Hernán, 2015).

Los mapas de prescripción se obtienen de imágenes aéreas geo-referenciadas del lote, tomadas previamente para reflejar la densidad de malezas real presente en el lote. La clave para describir adecuadamente la variabilidad de las propiedades químicas del suelo que limitan el rendimiento es la obtención de muestras especialmente dependientes para la interpolación y generación de mapas. A partir de estas imágenes y mediante el uso de un software GIS, se puede generar un mapa que nos permita delimitar las zonas afectadas por malezas. Los mapas de rendimiento sirven para evaluar si realmente el factor limitante de la producción (nutriente) fue eliminado o si además existen otros factores que impiden la respuesta aplicada. Para un correcto mapeo de rendimiento debe utilizarse un software especializado (Martínez, 2013).

Agüera y Pérez (2013), mencionan que la información que conforman los mapas de prescripción pueden provenir de muchas fuentes (mapas de producción, sensores del terreno, del cultivo, etc.), imposible de manejar mediante sistemas tradicionales. En este caso son los ordenadores, mediante aplicaciones informáticas especiales denominadas Sistemas de Información Geográfica para Agricultura (AgGIS), los que intervienen. Estas aplicaciones, además de almacenar ordenadamente toda la información, permiten su visualización, así como su tratamiento estadístico para el cruce de los distintos datos. La creación de una base

de datos de cada parcela es una herramienta fundamental para optimizar la toma de decisiones en un sistema productivo agrícola. Estos datos generan capas de información tales como, propiedades químicas de los suelos, compactación, plagas y enfermedades, humedad, conductividad eléctrica, etc., y posteriormente serán utilizadas para la adecuada interpretación de la variabilidad espacial (dentro de la parcela) y temporal (entre años) de los rendimientos.

8.2. Mapas de diagnostico

Para los mapas de diagnóstico se utilizan métodos cartográficos para representar los resultados de la evaluación de los suelos de una determinada región. Se delimita el área geográfica, además se efectúa una recopilación de toda la información existente de la zona. Intervalo de recursos (suelo, clima, topografía, vegetación y uso del suelo). Se hace un estudio, análisis e interpretación de fotografías aéreas y manejos de mapas (Martínez, 2013).

9. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

Un SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente en capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos, con el fin de satisfacer múltiples propósitos. El SIG es una tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato (J. Orellana, 2006).

Mayoritariamente las definiciones de SIG, acentúan en referirse como un sistema integrado para trabajar con información espacial, herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas vitales para el desarrollo nacional, incluyendo la relacionada con la infraestructura de un municipio, estado o incluso a nivel nacional. Aunque al leer algunas definiciones de los SIG se puede pensar que es algo muy complejo, en realidad resulta sencillo de comprender si se percibe a un SIG como un programa de cómputo, un software con funciones específicas. En este sentido, un SIG es igual que una hoja de cálculo o un procesador de textos, sólo que para el caso de los SIG se cuenta con programas y softwares de Diseño Asistido por Computadora (CAD por sus siglas en ingles) para cartografía (J. Orellana, 2006).

Bongiovanni (2006) Expresa que, para términos prácticos, la función principal de dicho software es contar con cartografía que contenga bases de datos asociadas, con la misión principal de resolver problemas espaciales o territoriales. Es decir, un programa que permita manejar conjuntamente la cartografía y las bases de datos. Dicho de esta manera, se podría pensar en un CAD que permiten asociar bases de datos a los elementos del dibujo. Pero la diferencia fundamental radica en que con un SIG es posible realizar análisis de la cartografía

para generar nueva cartografía en función de los resultados obtenidos, además de hacer consultas más completas al poder combinar criterios alfanuméricos y espaciales.

9.1. Historia y antecedentes de los SIG

A finales de los años setenta, el uso de computadoras progresó rápidamente en el manejo de información cartográfica y facilitó que se afinaran muchos de los sistemas informáticos para distintas aplicaciones cartográficas. De la misma manera, se avanzó en una serie de sectores ligados, entre ellos la topografía, la fotogrametría y la percepción remota. En un principio, este rápido ritmo de desarrollo provocó una gran duplicación de esfuerzos en las distintas disciplinas relacionadas con la cartografía, pero a medida que aumentaron los sistemas y se adquirió experiencia, surgió la posibilidad de articular los distintos tipos de elaboración automatizada de información espacial, reuniéndolos en verdaderos sistemas de información geográfica para fines generales (J. Orellana, 2006).

En los años ochenta, se vio la expansión del uso de los SIG, facilitado por la comercialización simultánea de un gran número de herramientas de dibujo y diseño asistido por ordenador (con siglas en inglés: CAD y CADD), así como la generalización del uso de microcomputadores y estaciones de trabajo en la industria, y la aparición y consolidación de las bases de datos relacionales, junto a las primeras modelizaciones de las relaciones espaciales o topología (S. Best. y M. Claret. 2006).

En el caso particular de la agricultura, la utilización de los SIG parte por un proceso de aceptación de las tecnologías de información en las prácticas convencionales, causando un impacto en la forma de cultivar. Quizás el desarrollo más influyente para apresurar

transferencia de tecnología a la agricultura ha sido el desarrollo del GPS. Incorporando el GPS en prácticas agrícolas estándares, los productores, los investigadores y los consultores han podido mejorar la precisión de las actividades de manejo agronómico existentes, poniéndolas en ejecución a escala. La agricultura de precisión y las tecnologías asociadas a la medición de la variabilidad han sido el resultado. Potencialmente, los factores determinantes del rendimiento se pueden identificar, mapear y utilizar, para proporcionar una solución (S. Best. y M. Claret. 2006).

Los años noventa, se caracterizan por la madurez en el uso de estas tecnologías en los ámbitos tradicionales mencionados y por su expansión a nuevos campos (SIG en los negocios), propiciada por la generalización en el uso de los computadores de gran potencia a precios muy accesibles, la enorme expansión de las comunicaciones y en especial de Internet, la aparición de los sistemas distribuidos (DCOM, CORBA) y la fuerte tendencia a la unificación de formatos de intercambio de datos geográficos (S. Best. y M. Claret. 2006).

El incremento de la popularidad de las tendencias de programación distribuida y la expansión y beneficios de la máquina virtual de Java, permiten la creación de nuevas formas de programación de sistemas distribuidos, de esta manera aparecen los agentes móviles que tratan de solucionar el tráfico excesivo que hoy en día se encuentra en Internet. Los agentes móviles utilizan la invocación de métodos remotos y la serialización de objetos de Java para lograr transportar la computación y los datos. Nace aquí un nuevo paradigma para el acceso a consultas y recopilación de datos en los sistemas de información geográfica, cuyos mayores beneficios se esperan obtener en los siguientes años. A la fecha, aprovechando estas tecnologías, se han desarrollado un sinnúmero de aplicaciones basadas en SIG que controlan maquinaria agrícola según agentes móviles (J. Orellana, 2006).

Para la entrada del siglo XXI, entre las herramientas de la agricultura de precisión se han incorporado otros equipamientos que se utilizan para control de las distintas actividades. Como lo son los monitores de siembra, que brindan información sobre la existencia de fallas de siembra por surco, o si un surco está sembrando a menor densidad de semillas que otro; monitores controladores de pulverización, que controlan el caudal de aplicación; monitores registradores de velocidad de cosecha, donde quedan grabados y geoposicionados los datos de velocidad de avance de la cosechadora, más el día y la hora en que se cosechó un lote; etc. Existe un gran avance en todo lo que respecta a sistemas de guía satelital, como lo son los banderilleros satelitales con señales correctoras por antenas. En el 2004 ingresaron los sistemas de guía automatizados donde el operario trabaja únicamente para girar la máquina en las cabeceras y después ésta se guía sola por medio del Piloto Automático o del Volante Automático. Ambos sistemas y el banderillero satelital trabajan partiendo de un punto de comienzo y uno de final del lote y respecto a ese trazo basa su sistema de guía (Bragachini et al, 2005).

El mapa del futuro es una imagen inteligente. A partir de 1998 se empezaron a colocar en distintas órbitas una serie de familias de satélites que traerían a los computadores personales, antes del año 2003, fotografías digitales de la superficie de la tierra con resoluciones que oscilarían entre 10 metros y 50 centímetros (Bongiovanni, 2006).

Hoy en día, contamos con herramientas como Google Earth que nos permiten acceder a imágenes satelitales de gran resolución, para conocer diversos lugares del globo. Todo esto gracias a la evolución de la tecnología satelital (Bongiovanni, 2006).

Las imágenes pancromáticas, multiespectrales, hiperespectrales, radar, infrarrojas, térmicas, crean un mundo virtual digital a nuestro alcance, el cual cambiará radicalmente la percepción que tenemos sobre nuestro planeta (J. Orellana, 2006).

9.2. Componentes de un SIG

9.2.1. Datos

Los datos son la materia prima para trabajar con los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Sin ellos, no podremos construir mapas que nos ayuden a hacer nuestros análisis y tomar las decisiones en nuestra organización. Esos datos podrán venir de diferentes fuentes: sensores remotos, GPS, fotografías aéreas, archivos formatos shapefile, archivos CAD, archivos Excel, etc (geoinnova, 2020).

Esta información geográfica será el inicio de partida para empezar a trabajar con los SIG, los cuales nos permitirán analizarla y extraer toda la información posible para plasmarla en un mapa que nos ayude a la interpretación de esa información. (geoinnova, 2020).

9.2.2. Software

Para el correcto análisis e interpretación de la información geográfica es necesaria la participación de un software SIG que tenga la potencia y funcionalidad de trabajar con información de este tipo, para ello existen bastantes softwares SIG que nos ponen a disposición herramientas para el tratamiento de la información geográfica (geoinnova, 2020).

9.2.3. Hardware

Para poder utilizar los softwares es necesario de un ordenador o hardware. Dependiendo de las características de cada máquina, obtendremos un mayor o menor rendimiento a la hora de realizar nuestros análisis (geoinnova, 2020).

9.2.4. Personal

Teniendo los datos y con que analizarlos, se necesita saber cómo. Aquí es donde entra en juego los profesionales SIG (geoinnova, 2020). Sin el personal experto en su desarrollo, la información se desactualiza y se maneja erróneamente, el hardware y el software no se manipula en todo su potencial (J. Orellana, 2006).

9.2.5. Métodos

Para que un SIG tenga una implementación exitosa debe basarse en un buen diseño y reglas de actividad definidas, que son los modelos y prácticas operativas exclusivas en cada organización (geoinnova, 2020).

9.3. Funciones de los SIG

Los programas SIG tienen una serie de funciones diseñadas para la gestión de información geográfica:

→ Captura, registro y almacenamiento de datos: el paso de información analógica, en papel, a formato digital de una computadora se puede realizar de varias maneras como digitalización, vectorización, importación y otras (Montovani, 2006).

- Estructuración de datos y manipulación: creación de bases de datos, de nueva cartografía (Montovani, 2006).
- Proceso, análisis y gestión de datos: topología, consultas gráficas, alfanuméricas, combinadas, superposición de planos e información (Montovani, 2006).
- Creación de salidas: impresión de informes, graficación de planos y publicación en diversos formatos electrónicos (Montovani, 2006).

De acuerdo con Bongiovanni en 2006, un SIG responde a las siguientes preguntas.

- i. Localización ¿Qué hay en...?
- ii. Condición ¿Dónde sucede que...?
- iii. Tendencias ¿Qué ha cambiado...?
- iv. Rutas ¿Cuál es el camino óptimo...?
- v. Pautas ¿Qué pautas existen...?
- vi. Modelos ¿Qué ocurriría si...?

Estas cuestiones son de interés primordial en actividades relacionadas con la planificación. Para instituciones de investigación, los SIG contribuyen en el estudio de la distribución y monitoreo de recursos, tanto naturales, como humanos, tecnológicos, de infraestructura y sociales, así como en la evaluación del impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente. De esta forma se contribuye, por ejemplo, en la planeación de actividades destinadas a la preservación de los recursos naturales (Bongiovanni, 2006).

10. AGRICULTURA DE PRECISION MODERNA

La Agricultura de Precisión es un concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas, basado en la existencia de variabilidad en campo, la cual requiere de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), Sensores, Satélites e Imágenes aéreas junto con Sistemas de Información Geográfico (SIG) para estimar, evaluar y entender dichas variaciones. La información recolectada puede ser usada para evaluar con mayor precisión la producción final de los cultivos. Por lo tanto, más que hablar de un concepto nuevo y revolucionario, se hablará de los Vehículos Autónomos en Agricultura de Precisión, como una serie de elementos y sistemas que permiten mejorar, facilitar y automatizar todas aquellas operaciones que se vienen practicando de forma habitual desde hace décadas (Morote, 2010).

Es bien sabido que a lo largo de la historia se han producido cambios que han supuesto una revolución y una transformación en el sector agrícola, como el uso de los animales para las labores de campo, la posterior mecanización tras el descubrimiento de la máquina de vapor y el desarrollo de la química y la biotecnología. Todo ello ha permitido mejorar especies y hacerlas inmunes a plagas y aumentar el rendimiento. Actualmente, estamos ante una nueva revolución; “La transformación digital en la agricultura”. El uso de sensores y la conexión de diferentes técnicas que facilitan datos, resulta clave en este nuevo panorama. De este modo, las máquinas agrícolas son cada vez más inteligentes y se adaptan a las condiciones del cultivo y del entorno, así como a los requisitos de producción del agricultor. Muestra de ello es la incorporación de dichos sensores que evalúan la masa foliar del cultivo para ajustar el tratamiento fitosanitario a aplicar y que a su vez permite optimizar los insumos, así mismo medir la carga de fruto y su madurez para planificar y aprovechar la cosecha. Para ello, es importante el uso de estas nuevas tecnologías, como lo son; la incorporación de

vehículos terrestres autónomos (robots), guiados (tractores) o vehículos aéreos (drones). (Díaz, 2018).

10.1. Vehículos autónomos

De acuerdo con (García, 2018), define a los vehículos autónomos como “aquellos vehículos capaces de realizar todas las tareas necesarias para moverse de un punto a otro sin la necesidad de la intervención humana.”

Por otro lado, (Vilaboa, 2018). Nos dice que los drones aplicados a la agricultura *“Son naves no tripuladas que se manejan a control remoto con la capacidad de recorrer amplias extensiones en poco tiempo para aplicación de agroquímicos de forma muy localizada, pero lo más interesante es que con una cámara multiespectral, con RGB y sensores térmicos se pueden tomar imágenes determinando zonas de baja población del cultivo”*. Así mismo, también hace mención de que existen diversas compañías con tecnologías basadas en GPS adaptadas a un tractor convencional el cual se puede manejar desde una tablet con acceso a WiFi enviando información a través de sensores láser y cámaras digitales, operando el vehículo a distancia.

10.2. Vehículos Autónomos Aéreos

10.2.1. Drones

Un drone es un dispositivo de pequeñas dimensiones (Figura 12), controlado electrónicamente que se lanzan desde el lado de un campo o zona de interés para el usuario. Su tamaño suele afectar al volumen de la carga útil, respectivamente. Dichas aeronaves son

guiadas por un radio controlador o en el mejor de los casos, por un ordenador, generalmente también son compatibles con las aplicaciones de Android o Apple Smartphone que se encargan de controlarlos. Este tipo de aeronaves, cuentan con cámaras capaces de tomar fotos, las cuales pueden ser bidimensionales, con cada píxel vinculado a una ubicación GPS en el suelo. De esta manera, también pueden transmitir videos en vivo desde el vuelo a la estación receptora en tierra. Dependiendo del tipo de cámara empleada, se pueden obtener un sinnúmero de imágenes para cada uso específico (Martínez, 2020).



Figura 12: Drone de ala rotatoria con control remoto y smartphone

Fuente: www.holystone.com

10.2.2. Tipos de Drones

De acuerdo con el sitio web R.C. TECNIC en 2017, menciona que existen distintos tipos para referirse a ellos:

- i. UAV (Unmanned Aerial Vehicle o “vehículo aéreo no tripulado”). Con estas siglas hacemos referencia a cualquier dispositivo que pueda volar sin tripulación, lo que incluye cualquier juguete radiocontrol.

- ii. UAS (Unmanned Aerial System). Es el conjunto de componentes en sí, más allá del dispositivo de vuelo.
- iii. Drone. Sinónimo parcial de UAS. Un dron es un sistema aéreo no tripulado que se usa para una función concreta. Por ejemplo, un UAS se convierte en dron cuando se le añade una cámara que sirva para vigilar.
- iv. RPA (Remotely Piloted Aircraft). Una forma más concreta y detallada de llamar a las UAVs. Simplemente hacen referencia a que el avión o sistema de vuelo es controlado de manera remota por una persona física. Al igual que las UAVs, los sistemas complejos (aparatos en sí y sistemas de control) tienen una nomenclatura específica, conocidos como RPAS.
- v. Multicópteros. Son aeronaves con múltiples rotores capaces de despegar de forma vertical. Hay varios tipos en función de los rotores con los que cuentan: cuadricóptero, hexacóptero, octocóptero o el cuadricóptero coaxial.

Cabe destacar que el tipo UAV y RPA incluyen todos aquellos aparatos que vuelan por control remoto (incluido juguetes radiocontrol) y que los UAS y RPAS son sistemas más complejos. Así mismo, es importante mencionar que para esta investigación nos centraremos en tres tipos, los cuales se caracterizan por ser los más representativos y ser la base de todo lo que conocemos en la actualidad, como se resume a continuación:

- i. Ala fija
- ii. Ala Rotatoria
- iii. Híbrido

De acuerdo con aerial insights en 2020, los drones de ala fija (Figura 13) poseen un perfil alar que permite que la aeronave pueda moverse a través del aire y sea capaz de generar fuerzas sustentadoras para mantenerse en el aire. Este tipo de drones tienen una estética muy similar a los aeromodelos de radiocontrol.



Figura 13: Drone ala fija

Fuente: <https://elvuelodeldrone.com/drones-profesionales/drones-industriales/drone-de-ala-fija-delair-ux11/>

Por otro lado, los conocidos multirrotores (drones de ala rotatoria) (Figura 14), son los tipos de dron más extendidos y más utilizados por los profesionales del sector. Según el número rotores con los que cuente el drone, es como se le denominará: tricóptero (3 motores), cuadricóptero (4 motores), Hexacóptero (6 motores) y Octocóptero (8 motores).

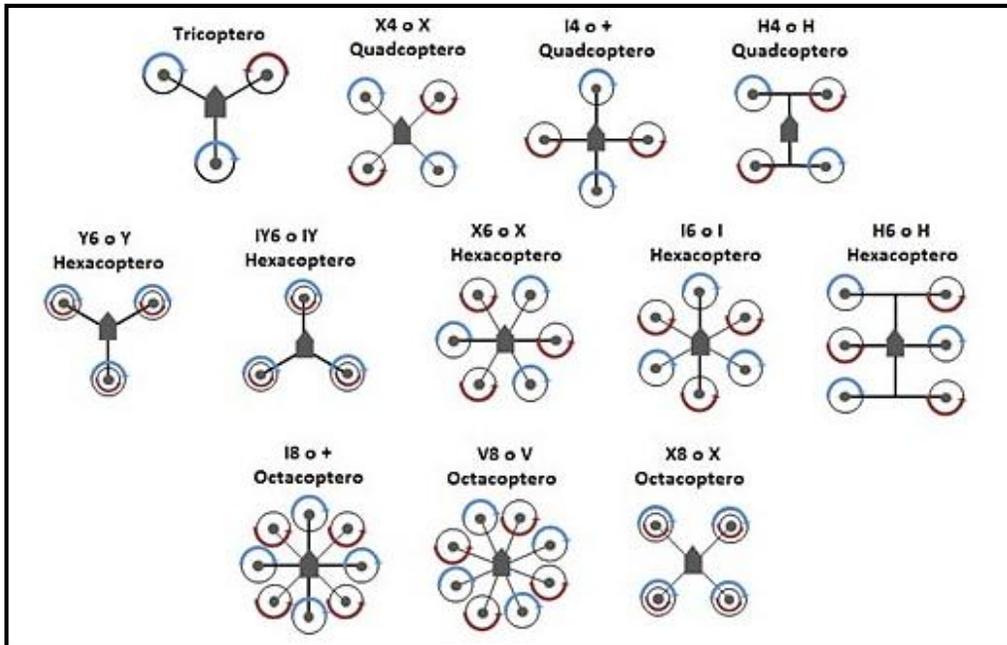


Figura 14: Tipo de Drone de ala rotatoria

Fuente: https://www.rctecnic.com/blog/107_que-es-un-drone--tipos-nombres-y-componentes.html

Finalmente, los drones híbridos (Figura 15), surgen debido a la necesidad de aumentar la duración de vuelo, y conseguir despegar o aterrizar de manera vertical como los drones de ala rotatoria, esto es debido a que utilizan motores a reacción giratorios, estos motores al comienzo del despegue se colocan en posición vertical y después de manera lenta y simultanea van rotando hasta situarse horizontalmente y adquirir la velocidad necesaria para volar como los drones de ala fija.



Figura 15: Drone hibrido

Fuente: <https://www.solodrone.top/hibridos/>

10.2.3. Características

La principal característica para los drones de ala fija, es la gran autonomía que nos ofrecen ya que pueden estar volando varias horas gracias a su eficiencia aerodinámica. Estos son ideales para mapear grandes superficies ya que con una única batería se cubren grandes extensiones de terreno. Por este motivo son drones muy utilizados en trabajos de agricultura de precisión y de fotogrametría (Martínez, 2020).

Para el caso de los drones de ala rotatoria la característica principal, se basa en su versatilidad ya que de forma sencilla se le pueden instalar diferentes tipos de cámaras (cámaras RGB, multiespectrales, termográficas) que permiten realizar un gran abanico de trabajos. Además, con este tipo de drones es posible realizar vuelos estacionarios, lo que facilita llevar a cabo ciertas actividades que con un dron de ala fija sería imposible realizar como, por ejemplo, trabajos de inspección (Martínez, 2020).

Por otra parte, tenemos a los drones híbridos los cuales poseen características únicas ya que un dron híbrido posee despegues y aterrizajes verticales. Además, su tiempo activo de vuelo puede llegar a ser hasta de 4 horas, teniendo también capacidad para levantar objetos grandes, en comparación de los tipos de dron, mencionados anteriormente (Martínez, 2020).

De manera general, en la mayoría de los drones su diseño se rige bajo un mismo principio, y es por esta razón que todos están constituidos por componentes mecánicos y eléctricos, así mismo también son capaces de desplegar ciertos tipos de movimientos (Martínez, 2020).

10.2.4. Componentes mecánicos

- i. Estructura. Parte donde se montan y se apoya el resto de los componentes. Su función principal es reducir al máximo las vibraciones producidas por los motores al hacer girar las hélices (R.C. TENIC, 2020).
- ii. Hélices. El número de hélices dependerá del número de rotores que tenga el dron. Su función es la de impulsar los motores y estabilizar el aparato en el aire (R.C. TENIC, 2020)
- iii. Motores. Van conectados a las hélices y se encuentran justo debajo de éstas, en la parte exterior de la estructura (R.C. TENIC, 2020).

10.2.5. Componentes eléctricos

- i. Control electrónico de velocidad. Controla la velocidad y la dirección del dron.
- ii. Batería. Alimenta a todos los componentes eléctricos (R.C. TENIC, 2020).
- iii. Control remoto. Es el dispositivo que controla el dron y que nos permitirá manejarlo desde donde estemos (R.C. TENIC, 2020).
- iv. Placa controladora. Su función es conseguir la estabilidad en el vuelo transmitiendo información al Control Electrónico de Velocidad (R.C. TENIC, 2020).

Los principales movimientos que puede hacer un dron de acuerdo con el sitio web R.C. TENIC en 2020 son:

- i. Guiñada. Hacia la derecha o izquierda del eje vertical.
- ii. Inclinación. Hacia la derecha o izquierda del eje longitudinal.
- iii. Cabeceo. Rotación hacia delante o hacia atrás con respecto al eje transversal.
- iv. Altitud. Elevación en vertical.

10.2.6. Rendimiento

En cuanto a rendimiento se refiere, considero que este apartado suele ser un poco debatido, puesto que los tres tipos de drones cubren necesidades diferentes y cada uno es eficiente dentro de sus actividades específicas, como se mencionó con anterioridad. Por lo tanto, más que hablar de características a la hora de analizar este apartado, nos enfocaremos en factores externos e internos que involucran de forma directa y general, a los modelos de los que se ha venido hablando. En el cuadro 2 se realiza una comparación de los diferentes drones y su rendimiento (Martínez, 2020).

Cuadro 2: Comparación de rendimientos según el tipo de Drone

	Ala Rotatoria	Ala fija	Hibrido
Duración de Vuelo	Vuela hasta 20 minutos.	Vuela hasta una hora.	Capacidad para volar durante 4 horas.
Presión del Viento	Se puede volar con vientos de ráfagas de 20 a 50 millas por hora.	Vuela dentro y fuera del viento, en lugar de a través del viento, para obtener imágenes satisfactorias.	Comportamiento similar a un dron de ala fija.
Flexibilidad en el cambio de dirección	Permite una nueva dirección durante el vuelo para la reorientación.	Permitir la carga de la nueva dirección durante el vuelo para la redirección.	Comportamiento similar a un dron de ala fija.
Rango de precios	De 500 a 100,000 dólares.	De 500 a 100,000 dólares.	De 500 a 120,000 dólares.
Opción desplegable	Altamente desplegable.	Altamente desplegable.	Altamente desplegable.

Fuente: Martínez E. (2020). "Vehículos Autónomos en Agricultura de Precisión"

10.2.7. Diferencias y Usos

Martínez (2020) nos dice que al momento de elegir un dron, lo primero que se debe tener en cuenta, es el uso que se le dará. Puesto que cada modelo tiene diferentes ventajas y desventajas, haciéndolos ideales para distintos tipos de trabajo. Dicho esto, nos adentraremos en sus diferencias y usos. (Cuadro 3).

Cuadro 3: Diferencias y usos del tipo de drones

	Ala Fija	Ala Rotatoria	Hibrido
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> → Amplio rango de vuelo. → Gran estabilidad. → Recuperación segura en caso de pérdida de potencia en el motor. → Ventajas de vuelo lineal. 	<ul style="list-style-type: none"> → Mejor maniobrabilidad. → Precios bajos. → Compacto. → Fácil de usar. → Mayor capacidad de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> → Gran autonomía. → Alcanzan velocidades de 100 km/h, mayor que otros modelos. → Soportan vientos de hasta 40 km/h. → Despegue y aterrizaje de forma vertical.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> → Aterrizaje y despegue en zonas amplias. → Son más costosos. → Difíciles de volar. → Menos compacto. → Menos eficientes para mapeo. 	<ul style="list-style-type: none"> → Rangos cortos de vuelo. → Dependiente de las condiciones climáticas. 	<ul style="list-style-type: none"> → Tecnología que aún es prematura. → Implica altos costos.
Uso	<ul style="list-style-type: none"> → Para mapeo → Agricultura e inspecciones de plantas. 	<ul style="list-style-type: none"> → Generación de Mapas. → Otros usos en fotogrametría aérea. 	<ul style="list-style-type: none"> → Envío de correos y mercancía. → Drones Salvavidas.

Fuente: Martínez E. (2020). "Vehículos Autónomos en Agricultura de Precisión"

10.3. Vehículos semiautomáticos

Generalmente cuando hablamos de vehículos autónomos terrestres, lo primero que se nos viene a la mente, sin duda, son las tecnologías de autoguiado aplicadas a vehículos convencionales en la agricultura, tales como los tractores. Sin embargo, es importante, desmentir este tipo de creencia, y la razón principal es porque si bien, este tipo de herramientas aplicadas a un tractor no nos dan como resultado un vehículo cien por ciento autónomo, puesto que, si recordamos la definición de vehículos autónomos son “*vehículos no tripulados, capaces de realizar todas las tareas necesarias para moverse de un punto a otro sin la necesidad de la intervención humana.*” (García, 2018). En otras palabras, que el vehículo realice funciones específicas, de forma autónoma sin que el ser humano intervenga directamente, como tripularlo o conducirlo. En la figura 16 se ven los principales componentes para un sistema de autoguiado con motor eléctrico al volante y en la figura 17 como quedan después de su instalación en el tractor.

García (2018) menciona que más que clasificar a los tractores autoguiados como vehículos autónomos, son herramientas las cuales, aplicadas a un vehículo, nos ofrecen un proceso semiautomático capaz de realizar funciones como facilitar la conducción del tractor, cosechadora o equipo autopropulsado en la parcela, reduciendo los solapamientos que se producen al realizar las diferentes labores agrícolas. (Figura 18).



Figura 16: Componentes de un autoguiado

Fuente: <https://maquinac.com/2019/05/campo-preciso-financia-hasta-15-anos-sus-equipos-de-agricultura-de-precision/>



Figura 17: Autoguiado montado en la cabina de un tractor

Fuente: <https://maquinac.com/2019/05/campo-preciso-financia-hasta-15-anos-sus-equipos-de-agricultura-de-precision/>

10.3.1. Funciones

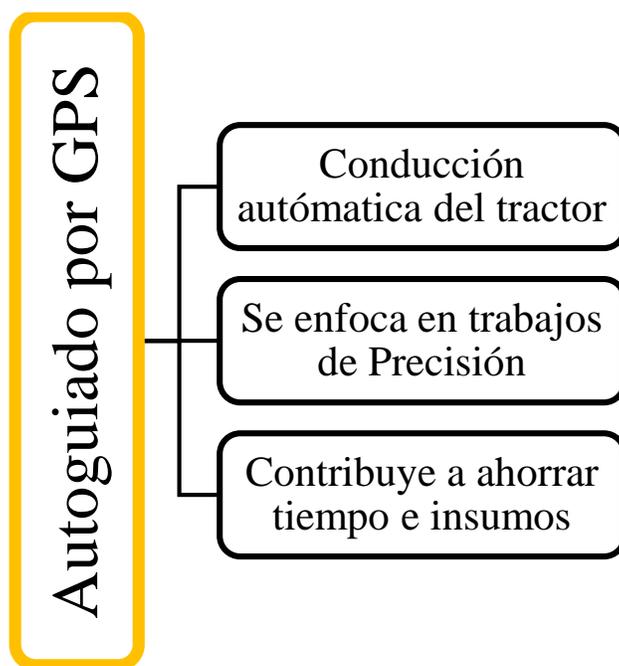


Figura 18: Funciones de un autoguiado

Fuente: Martínez E. (2020). "Vehículos Autónomos en Agricultura de Precisión".

10.3.2. Beneficios

Según el sitio web Laser y GPS 2020, las principales ventajas que menciona que aporta el GPS autoguiado para tractor destacan las siguientes:

- i. Proporciona una precisión mayor
- ii. Mantiene una precisión constante, el cansancio del tractorista tras varias horas de trabajo provoca fallos de precisión cuando se usa el sistema manual.
- iii. Es un sistema polivalente que permite realizar varias tareas: Tratamientos fitosanitarios y abonados, cosecha, siembras, plantaciones en hilera, se puede utilizar de noche.

10.3.3. Modelos actuales en el mercado

Actualmente, las grandes corporaciones de maquinaria y de agricultura de precisión ya cuentan en sus catálogos con este tipo de herramientas. A continuación, tenemos una comparación de los modelos más conocidos en el mercado (Cuadro 4).

Cuadro 4: Comparación de autoguiados

Marca	Beneficios	Precio
John Deere	<ul style="list-style-type: none">→ Puede usarse en modo autoguiado o manual.→ En función del sistema de corrección tiene una precisión de entre 1.5 a 30 cm.→ Es estable, ya que detecta y corrige el cabeceo o la inclinación.	20,070 USD
Trimble	<ul style="list-style-type: none">→ Puede usarse en modo autoguiado o manual.→ Dependiendo del modelo su precisión oscila entre 2.5 con RTK hasta 30 cm.	19,844 USD
Topcon	<ul style="list-style-type: none">→ Puede usarse en modo autoguiado o manual.→ Su precisión oscila entre 1.5 y 30 cm en función del sistema de corrección.	13,465 USD
Cerea	<ul style="list-style-type: none">→ Puede usarse como guiado visual y autoguiado.→ Montaje sencillo.→ Muy económico comparado con otros GPS de características similares.→ Varios patrones de guiado (recto paralelo, curvo paralelo, de dos direcciones paralelo y de pivot paralelo).→ Autorotación en cabeceras.→ Compensación de inclinación.→ Registro de contorno con medición de parcela y estimación de tiempos.→ Creación de mapas para Google Earth.→ Vista en 3D y 2D del guiado.	3,533 USD

Fuente: Rivera J. Pablo (2021) Cotizaciones en las diferentes empresas

10.4. Tractores Autónomos

Hoy en día, el uso de vehículos autónomos en la producción agropecuaria es un proceso que, a nivel mundial, no ha pasado aún de la etapa de investigación y desarrollo. Sin embargo, ya existen indicios por parte de las grandes corporaciones de maquinaria agrícola, ya que en los últimos años han estado trabajando de forma constante en la carrera por ser el mejor dentro de la revolución digital en la agricultura. Prueba de ello, son los prototipos de tractores autónomos de las marcas Case IH, John Deere y Kubota. Los cuales aún no están disponibles en el mercado, siendo solo prototipos a futuro, sin embargo, parecen ser bastante prometedores (Martinez, 2020).

A continuación, se muestra en qué consisten y las mejoras que ofrecen a futuro estos vehículos:

10.4.1. Case IH: Magnum

La compañía Case IH es especialista en la fabricación de equipos para granjas y agricultura. Fue en la feria Farm Progress Show de 2016 en Boone, Iowa (EE.UU.) cuando presentó el Autonomous Concept Vehicle (ACV), un intimidante tractor robótico (Figura 19) que se opera a distancia por medio de una tableta. Funciona gracias a un GPS por satélite para lograr una total precisión a la hora de guiar el vehículo y realizar la transmisión de datos (Pérez, 2016).



Figura 17: Tractor autónomo Magnum de CASE IH

Fuente: <https://agrodrones.wordpress.com/2017/08/07/el-increible-tractor-autonomo-case-ih/>

Una de sus características es la eliminación de la cabina para el conductor, no es necesaria gracias a un completo sistema autónomo que se basa en cámaras, radares, GPS y sensores que detectan obstáculos y hacen que cambie de rumbo para evitar impactos. El agricultor lo programa con una aplicación en su tableta y puede hacerlo trabajar de manera simultánea con otros tractores. Tiene un motor de 419 HP, es capaz de alcanzar una velocidad máxima de 50 km/h y puede trabajar las 24hrs del día (Pérez, 2016).

Para que funcione de forma autónoma se ha desarrollado una interfaz 100% interactiva que lo controla. Funciona gracias a la introducción de mapas en el sistema, con los límites del campo y además incluye un software de planificación de trayectos. Es posible monitorizar y controlar el vehículo y sus aperos con un ordenador o tableta, gracias a un programa que muestra tres pantallas: una con el trazado de los trayectos muestra el progreso del tractor, otra muestra las imágenes en directo de la cámaras, que proporcionan al usuario hasta cuatro visualizaciones en tiempo real (dos de la parte delantera y dos de la trasera), y

la tercera pantalla permite monitorizar y modificar parámetros clave del vehículo como la velocidad, los niveles de combustible y los ajustes de apero (Pérez, 2016).

Además, su interfaz está preparada para ajustar el trabajo a las previsiones meteorológicas. En caso de que esté pronosticado, por ejemplo, una gran tormenta, el tractor dejará para más tarde sus tareas. En un futuro, estos conceptos de tractores podrán utilizar datos como la información meteorológica por satélite en tiempo real, con independencia del factor humano y la hora del día (Pérez, 2016).

10.4.2. Kubota: X Tractor

X Tractor (Figura 20), presentado en Kioto, Japón, en el 2020, por parte de la multinacional Kubota Corporación, especializada en la fabricación de este tipo de vehículos. Equipado con inteligencia artificial (IA) y un motor 100% eléctrico, es completamente autónomo y representa el futuro de la agricultura según Kubota, que pasa por la escasez de mano de obra y la baja eficiencia operativa. Se hace mención de la importancia de propuesta, basándose en algunas claves (Pareja, 2020).



Figura 18: Tractor autónomo X Tractor de Kubota

Fuente: <https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/a30712146/tractor-autonomo-kubota/>

Conducción autónoma y conectividad: Este prototipo es capaz de analizar diversos datos, como los referentes a la meteorología, tasas de crecimiento de los cultivos, etc. De esta forma, su Inteligencia artificial selecciona el funcionamiento adecuado y realiza las tareas necesarias en el momento idóneo. Además, los datos ambientales obtenidos por los tractores en funcionamiento se pueden compartir automáticamente con otras máquinas para realizar un funcionamiento eficiente gestionado de forma centralizada (Pareja, 2020).

Electrificación: Al ser 100% eléctrico, el tractor es más respetuosa con el medio ambiente. Su funcionamiento se basa en baterías de iones de litio que se recargan mediante energía solar (Pareja, 2020).

Versatilidad: Gracias a su sistema de tracción mediante cadenas, se logra una excelente adherencia en situaciones de agarre complicados como terrenos húmedos o arrozales. Este sistema aporta motricidad a las cuatro ruedas y cambia su forma para mantener la altura del tractor en el nivel óptimo en función de las necesidades concretas. Por ejemplo, para los procesos que necesitan más capacidad de tracción, el área de contacto con el suelo aumenta al bajar la altura del vehículo con el fin de reducir su centro de gravedad. Por otro lado, cuando se opera por encima de los cultivos para su gestión, la distancia del suelo se ajustará incrementándose la altura de la carrocería (Pareja, 2020).

Los motores situados en las ruedas permiten cambiar de forma arbitraria la velocidad de rotación de los cuatro rastreadores (delantero, trasero, derecho e izquierdo) para lograr un pequeño radio de giro y un funcionamiento totalmente autónomo en varios tipos de tierra (Pareja, 2020).

10.4.3. John Deere

Se trata de un tractor alimentado por cable de hasta 405 CV. Fue iniciado por parte del proyecto de investigación GridCON y el tractor forman parte del esfuerzo de la compañía hacia una maquinaria agrícola eléctrica, sobre todo en su empeño para abastecer de forma autónoma a los cultivos de la energía que ellos producen (Jiménez, 2020).

Posteriormente, con el paso de los meses, el proyecto fue evolucionando en otro tipo de fisionomía, especialmente para evitar que tuviese cabina y que las filas de batería se amoldasen mejor a lo que las condiciones de este tractor exigían. Y se consiguió conformar el primer tractor eléctrico en su totalidad y que es totalmente autónomo (Figura 21). Un auténtico logro histórico que quedará grabado en los anales del presente y futuro agrícola (Jiménez, 2020).

La velocidad normal de este tractor es de 20 kilómetros por hora y una potencia nominal de 500 kW (aproximadamente 670 HP). Una de las funcionalidades que tiene es poder guiarse manualmente desde el borde del campo que está cultivando con control remoto (Jiménez, 2020).



Figura 19: Tractor autónomo de la marca John Deere
Fuente: <https://www.deere.es/es/agricultura/el-futuro-de-la-agricultura/>

10.5. Vehículos Autónomos en la Agricultura

Según el sitio web Revista de Robot (2020), la robótica agrícola se define como la implantación de dispositivos robotizados orientados a realizar tareas relacionadas con la agricultura. Hasta hace un cuarto de siglo, los únicos robots que se utilizaban en este sector eran durante el proceso de manufactura y producción de los productos alimenticios. El desarrollo de los dispositivos robotizados destinados a la agricultura y la ganadería hace que estos robots sean, según la Federación Internacional de Robots (IFR), los segundos más vendidos, únicamente por detrás de los robots destinados a la seguridad y defensa. Por otro lado, este tipo de robots terrestres son principalmente, dispositivos robotizados que se emplean en el campo, ya sean de interior o de exterior. Son identificados por las siglas UGV, de vehículos Terrestres Autónomos.

Actualmente, existen numerosos casos de empresas que han desarrollado soluciones que han tenido una gran acogida por el sector agrícola. A continuación, se mencionarán algunos ejemplos de estos vehículos.

10.5.1. Antecedentes de Uso

i. Agrobot de la empresa Soluciones Robóticas Agrícolas (Figura 22)

Este producto ha obtenido gran éxito en el mercado chino y estadounidense, en donde al parecer encontraban dificultades para encontrar operarios que trabajasen recogiendo fresas. Agrobot es un dispositivo robotizado completamente autónomo, tanto en su desplazamiento como en el proceso de recolección (Figura 23) . Por medio de un interfaz con Inteligencia Artificial, es capaz de identificar y seleccionar qué fresas se encuentran lo

suficientemente maduras como para que sean recolectadas. Una vez que comprueba que su estado es el óptimo, unos de los 24 brazos robotizados que posee corta la fresa y la deposita en una caja.



Figura 20: Agrobot

Fuente: Empresa Soluciones Robóticas Agrícolas



Figura 21: Braco robótico de Agrobot

Fuente: Empresa Soluciones Robóticas Agrícolas

ii. **Kiwifruit Picker** de la empresa Robotic Plus (Figura 24 y 25)

Otro proyecto similar al anterior, es el desarrollado por una compañía de Nueva Zelanda llamada Robotic Plus, la cual ha encontrado una solución para la recolecta de Kiwis.



Figura 22: Kiwifruit Picker
Fuente: Empresa Robotic Plus



Figura 23: Kiwifruit Picker recolectando kiwis
Fuente: Empresa Robotic Plus

iii. **Blue River Technology** (Figura 26).

Un novedoso proyecto que promete reducir los costes económicos y la repercusión ambiental es el patentado por la empresa Blue River Technology. En sus instalaciones han desarrollado una máquina con un software basado en IA y Visión Artificial capaz de reconocer el tipo de planta que hay en el terreno. En caso de ser una mala hierba, individualiza el tipo de herbicida y la cantidad que requiere para eliminarla. (Figura 27)



Figura 24: Proyecto presentado por Blue River Technology

Fuente: Empresa Blue River Technology



Figura 25: Aplicación de químicos sobre maleza

Fuente: Empresa Blue River Technology

iv. **Abundant Robotics** (Figura 28)

Otro proyecto exitoso es el de Abundant Robotics, que ha sacado al mercado un dispositivo robotizado que recolecta manzanas de forma autónoma.



*Figura 26: Recolector de manzanas de Abundant Robotics
Fuente: Empresa Abundant Robotics*

v. **Vinerobot** por la Universidad de la Rioja y Valencia (Figura 29)

Es un proyecto europeo en el que han participado la Universidad de la Rioja y de Valencia. Han creado un robot autónomo que por medio de Visión Artificial es capaz de controlar los viñedos, además de seleccionar las uvas que se encuentran en perfecto estado. Una de sus ventajas es que analiza el porcentaje nitrógeno a nivel foliar, con el que hace una estimación del momento exacto en el que hay que vendimiar.



*Figura 27: Vinerobot realizando recorrido
Fuente: Universidad de la Rioja y Valencia*

vi. **HA – 100** de Harvest Automation (Figura 30 y 31)

Se trata de un robot colaborativo que es capaz de trabajar en equipo y que está creado para mover material de forma autónoma en espacios interiores y exteriores. Sus eficientes características le convierten en una perfecta solución para abaratar costes de producción reduciendo drásticamente la mano de obra empleada.



*Figura 29: HA-100 robot colaborativo
Fuente: Empresa Harvest Automation*



*Figura 28: HA-100 robot trabajando
Fuente: Empresa Harvest Automation*

vii. **Vinbot** (Figura 32)

Dentro del sector vitícola tenemos otro robot llamado Vinbot diseñado por una empresa catalana que destaca por sus innovadoras prestaciones. Se trata de un pequeño robot autónomo con características de un todo terreno que principalmente se encarga de controlar el rendimiento de los viñedos. Lo hace por medio de sensores y capturas de imágenes que por medio de una interfaz en 3D, analiza el estado de la viña.



Figura 30: Vinbot

Fuente: Empresa Catalana

10.5.2 Características y tecnología usada

Tipos de visión por computador

Una de sus principales características de estos robots es que emplean tecnología de visión en 2D y 3D, tanto de espectro visible como otros espectros. El software le permite distinguir correctamente el entorno y con la información que recoge, la procesa para desplazarse por un sendero o para distinguir la maleza que hay alrededor de un fruto. Sin embargo, la principal finalidad de la Visión en 2D y 3D es la de realizar mediciones por medio de capturas. Esta información se emplea para analizar y detectar el estado del fruto, ya sean las necesidades hídricas, la presencia de bacterias e insectos, o de los nutrientes que carece (Revista de Robot, 2020).

Tipos de navegación de los vehículos recolectores

Estos robots se caracterizan por ser autónomos en sus movimientos, ya sea para trabajar en el invernadero o en un entorno rural. Ambos llevan incorporados sensores de última generación, pero los robots que están destinados a trabajar en el campo, requieren de un sistema de navegación por satélite, es decir, por medio de coordenadas GPS, el sistema IMU o por telemetría. Muy distinta es la tecnología de los robots que trabajan en invernaderos, debido a que se pueden desplazar de forma autónoma por medio de railes o por pasillos que disponen de marcas o balizas, ya sean ópticas, RFID (Revista de Robot, 2020).

Manipulación de la fruta

Un reto que aún queda por mejorar es que los robots sean capaces de reconocer un fruto, analizar su estado y recolectarlo, a la vez que se desplazan a cierta velocidad. En la última década se han logrado avances espectaculares, principalmente en el campo de la Inteligencia Artificial y en la Visión Artificial. Esto ha aportado agilidad a los nuevos sistemas lo que ha permitido que diversas empresas hayan encontrado una innovadora solución al problema. En este apartado debemos de incluir las mejoras que se han producido en el agarre y recolección del fruto. Para ello instalan garras deformables fabricadas con materiales no rígidos. Estas garras permiten que la fruta no se deforme y pueda ser recogida desde distintos ángulos (Revista de Robot, 2020).

Motricidad

Estas nuevas máquinas agrícolas que trabajan en el exterior se encuentran expuestas a condiciones climatológicas que hace que el suelo del terreno se transforme rápidamente de tierra seca a un barrizal. Por ello, estos dispositivos requieren de unas características similares a la de los tractores tradicionales. Un reto para la ingeniería es diseñar dispositivos que sean de menor tamaño, que les permita desplazarse por cualquier tipo de entorno, terreno y desnivel (Revista de Robot, 2020).

Seguridad dentro del área de trabajo

Los robots agrícolas se caracterizan por ser autónomos y un aspecto relevante es que sean colaborativos, es decir, que sean capaces de detectar y salvar obstáculos, a la vez que puedan trabajar junto a personas y animales. Para lograrlo emplean tecnología idéntica a la que se utiliza en los robots industriales, con sensores de fuerza, visión y distancia de los objetos (Revista de Robot, 2020).

10.5.2. Ventajas y desventajas

Cuadro 5: Ventajas y desventajas de los vehículos autónomos terrestres

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">→ Producciones más eficientes→ Reducen costes de producción→ Reducen tiempos de cosecha→ Buen impacto ambiental→ Menor consumo de insumos y recursos	<ul style="list-style-type: none">→ Requiere de grandes inversiones→ Falta de infraestructuras tecnológicas→ Pueden dejar obsoleta la mano en la agricultura

Fuente: Martínez E. (2020). “Vehículos Autónomos en Agricultura de Precisión”

11. CONCLUSION

La necesidad básica de todo ser vivo es el alimento, y es esta la que obliga al ser humano como el mayor ser inteligente sobre la tierra a desarrollar habilidades y herramientas que lo provean de comida.

El siglo XXI es la explosión de todas las tecnologías estudiadas e investigadas en el pasado, se vive un presente donde el uso de la automatización y la industria 4.0 ya se está usando y por supuesto en la agricultura estos sistemas no podían quedar fuera. Es cierto que falta mucho terreno a donde expandirse, el principal problema que se ve y aunque no se muestre y mencione en esta monografía, es la economía. Las nuevas tecnologías requieren inversiones de dinero enormes y por ello es difícil de implementarlas en cualquier rama de estudio, la economía siempre jugara un papel importante en toda investigación.

La Agricultura de Precisión es en estos momentos la cúspide en la Ingeniería Agrícola, pero no significa que será lo mejor, se prevén nuevos y amenazantes proyectos en el mundo como la inteligencia artificial, es claro que la robótica y la electrónica aún están en desarrollo e introducción al campo de trabajo, pero la humanidad es voraz al hablar de crear nuevas metas para sustentar las necesidades del día.

En fin, la agricultura crecerá tanto como el ser humano se desarrolle, se están dando pasos gigantescos a un ritmo impresionante, pero con una expansión e introducción lenta. Tal vez solo hace falta perfeccionar las técnicas, o quizás la misma necesidad de supervivencia como a lo largo de la historia nos obligue a poner en marcha todo esto sin importar el costo.

12. BIBLIOGRAFIA

- Abdullahi, Halimatu & Sheriff, R., & Mahieddine, F., (2015). *Technology Impact on Agricultural Productivity: A Review of Precision Agriculture Using Unmanned Aerial Vehicles*. 154. pp 388-400. 10.1007/978-3-319-25479-1_29.
- Adrián, Yirda (2019). *Definición de Agricultura*. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/agricultura/>. Consultado el 24 de marzo del 2020.
- Aerial Insights (2021). *¿Cuántos Tipos Drones Existen En El Mercado?*, 25 Mayo de 2021. Sitio web: <https://www.aerial-insights.co/blog/tipos-de-drones>
- Agricoladofra (2021), *¿Cómo Ha Ido Evolucionando La Agricultura?* 01 junio de 2021. Sitio web: <https://agricoladofra.com/es/como-ha-ido-evolucionando-la-agricultura/>
- Agrobit (2020). *Componentes de Agricultura de Precision, Monitoreo de Rendimiento*. sitio web:http://www.agrobit.com/Documentos/D_Agricult/D_804_componentes%20de%20agric.htm
- Amuchastegui, J. (1999). *Interpretación de mapas de rendimiento*. TECNOCAMPO, Servicios agropecuarios.
- Bongiovanni. R., E. Mantovani., S. Best y A. Roel. (2006), *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable*. Programa cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del cono sur.
- Calvo, A. (2018). *Autoguiado para tractores: marcas, modelos y diferencias*. febrero 08, 2020, de Agroptima Blog Sitio web:

<https://www.agroptima.com/es/blog/autoguiado-tractores-marcas-modelos-diferencias/>

Chosla, R. (2001), *Zoning in on precisión agricultura*. Colorado State University Agronomy Newsletter, Estados Unidos.

Díaz, R. (2018). *Agricultura de Precisión (AP): Tecnologías para mejorar la competitividad del sector agrario*. Febrero 02,2020, de ainia Sitio web: <https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/tecnologia/agricultura-precision/>

Doerge, T. (1998). *Defining management zones for precision farming*. Crop Insights. 8(21): 1-5.

García, E. y F, Flego (2005). *Tecnología agropecuaria*. Agricultura de precisión Universidad de Palermo. Pp. 110-112.

García, F., (2018). *La Percepción en los Vehículos Autónomos*. Intelligent Systems Lab, 26.

Geoinnova (2021). *Componentes de un Sistema de Informacion Geografica (SIG)*. 26 Mayo de 2021. Sitio web: <https://geoinnova.org/cursos/componentes-sistema-informacion-geografica-sig>

Gil, E. (2008), *Situación actual y posibilidades de la Agricultura de Precisión*. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona, España.

Gómez, A., Clavijo, F., & Jiménez, A., (2016). *Agricultura de Precisión y Sensores Multiespectrales Aerotransportados*. Universidad Nacional de Colombia, Artículo Científico.

- González, A., Amarillo, M., Amarillo, G., & Sarmiento, F., (2016). *Drones Aplicados a la Agricultura de Precisión*. Publicaciones e Investigación, 10, 23.
- Hernán, P. G. (2015). *El A, B, C de los Mapas de Prescripción de Malezas a Partir de Drones*. Sitio web: <https://www.cordobatimes.com/el-campo/2015/11/26/el-abc-de-los-mapas-de-prescripcion-de-malezas-a-partir-de-drones/>
- INIA, C. Q., de los Recursos Naturales, D., y M. Ambiente (1999). *Agricultura de precisión: Introducción al manejo de sitio-específico*. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigación Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapa.
- INTA (2020), *Comparación entre GPS autónomo y con corrección diferencial, Introducción*. INTA Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Manfredi, Argentina. pp 1.
- J.M. Jimenez (2020). *Los tres tractores autónomos que ya revolucionan la agricultura: puedes trabajar cientos de hectáreas desde tu sofá*. 01 junio de 2021. Sitio web: <https://www.tododecampo.com/2020/07/30/tres-mejores-tractor-autonomo/>
- Kvien, C. and S. Pocknee. (2000) .*Introduction to why management zone*. Technical report, National Environmentally Sound Production Agriculture Laboratory (NESPAL), College of Agricultural and Environmental Science, The University of Georgia.
- Labandibar, M. (2014). *Usos y aplicaciones del monitor de rendimiento en la agricultura de precisión*. Tesina de licenciatura. Buenos Aires, Argentina. pp 24-25.
- Lago, C. (2011), *Sistema para la Generación Autónoma de Mapas de Rendimiento*. Aplicación en la Agricultura de Precisión. IDESIA, CHILE.

- Lisarazo, S. I., & Alfonzo, C. O. (2010). *Precision Agriculture Applications in the Cultivation of Elaeis Guineensis and Hybrid O x GOil Palms*. Revista de Ingenieria, Argentina, 124(1-7).
- Maroni, J.R. 2007. *Agricultura de precisión: avances para realizar aplicaciones de dosis variables mediante máquinas pulverizadoras*. Agromensajes 23: 1-3.
- Martínez E. (2020). *Vehículos Autónomos en Agricultura de Precisión*, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Martínez, D. (2013), *Desarrollo de Procedimiento para la elaboración de Mapas de Prescripción empleando SIG y Sistemas de Control FMX*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División De Ingeniería.
- Morote, M. L. (2010). *Agricultura de Precisión*. Ciencia y Tecnología 10, ISEU 2010, 24.
- Ortega, B. R. y Flores, M. L. (2008). *Introducción al manejo sitio-especifico*. Agricultura de precisión: Departamento de recursos naturales y medio ambiente. Vicente Méndez No515. Chillan Chile.
- Ortega, R (2000). *Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio específico*. CRI Quilamapu INIA Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Argentina 1-8.
- Pagani, A. (2013). *Manejo de sitio específico de nutrientes para una mayor eficiencia productiva*. Iowa State University, Department Of Agronomy. pp. 2-10.

- R.C TECNIC. (2017). *¿Qué es un drone? Tipos, nombres y componentes*. Febrero 05, 2020, de R. C TECNIC Sitio web: https://www.rctecnic.com/blog/107_que-es-un-drone--tipos-nombres-y-componentes.html
- Revista de Robots. (2020). *Ingeniería Robótica Agrícola 4.0*. febrero 12, 2020, de Revista de Robots Sitio web: <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/ingenieria-robotica-agricola-4-0/>
- Reynolds-Chávez, M. A. (2014). *Uso de labranza vertical y agricultura de precisión para la optimización de energía en labranza primaria del suelo*. Tesis Doctorado. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 171 pp.81-83.
- Riquelme, J. (2011). *Contribución a las Redes de Sensores Inalámbricas. Estudio e Implementación de Soluciones Hardware para la Agricultura de Precisión*. Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia pp.1-40.
- Rodrigo Pareja (2020). *La Inteligencia Artificial llega a la agricultura con este tractor presentado en Japón*. 29 Mayo de 2021. Sitio web: <https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/a30712146/tractor-autonomo-kubota/>
- Ruipérez, P., (2014). *Diseño y Fabricación de un Drone*. Universidad Politécnica de Valencia, pp 33 – 38.
- Solodrone. (2018). *Drone Híbrido*. Febrero 05, 2020, de Solodrone.top Sitio web: <https://www.solodrone.top/hibridos/>

Terry, L. R. (2000). *Manejo sitio específico de Nutrientes-Avances en Aplicaciones con Dosis Variable*. INTA Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Manfredi, Argentina, pp.1-9.

Tripicchio, P., Satler, M., Dabisias, G., Ruffaldi, E., & Avizzano, C., (2015). *Towards Smart Farming and Sustainable Agriculture with Drones*. 10.1109/IE.2015.29.

Vilaboa, I., (2018). *Agricultura de precisión, la nueva alternativa sustentable (opinión)*. Febrero 03, 2020, de Conecta, Tecnológico de Monterrey Sitio web: <https://tec.mx/es/noticias/veracruz/educacion/agricultura-de-precision-la-nueva-alternativa-sustentable-opinion>