

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Sistemas de Administración para la Agricultura de Precisión.

Autor: Gustavo Otero Barrera.

Tutores: Dr. C. Eduardo Izaguirre Castellanos.

M. Sc. Lianet Avello Fernández.

M. Sc. Redney Rodríguez Rodríguez.

Santa Clara, septiembre 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Department of Automation and Computational Systems

TRABAJO DE DIPLOMA

Title: Precision Agriculture Management System.

Author: Gustavo Otero Barrera.

Thesis Director: Dr. C. Eduardo Izaguirre Castellanos.

M. Sc. Lianet Avello Fernández.

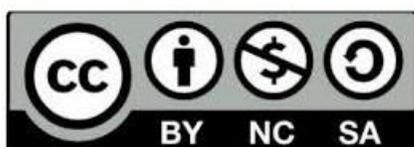
M. Sc. Redney Rodríguez Rodríguez.

Santa Clara, september 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

(...) cuando se tiene los ojos fijos en lo alto, ni zarzas ni guijarros distraen al viajero de su camino; los ideales enérgicos y consagraciones fervientes no se merman en un ánimo sincero por las contrariedades de la vida.

José Martí

DEDICATORIA

A mi madre y hermana les dedico el resultado de estos meses de trabajo por su apoyo incondicional y sus jalones de orejas para llevarme siempre por el camino correcto.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre y hermana les estaré eternamente agradecido por formarme en este hombre que soy hoy.

A los amigos de siempre Luisi, Omarito que ya son como hermanos.

A mis padres el biológico y el político.

A mis padrinos, no puedo pensar en una sola vez que los halla necesitado y no estuviesen allí.

A la toda la familia ya sea de sangre o no.

Los vecinos, siempre pendientes de mi progreso y brindando siempre su apoyo desinteresado.

A los compañeros de aula en estos cinco años, los que se graduaron y los que están por graduarse muchas gracias por su ayuda sin ustedes hubiesen sido más difíciles aún estos años.

A los profesores por acercarme más al profesional que un día quiero ser.

A todos los estudiantes de la UCLV que han puesto su granito para que este momento se hiciera realidad.

RESUMEN

Dentro de la conceptualización de Agricultura de Precisión (AP), término que se utiliza en la actualidad, se considera el manejo o administración de la agricultura basado en las novedosas tecnologías de la información. Las que permiten ajustar las prácticas agrícolas a las necesidades del cultivo, incrementar las producciones agrícolas. También el manejo eficiente de los recursos disponibles, reducir el impacto negativo al medio ambiente y ayudar a la toma de decisiones, entre otras ventajas. No obstante, con frecuencia se confunden los términos de AP y Administración de la Agricultura de Precisión. La disponibilidad de las tecnologías aplicables no se implementa de igual manera a todos los agrosistemas y se diseñan arquitecturas en función de las condiciones propias de la infraestructura agrícola de cada región o país. En este sentido, el propósito del presente trabajo de investigación es profundizar en estos conceptos a través de una sistematización del conocimiento, evaluar la disponibilidad de las novedosas tecnologías aplicadas en la AP y la caracterización para su empleo en Cuba, para finalmente proponer una arquitectura genérica aplicable para un Sistema de Administración de la AP en Cuba, se emplea como caso de estudio la UEB Cuba-Venezuela perteneciente a la Empresa Agrícola de Cultivos Varios "Cubasoy", ubicada en el municipio Venezuela, de la provincia de Ciego de Ávila.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	.....
DEDICATORIA .....	.....i
AGRADECIMIENTOS .....	..... ii
RESUMEN .....	..... iii
INTRODUCCIÓN .....	..... 1
CAPÍTULO I. Agricultura de Precisión y sus Componentes. ....	.....6
1.1 Agricultura de Precisión (AP). Definición y generalidades. ....	.....6
1.1.1 Ventajas de la Agricultura de Precisión.....	.....7
1.1.2 Dificultades y retos para el desarrollo de la AP.....	.....8
1.2 Elementos de Monitoreo en la Agricultura de Precisión. ....	.....9
1.2.1 Sistemas de Posicionamiento Global.....	.....9
1.2.2 Sistemas de Información Geográfica.....	.....11
1.2.3 Teledetección.....	.....12
1.2.4 Monitores y mapas de rendimiento.....	.....13
1.2.5 Redes de sensores inalámbricos.....	.....14
1.3 Sistemas de Administración en el contexto de Agricultura de Precisión.....	.....17
1.3.1 Sistema de apoyo a la toma de decisiones .....	.....18
1.3.2 Sistema adaptativo de apoyo a la toma de decisiones (ADSS).....	.....18
1.4 Tecnologías para la integración de los elementos de Monitoreo y Administración en Agricultura de Precisión.....	.....19
1.4.1 Plataformas IoT.....	.....19
1.4.2 Sistemas Ciber-Físicos.....	.....21

Consideraciones Finales	22
CAPÍTULO II. Tecnologías aplicables en el contexto de la Agricultura de Precisión.	23
2.1 Aplicaciones de los elementos empleados para el monitoreo en el contexto de la Agricultura de Precisión	23
2.2 Aplicaciones de los Sistemas para el perfeccionamiento de la Administración en la Agricultura de Precisión	34
2.2.1 Sistemas de apoyo en la toma de decisiones (DSS).....	34
2.2.2 Modelos mecanicistas	36
2.2.3 Simulaciones	37
2.2.4 Inteligencia artificial	38
2.2.5 Control de aprendizaje	41
2.2.6 Control predictivo del modelo	42
2.3 Aplicaciones de las tecnologías para la integración de los elementos de Monitoreo y Administración.....	44
2.3.1 IOT y CPS en Agricultura de Precisión.....	44
2.4 Estado actual de los sistemas de monitoreo en el contexto cubano.....	46
Consideraciones Finales	48
CAPÍTULO III. Sistema de Administración para la Agricultura de Precisión en Cuba. Caso de Estudio UEB Cuba-Venezuela.....	49
3.1 Propuesta de Arquitectura General para CPS	49
3.2 Sistema de administración para la UEB Cuba-Venezuela.....	53
3.2.1 Breve reseña de la entidad.	53
3.2.2 Localización.....	54
3.2.3 Características Físico Geográficas de la zona.....	55
3.2.4 Sectores Hidrogeológicos	56

3.2.5 Vegetación y Calidad del Aire.....	57
3.2.6 Resultados de análisis interno de la EA Cubasoy.....	58
3.3 Consideraciones sobre la selección de la tecnología.....	59
3.4 Propuesta de un Sistema Ciber-Físico para la UEB Cuba-Venezuela	64
3.4.1 Datos que facilitan la elección del hardware y comunicación	65
3.5 Análisis económico	66
Consideraciones Finales	67
CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES.....	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	75
Anexo I Especificaciones Wi-Fi Router F8434.....	75
Anexo II Especificaciones Raspberry Pi 3 Modelo B+.....	76
Anexo III Especificaciones del servidor Poweredge r230 de Dell	77
Anexo IV Comparación de algunas plataformas de sensores inalámbricos.	80

INTRODUCCIÓN

La Agricultura de Precisión (AP) es un sistema de gestión agrícola que se basa en las tecnologías de la información y las comunicaciones. Emplea sistemas sensoriales y técnicas de monitoreo avanzadas para la obtención de datos del suelo, los cultivos, etc. de manera integral, correcta y oportuna (Mantovani and Magdalena, 2014). Con el empleo de las nuevas tecnologías, la correcta Administración de la Agricultura de Precisión puede ayudar a directivos, investigadores, especialistas y obreros a la toma de decisiones (Mantovani and Magdalena, 2014). Es por ello que en la actualidad, la AP hace uso de los Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Teledetección y SIG (Ye et al., 2013). Mediante la aplicación de estas y otras novedosas tecnologías se puede monitorear la distribución de los rendimientos de los cultivos, la composición del suelo, entre otros, posibilitando llevar a cabo de manera eficiente tareas agrícolas tales como fertilizar, sembrar, regar, pulverizar, cosechar, etc. También se reducen los costos de producción, se mejorará la operación del equipamiento agrícola y el correcto uso de los recursos hídricos y energéticos. Ello incide en el aumento de la producción agrícola e impacto económico, además de reducir la contaminación ambiental causada por el abuso de productos químicos agrícolas y otras sustancias (Valero Ubierna et al., 2010).

La Agricultura de Precisión se aplica en los países desarrollados. El *American National Research Institute* propuso esta técnica en sus estrategias nacionales de desarrollo desde 1997 (Council, 1997). Los países europeos también realizan diferentes investigaciones sobre esta temática (Valero Ubierna et al., 2010, Erdem et al., 2010). En Asia, el gobierno japonés lanzó el plan denominado "Proyecto de desarrollo de emergencia de maquinaria agrícola en el siglo XXI" (Zhang et al., 2002); luego, Corea del Sur y Malasia realizan similares investigaciones

(Zhang et al., 2002). De forma general, las principales tecnologías están dirigidas a la adquisición de información, posicionamiento o georreferenciación, sensado, monitoreo de parámetros y variables, comunicación, seguimiento logístico y toma de decisiones, por solo mencionar algunas. Sin embargo, muchos de los elementos que se mencionan están todavía en etapa de investigación y perfeccionamiento. Estos elementos son dependientes del contexto de aplicación y de la disponibilidad de las tecnologías existentes en cada país o región que se asocia a la implementación de una determinada técnica.

En nuestro país la Agricultura de Precisión comienza a dar sus primeros pasos. En este contexto en la literatura consultada se informan varios trabajos sobre la conceptualización de este término (Leyva Rafull et al., 2001) y el análisis del impacto de su implementación, tanto en lo económico como en lo social (Lora Cabrera et al., 2012, Quevedo Herrero et al., 2006). Por otra parte, la empresa CEDAI desarrolla proyectos sobre la Agricultura de Precisión. Este es el caso de la automatización de un sistema de fertirriego para casas de cultivo a nivel nacional. De la misma forma en la Empresa Pecuaria “Niña Bonita” en Batabanó, se realizó un estudio que demuestra la reducción de los costos, al utilizar técnicas de GPS y SIG, en comparación con las técnicas convencionales que se empleaban con anterioridad (Quevedo Herrero et al., 2006).

También se informan importantes contribuciones del Grupo de Automática Robótica y Percepción (GARP) adscrito al Departamento de Automática y Sistemas Computacionales de la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV) en relación con aplicaciones agrícolas, en áreas tan importantes como el riego (Avello Fernández, 2019), fertilización (Vázquez Blanco, 2017), cosecha (Pérez García, 2016), adquisición de imágenes aéreas (Triana Escobedo, 2018), procesamiento de la información (Morales and Ginori), fotogrametría (Gutierrez et al., 2019), etc.

La UCLV forma parte integrante de las entidades que participan en el Programa Nacional de Agricultura de Precisión, así como dirige el Grupo Nacional de Automatización y Robótica (Hernandez-Santana, 2019). Contexto propicio para la integración y generalización de importantes aplicaciones en el área de la Agricultura de Precisión y la Administración de la misma, conceptos muy relacionados entre sí, pero que no representan lo mismo.

Antecedentes

Existen trabajos de investigación en el mundo referidos a los Sistemas de Administración de la Agricultura de Precisión, dentro de los cuales destacan:

En Ye et al. (2013) luego de analizar el desarrollo actual de la Agricultura de Precisión en China y considerar sus ventajas y deficiencias, se eligió una granja ecológica para llevar a cabo un nuevo Sistema de Administración de Agricultura de Precisión (PAMS por sus siglas en inglés) basado en IoT (Internet de las Cosas) y WebGIS. Se diseñó las cuatro arquitecturas de PAMS: la plataforma de infraestructura de información espacial, la plataforma de infraestructura IoT, la plataforma de gestión de la agricultura y el cliente móvil. Los usuarios pueden monitorear y administrar la producción agrícola por PAMS. Asimismo, el método de integración de módulos y el software de código abierto, ayudó a reducir los costos de desarrollo y mejorar la eficiencia del sistema.

En Srbinovska et al. (2015) se propuso la arquitectura de una red de sensores inalámbricos para un invernadero vegetal con el fin de lograr el cultivo y reducir los costos de gestión desde el ámbito del monitoreo ambiental. Según el análisis de las características del ambiente de invernadero, se logró que este sea práctico y con bajo costo. La tecnología de red de sensores inalámbricos se diseñó para monitorear parámetros ambientales claves como la temperatura, la humedad y la iluminación.

En Atzberger (2013), se seleccionó aplicaciones en el contexto de los desafíos globales que enfrenta el sector agrícola: minimizar el impacto ambiental y aumentar la producción y la productividad. Cinco aplicaciones diferentes se ilustran y describen: la biomasa y estimación de rendimiento, monitoreo del vigor de la vegetación y estrés por sequía, evaluación de cultivos y desarrollo fenológico, estimación de la superficie cultivada y mapeo de tierras de cultivo y, por último, mapeo de perturbaciones y cambios en el uso del suelo/cobertura del suelo (LULC). En el trabajo se describen los sistemas de monitoreo operacional existentes y las aplicaciones de estos de forma integral.

Situación problemática

En nuestro país, a pesar de todos los esfuerzos, el desarrollo de novedosas tecnologías relacionadas con la AP y la Administración (Manejo o Gestión) de la misma es aún incipiente. Los resultados investigativos demoran en aplicarse y carecen de un enfoque integral en la solución y generalización de los resultados investigativos.

Es por ello que se plantea el problema científico como *la necesidad en nuestro país de lograr la implementación de una Agricultura de Precisión y su Administración que emplee de manera racional, coherente y sostenible las nuevas tecnologías existentes en el mundo, sobre plataformas y/o arquitecturas que estén en correspondencia con las características propias de nuestra infraestructura agrícola, desarrollo social y recursos humanos y materiales disponibles en nuestras condiciones actuales.*

Por consiguiente, debe buscarse la imprescindible integralidad en la aplicación de estas novedosas tecnologías en el contexto particular de nuestro país, basado en arquitecturas coherentes para los sistemas de gestión de la AP, amigables con el medioambiente y que permitan optimizar los recursos, incrementar la producción, la toma de decisiones y la garantía de la sostenibilidad de la inversión, por solo mencionar algunos aspectos claves.

Bajo estas consideraciones, se propone el siguiente sistema de objetivos:

Objetivo general:

Sistematizar el conocimiento en relación con los Sistemas de Administración de la Agricultura de Precisión, con vistas a la propuesta de una posible plataforma para el manejo de una Agricultura de Precisión basada en las novedosas tecnologías actualmente en explotación y acorde a las condiciones de nuestro país.

Objetivos Específicos:

1. Analizar los fundamentos teóricos conceptuales relacionados con los Sistemas de Monitoreo y Sistemas de Administración en la Agricultura de Precisión.
2. Profundizar en las aplicaciones de las novedosas tecnologías en el contexto de la Agricultura de Precisión existentes en el mundo, su caracterización y estado actual en Cuba en función de su posible implementación.
3. Evaluar las herramientas computacionales, elementos de hardware, software y sistemas de comunicación enfocada a la concepción de una arquitectura de Sistema de Administración para la Agricultura de Precisión en Cuba.
4. Proponer una arquitectura genérica para la implementación de un Sistema de Administración para la Agricultura de Precisión en el contexto de Cuba.

5. Ejemplificar el uso de la arquitectura propuesta para un Sistema de Manejo de la Agricultura de Precisión, empleando como caso de estudio la UEB Cuba-Venezuela, perteneciente a la Empresa Agropecuaria Cubasoy.

Organización del informe

El presente trabajo está constituido por la introducción, tres capítulos, conclusiones y recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos.

En el capítulo I se abarcan las generalidades, conceptos, ventajas y retos asociados a las técnicas relacionadas con Agricultura de Precisión, se explicarán en qué consisten las técnicas y los elementos que se emplean en el monitoreo y la administración de la agricultura, además se realizará una breve introducción a las plataformas IoT y sistemas Ciber-Físicos como tecnologías integradoras, por último, se expondrán las conclusiones parciales de este capítulo.

El capítulo II está dedicado a mostrar las características, potencialidades y las aplicaciones más representativas de cada una de las tecnologías que se emplean para el monitoreo y administración en la Agricultura de Precisión, así como también una caracterización del estado actual de los sistemas de monitoreo y administración en la agricultura cubana. Al final se expondrán las conclusiones parciales del capítulo.

En el capítulo III se realiza la propuesta de la arquitectura de un sistema Ciber-Físico de cuatro capas, se explicarán además las funciones y requerimientos de cada capa. Asimismo, se muestran los resultados de la caracterización de la empresa Cubasoy, entidad que se toma como objeto de estudio para ejemplificar la conformación del sistema, por último, se arriba a conclusiones.

CAPÍTULO I. Agricultura de Precisión y sus Componentes.

Luego de una profunda revisión bibliográfica sobre el tema abordado, en este capítulo se resumirán los principales aspectos a tener en cuenta en lo que a Agricultura de Precisión y Sistemas de Administración y Monitoreo se refiere, su necesidad, ventajas y limitaciones, actualidad y una breve descripción de las tecnologías que más se emplean para el diseño e implementación de estos sistemas.

1.1 Agricultura de Precisión (AP). Definición y generalidades.

Uno de los conceptos más frecuentes que definen la AP plantea que esta se trata de tomar la decisión correcta, en el lugar exacto y en el momento justo. La AP se apoya en el uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs), para adecuar la gestión de suelos y cultivos a la variabilidad existente dentro de una misma parcela (Valero Ubierna et al., 2010). Esta técnica integra tecnologías como GPS, Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés), Plataformas en un Chip (SoC), entre otras. Todas estas tecnologías se integran con el fin de satisfacer una de las exigencias de la agricultura moderna: el manejo óptimo de grandes extensiones de tierras cultivadas.

El objetivo de la AP es proporcionarle al agricultor la mayor cantidad de información posible sobre los cambios agronómicos dentro de la parcela, para que en cada metro cuadrado del terreno se labre, fertilice, siembre, riegue, etc., en la proporción adecuada, para lograr la máxima producción posible en cada punto del terreno (Mantovani and Magdalena, 2014).

Valero Ubierna et al. (2010) muestran en puntos resumidos los beneficios a los que se pueden aspirar al emplear esta técnica agrícola como por ejemplo la optimización del uso de recursos costosos, la reducción de los contaminantes ambientales, un mejor aprovechamiento de la

maquinaria agrícola, mayor facilidad de gestión de la explotación agrícola y el incremento de la producción.

Así mismo, se exponen los requisitos que deben cumplir los equipos de Agricultura de Precisión para llevar a cabo estas mejoras, los cuales se mencionan a continuación:

- Disponer de mecanismos más precisos de ajuste y control de la maquinaria durante el trabajo en el campo.
- Adquisición automatizada de la información y manejo de los datos mediante ordenadores y bases de datos estructuradas. Uso de sistemas de información geográfica (SIG). Empleo de sistema de ayuda a la decisión (modelos de predicción del cultivo, suelo, etc.; sistemas expertos).
- Distribución de abono localizada y variable según las características del suelo en cada punto, su riqueza en nutrientes, agua y crecimiento del cultivo.
- Distribución de fitosanitarios localizada según las necesidades del cultivo.

La AP es un proceso de ciclo cerrado que comienza y termina con la recolección de los datos de producción en la cosecha, a partir de la cual se realiza una evaluación de los resultados mediante medios de cómputo, realizando mapas de rendimiento y análisis del suelo; estos datos pasan a un ordenador donde el personal capacitado pueda acceder a ellos y entonces empezar la toma de decisiones (Mantovani and Magdalena, 2014).

1.1.1 Ventajas de la Agricultura de Precisión.

Primeramente, hay que destacar que la agricultura tradicional trata los campos de cultivo como campos homogéneos, es decir, sin tener en cuenta la variabilidad espacial y temporal que existe dentro de una misma parcela y, por consiguiente, no se analizan las causas que provocan dicha variabilidad (Mantovani and Magdalena, 2014). Esta es una de las causas que trae como consecuencia el derroche de insumos, por otra parte, el exceso de productos químicos cuando no son necesarios en toda la parcela, sino que, en un sector específico, lo que perjudica en muchas ocasiones al medio ambiente y a los demás cultivos, lo que provoca pérdidas en los resultados finales de la producción.

Con lo antes expuesto, las ventajas que trae consigo la AP son contundentes, ya que esta permite el empleo de los insumos sólo donde son realmente necesarios, en el momento

cuando son requeridos y en la cantidad que se precise. Esto es posible con la integración de las tecnologías de la información y las comunicaciones que permiten el sensado de una gran cantidad de variables en cada sector del campo. Luego la transmisión de esta información para su procesamiento y almacenamiento y posterior a este proceso será usada para el análisis y toma de decisiones. Todas estas ventajas traen consigo un mejor tratamiento de los campos, con menos pérdidas económicas al ahorrar insumos y, por consiguiente, una mayor eficacia de la producción (Valero Ubierna et al., 2010).

1.1.2 Dificultades y retos para el desarrollo de la AP

Mantovani and Magdalena (2014) plantean que existen algunas barreras técnicas que impiden el total desarrollo de la AP.

Primeramente, desarrollar una AP implica una intensificación en la cantidad de información a almacenar. La confección de mapas de rendimiento, de las condiciones del suelo, de los cultivos y el sensado de variables relacionadas a los factores ambientales que afectan el resultado final de la producción, generan un elevado volumen de información. A esto se le suman las variabilidades climáticas, empleadas para la confección de algoritmos de pronóstico. Además de los conocimientos derivados de las experiencias vividas y las exigencias del mercado. Todo esto evidencia que es imprescindible el desarrollo de herramientas para almacenar y gestionar correctamente toda la información. Así como el desarrollo de sistemas expertos que apoyen en la toma de decisiones.

En segundo lugar, no existe en la actualidad un estándar a seguir en cuanto a los criterios de selección de las técnicas racionales a emplear, ni a las estrategias a seguir para determinar las necesidades de cada cultivo dentro de una misma parcela. Por otra parte, las validaciones científicas en las que se puedan apreciar los beneficios al emplear la AP son muy escasas.

Asimismo, se hace necesario el desarrollo de sistemas sensoriales baratos capaces de generar información de manera rápida y precisa, ya que la obtención de datos referidos al suelo, los cultivos y el ambiente es un proceso costoso en términos de inversión y tiempo.

Además de estas barreras existen también algunos requerimientos que habría que tener en cuenta si se quiere desarrollar una AP en nuestro país, estos son (Valero Ubierna et al., 2010):

- La implementación de esta técnica implica un profundo cambio en los procesos de manejo de determinadas operaciones, lo que supondría tener que realizar la correcta capacitación del trabajador agrícola.
- Es necesario, que la integración de las nuevas tecnologías se realice en etapas consecutivas y de forma progresiva.
- Dada la diferente naturaleza de los beneficios económicos resultantes se hace difícil la estimación de estos de una única manera (Ej. Ahorro de insumos, menores índices de contaminación, etc.).
- Resulta difícil evaluar la evolución de los costes y los beneficios a medio y largo plazo.

1.2 Elementos de Monitoreo en la Agricultura de Precisión.

Para brindar una definición de lo que es un Sistema de Monitoreo en el contexto de la Agricultura de Precisión hay que referirse al significado de las palabras que lo componen. Por tanto, sistema no es más que un conjunto de dispositivos que se relacionan entre sí de manera ordenada. Luego monitoreo es supervisar o controlar las entradas, los procesos intermedios y las salidas para identificar fortalezas y debilidades. Además de formular propuestas de acciones prácticas a implementar y tomar los pasos necesarios para alcanzar los resultados esperados (De Grauwe and Carron, 2007, Krutz, 2005).

Los sistemas de monitoreo que se emplean en la Agricultura de Precisión son muchos y variados, como los sistemas de monitoreo para las maquinarias agrícolas basados en ARM11 y GNSS (Xiang et al., 2016), los sistemas de monitoreo de variables ambientales basados en redes de sensores inalámbricos y estaciones agro meteorológicas (Mesas-Carrascosa et al., 2015), sistemas de monitoreo basados en redes de sensores inalámbricos y plataformas en un chip (Lin and Liu, 2008), sistemas de monitoreo basados en plataformas IoT (Popović et al., 2017), etc.

1.2.1 Sistemas de Posicionamiento Global

En la actualidad los sistemas más populares para el posicionamiento en el campo son los sistemas globales de navegación por satélites (GNSS, por sus siglas en inglés). Estos se basan

en el método de triangulación para calcular la posición de un dispositivo receptor en cualquier lugar del planeta (Neményi et al., 2003).

Luego de que el Departamento de Defensa de los Estados Unidos dispusiera para uso civil la tecnología GPS (Sistema de Posicionamiento Global) en los inicios de la década de los 90, se comenzó a georreferenciar los problemas y soluciones para la agricultura. Además de los GPS, existen otros GNSS como el sistema ruso GLONASS, el sistema europeo GALILEO, el chino COMPASS, el indio IRNSS y el japonés QZSS. En este trabajo se tomará como referencia el sistema GPS por ser el más difundido, encontrarse en pleno funcionamiento y la posibilidad de acceder a este en cualquier región del mundo (Mantovani and Magdalena, 2014).

Para el correcto funcionamiento del sistema, este se divide en tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario (Mantovani and Magdalena, 2014).

- El segmento espacial cuenta con alrededor de 24 satélites que se encuentran en órbita a una distancia aproximada de 20200 km, con tiempo de revolución de aproximadamente 12 horas, en seis planos orbitales con 4 satélites cada plano. Esta configuración permite que al menos 4 satélites se encuentren en el campo de comunicación de cualquier receptor en cualquier lugar del planeta las 24 horas del día.
- El segmento de control es el encargado de monitorear los mensajes de navegación de los satélites y enviar los ajustes que sean necesarios. Este segmento opera desde la Base Falcon de la Fuerza Aérea Norteamericana en Colorado Springs, Estados Unidos y además cuenta con 4 estaciones de monitoreo y tres estaciones de carga distribuidas alrededor del mundo, las cuales envían información a la base para el cálculo de las órbitas de cada satélite, además la actualización de esa información en el sistema de señales.
- El segmento de usuario está compuesto por los receptores y antenas que reciben y procesan las señales de los satélites para determinar su posición, ya sea en tierra, aire o mar.

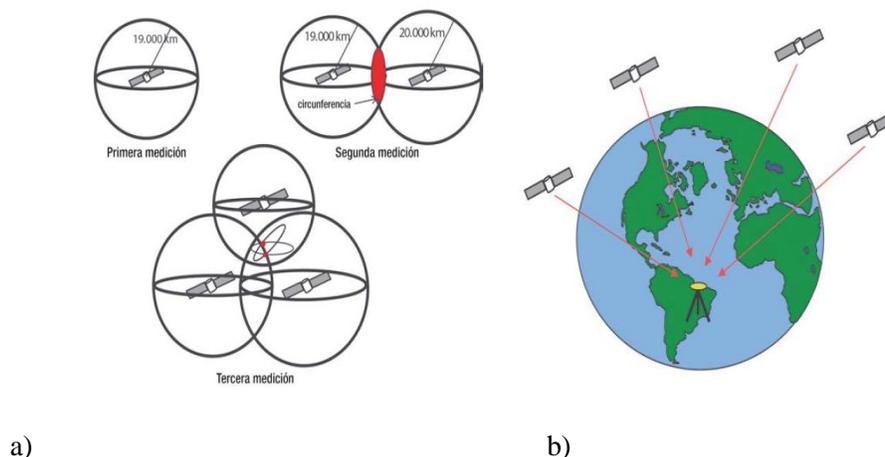


Figura 1.1. a) Medición de la distancia hacia 3 satélites para conocer la localización de un punto.
 b) Seguimiento de la señal de 4 satélites para la obtención de posición 3D.

1.2.2 Sistemas de Información Geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG) se definen como un conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permiten la gestión de datos organizados en una base de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas (Neményi et al., 2003).

Los SIG se basan en un conjunto de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables, o también capas que representan entidades a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada (Mantovani and Magdalena, 2014). Como estas capas corresponden a la misma zona pueden ser analizadas en conjunto, lo que permite la combinación en un mismo sistema de información espacial y temática, con orígenes y formatos muy diversos (Mantovani and Magdalena, 2014).

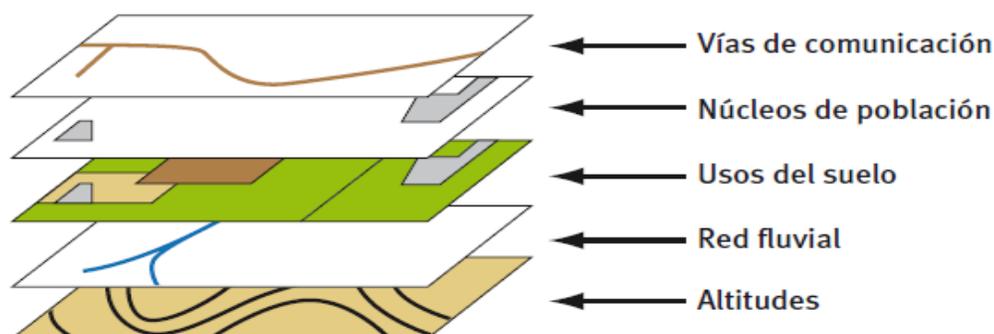


Figura 1.3. Superposición de capas de información.

Estos sistemas se perfeccionan con la integración de aplicaciones informáticas como la cartografía automática tradicional, los sistemas de gestión de bases de datos, las herramientas de análisis digital de imágenes, los sistemas de ayuda a la toma de decisiones (sistemas expertos) y las técnicas de modelación física (Valero Ubierna et al., 2010).

1.2.3 Teledetección

Esta técnica, también conocida en inglés como *remote sensing* (RS), consiste en la observación e interpretación de objetos sin que exista contacto físico con ellos (Valero Ubierna et al., 2010). Para que esto se pueda cumplir, los objetos deben producir perturbaciones en su entorno, las cuales serán captadas por determinados sensores. Entre las perturbaciones que pueden provocar los objetos se encuentran: perturbaciones sobre radiación electromagnética, ondas acústicas o el campo magnético terrestre; sin embargo, mayoritariamente se emplean técnicas de radiación electromagnética, donde se utilizan las bandas espectrales desde las ondas de radio de baja frecuencia hasta los rayos X, pasando por las bandas del visible y del infrarrojo, lo cual se utiliza en aplicaciones agrícolas (Valero Ubierna et al., 2010).

Para el uso de esta técnica la fuente de radiación que se utiliza es el sol, el cual emite radiación en diferentes bandas del espectro electromagnético y con distintas intensidades. Estas se representan en la siguiente figura:

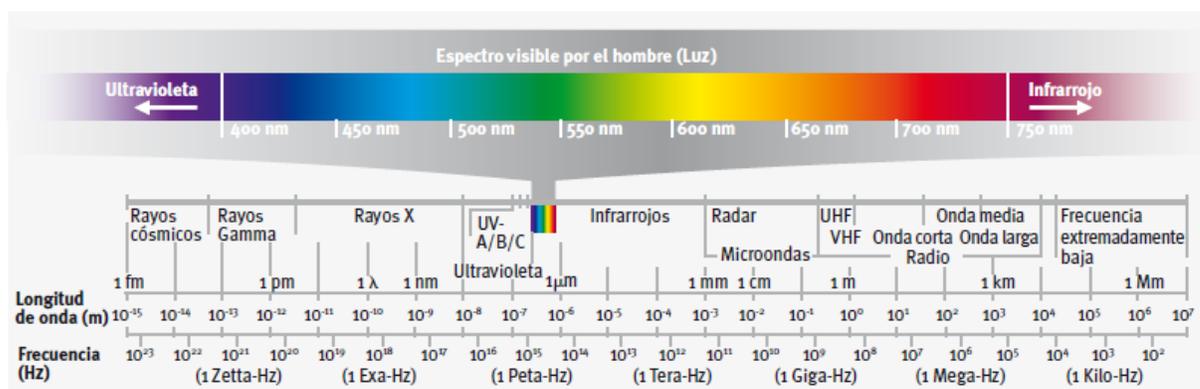


Figura 1.4. Bandas del espectro electromagnético.

Debido a que la mayoría de los sensores en la teledetección se basan en captar la radiación reflejada por los objetos, se debe conocer qué tipo de radiación reciben y qué patrón de reflexión cumplen cada uno de los objetos de estudio, es decir, en qué bandas espectrales

estos reflejan mayor o menor cantidad de radiación. Es importante tener en cuenta que la radiación que no es reflejada resulta absorbida, refractada o difractada por los objetos (Mantovani and Magdalena, 2014).

1.2.4 Monitores y mapas de rendimiento

En la actualidad existen sistemas GPS muy precisos y relativamente baratos. Esta tecnología, combinada con los monitores de rendimiento, permiten registrar y mapear instantáneamente los rendimientos de los cultivos durante la cosecha (Mantovani and Magdalena, 2014).

El monitor de rendimiento permite medir y grabar datos a medida que se cosecha el cultivo y para ello se necesitan una serie de sensores que van instalados en la cosechadora y una consola que con la adición de un GPS nos permite obtener los datos de rendimiento geoposicionados; lo que se emplea en la realización del mapa de rendimiento.

Un monitor de rendimiento determina el rendimiento mediante la medición del flujo de masa de grano a través de la cosechadora, el contenido de humedad y la superficie. Los monitores de rendimiento de grano tienen sensores que miden la fuerza con la que el grano impacta una placa en la parte superior del elevador de granos. El monitor de rendimiento convierte las lecturas de la fuerza en las estimaciones de la masa de grano que fluye por la cosechadora. El área cubierta es el ancho encabezado especificado por el operador, multiplicado por la distancia recorrida cada segundo. La distancia suele determinarse a partir de información de la velocidad de las posiciones GPS, pero también puede ser determinado por radar o velocidad de las ruedas.

Mapa de Rendimiento

Un mapa de rendimiento es una representación espacial de datos de rendimiento registrados durante la cosecha de un cultivo. Generalmente esta representación tiene un formato vectorial de puntos y coordenadas (x,y,z) asociadas a un sistema de proyección (latitud y longitud, WGS84) que referencia geográficamente los puntos (Mantovani and Magdalena, 2014).

Para la obtención de los mapas de rendimiento se integran en una cosechadora el sistema GPS que permite la georreferenciación y un sistema de sensores que permiten, con las variables medidas, calcular la cantidad que se cosecha por unidad de superficie. La

información que brinda estos dos sistemas se centraliza y almacena en una consola que sirve de interfaz con el usuario (Mantovani and Magdalena, 2014).

En la siguiente figura se muestra una cosechadora que está equipada con un monitor de rendimiento, donde además se muestra la distribución de los sensores y del sistema de posicionamiento global.

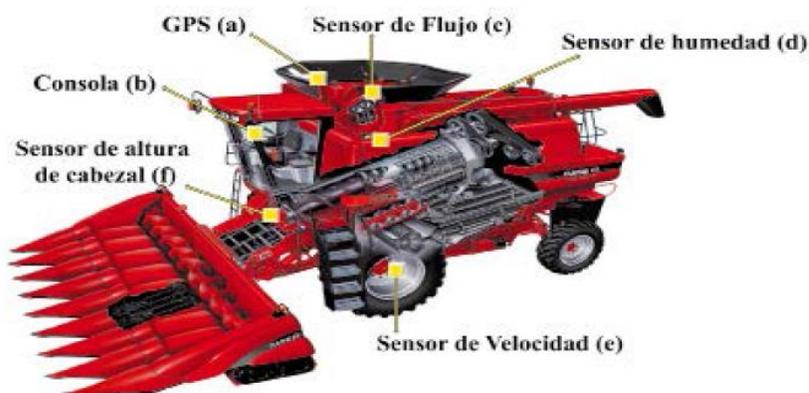


Figura 1.5. Cosechadora equipada con un monitor de rendimiento.

1.2.5 Redes de sensores inalámbricos

La necesidad de monitorear variables en ambientes hostiles o lugares inaccesibles, exigen una gran demanda de dispositivos inalámbricos que posibilitan el sensado de dichos ambientes. Es así como surgen las redes de sensores inalámbricos, o como se conocen por su traducción inglesa *Wireless Sensor Network* (WSN) (Gascón, 2010).

El concepto de redes de sensores inalámbricos se basa en una serie de dispositivos electrónicos, distribuidos en cierta área, que se conectan entre sí para que la información captada por sus sensores llegue al lugar donde sea requerida. El nombre que se le da a estos dispositivos es *mote* (nodo), que presenta dos características fundamentales: su pequeño tamaño y que pueden estar ubicados en cualquier lugar. Esto es posible ya que son dispositivos totalmente autónomos que incorporan baterías similares a las de un teléfono móvil (Gascón, 2010).

Los nodos se organizan de forma automática tal que siempre saben cuáles son las rutas de comunicación existentes. Así se pueden cambiar algunos nodos de sensores hacia otras áreas donde sean necesarios, sin que esto implique problemas en la comunicación. Una de las

características más importantes de estos nodos sensoriales es que pueden permanecer operativos durante meses sin ser recargados, e incluso de forma ininterrumpida, si se les coloca una placa solar para recargar las baterías (Gascón, 2010).

Con las potencialidades de estas redes se hace evidente su popularidad en disímiles aplicaciones, que van desde mejorar el concepto de Agricultura de Precisión hasta aplicaciones en el sector urbano, tales como la creación de mapas de ruido, sitios de parking libre y sensores en calles inteligentes, capaces de medir el tráfico que pasa por ellas (Gascón, 2010). Las figuras 1.6 y 1.7 muestran una red de sensores inalámbricos terrestres típica y su contraparte soterrada desplegadas en el campo.

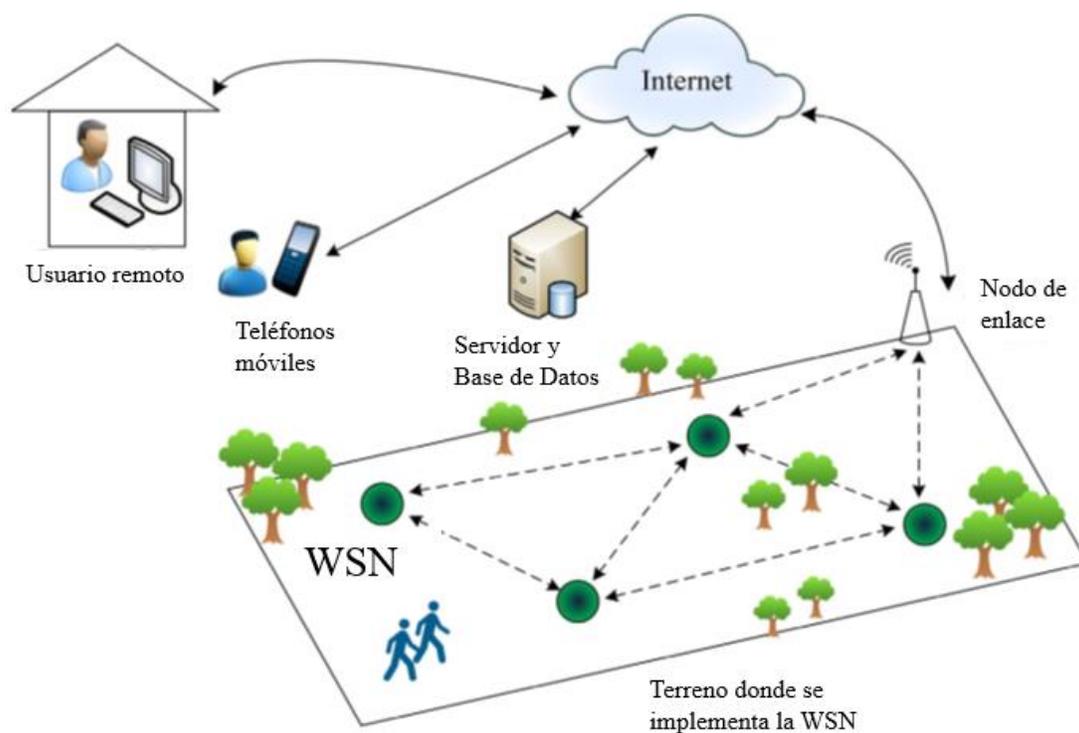


Figura 1.6. Arquitectura de una red de sensores inalámbricos típica.

WSN soterrados (UWSN)

Otra variante de las WSN es su contraparte subterránea. En esta versión se plantan sensores inalámbricos debajo del suelo. En esta configuración, las frecuencias más altas sufren una

severa atenuación y comparativamente bajas frecuencias son capaces de penetrar a través del terreno. Así, el radio de comunicación se ve limitado y la red requiere un mayor número de nodos para cubrir una gran zona. La aplicación de sensores cableados aumenta la cobertura de la red al requerir un número relativamente menor de sensores. Sin embargo, en este diseño, los sensores y los cables pueden ser vulnerables a las labores agrícolas.

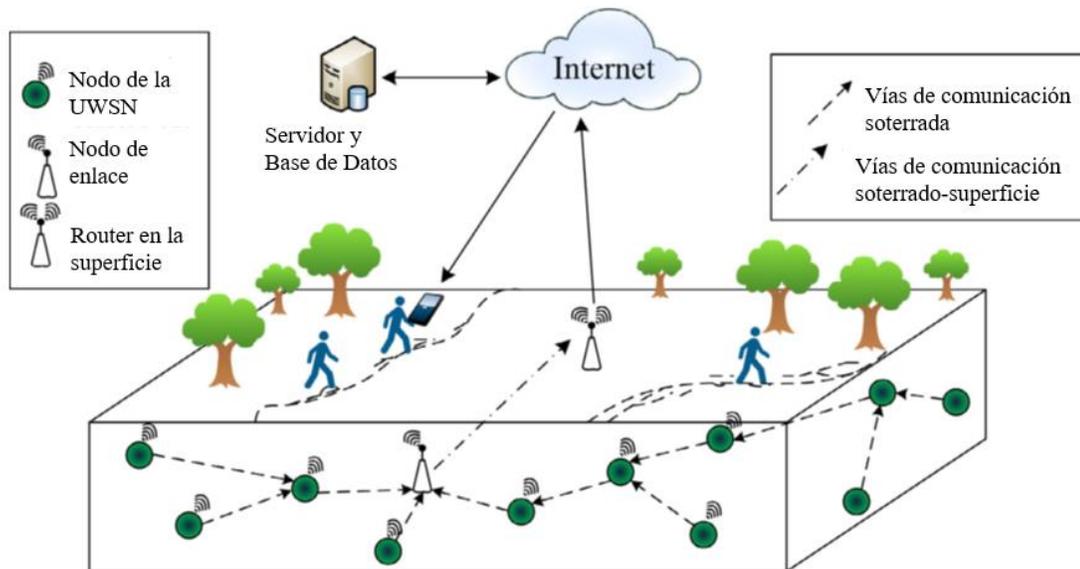


Figura 1.7. Despliegue de una red de sensores inalámbricos soterrada.

Nodos de sensores embebidos multi-chip.

Normalmente, un nodo sensor consta de una matriz de sensores específica de la aplicación con una unidad transceptor para la comunicación. Se utiliza una unidad de procesador o microcontrolador que funciona como el "cerebro" del nodo. Opcionalmente, una placa de sensores incluye unidades de memoria para almacenar datos. Dependiendo de la demanda de la aplicación, la arquitectura de los nodos sensores varía para satisfacer las demandas. Por ejemplo, la potencia de procesamiento y el tamaño de la memoria integrada se incrementan para cumplir con los requisitos de procesamiento más intensos o inteligentes (Ojha et al., 2015).

En este sentido, otra tecnología importante es el Sistema en Paquete (SiP), que se define como cualquier combinación de múltiples chips. Incluye los componentes pasivos (como

resistencias y condensadores) montados juntos y mantienen la disposición para luego conectar componentes externos. SiP reduce el costo del producto con un tamaño y actuación optimizados. Por lo tanto, la tecnología SiP tiene potencial para aplicaciones en escenarios agrícolas. Los sistemas agrícolas basados en SiP se pueden utilizar en diferentes aplicaciones simplemente conectando diferentes sensores con el paquete principal.

Nodos sensores basados en sistema en un chip (SoC).

La arquitectura de sistema en chip (SoC), por otro lado, sigue un diseño más específico de la aplicación dirigido a la minimización de los requisitos de energía y el costo de diseño. SoC proporciona una integración de múltiples núcleos de procesador programables, coprocesadores, aceleradores de hardware, unidades de memoria, unidades de entrada / salida y bloques personalizados (Ojha et al., 2015).

Las aplicaciones previstas para SoC se encuentran principalmente en el diseño de Network on Chips (NoC), sistemas para aplicaciones multimedia y de transmisión por secuencias que son computacionalmente intensivas.

Tabla 1. Comparación entre los atributos de los sistemas SiP y SoC.

Atributos	Multi-chip integrados	Sistema en un Chip
Procesador	Pocos y homogéneos	Múltiples y heterogéneos
Consumo de energía	Alto	Bajo
Costo	Alto	Bajo
Tamaño del sistema	Mayor	Menor
Memoria	Separada del chip	Integrada

1.3 Sistemas de Administración en el contexto de Agricultura de Precisión

También existe en la literatura consultada gran cantidad de aplicaciones, que, por sus funcionalidades y características, abarcan mucho más que la acción de monitorear en el contexto de una Agricultura de Precisión. Tal es el caso del término conocido por Sistemas de Administración en la Agricultura de Precisión (*Precision Agriculture Management System* –PAMS-), que incorpora además del monitoreo la capacidad de manejar (administrar o gestionar) los procesos agrícolas (Pavón-Pulido et al., 2017, Ye et al., 2013).

Sus autores plantean conceptualmente que el término PAMS es un sistema de gestión para la agricultura capaz de almacenar, encontrar y analizar datos, además de permitir el monitoreo y gestión de la producción agrícola. El sistema opera de forma remota los procesos de producción y apoya las decisiones en la producción al emplear novedosas tecnologías como son; IoT, WebGIS y técnicas de comunicación. Los cuales permiten crear una plataforma de integración y de esta manera integrar datos heterogéneos y de diversas fuentes (Ye et al., 2013), elementos que lo diferencian del monitoreo propiamente dicho.

1.3.1 Sistema de apoyo a la toma de decisiones

Los sistemas de apoyo a la toma de decisión (DSS) se basan en softwares y algoritmos informáticos que se utilizan para asistir y ayudar a los especialistas encargados de la administración en su proceso de toma de decisiones. Desde el inicio de los DSS, queda claro que asisten y apoyan a los especialistas, pero no los reemplazan. Esta característica distingue un DSS de otro sistema de información (SI). Algunos SI reemplazan a especialistas en decisiones bien estructuradas, rutinarias y recurrentes; otros se utilizan para verificar, registrar o extraer datos (Gupta et al., 2007).

1.3.2 Sistema adaptativo de apoyo a la toma de decisiones (ADSS)

Se define ADSS como un DSS que apoya los juicios humanos de toma de decisiones. Se adaptan sus funciones a las necesidades cognitivas de alto nivel de los usuarios, las características de la tarea y los contextos de decisión (Fazlollahi et al., 1997).

Los ADSS tienen el objetivo de mejorar la efectividad del especialista a cargo de la gestión al realizar tareas que requieren un alto grado de juicio humano. Así enmarcan problemas, generan alternativas, hacen concesiones y manejan la equidad e incertidumbre. ADSS, debido a su énfasis en el apoyo cognitivo de alto nivel, también mejorará el aprendizaje y la comprensión del usuario sobre el proceso de toma de decisiones y el conocimiento del dominio (Fazlollahi et al., 1997).

Otras técnicas que se emplean dentro de estos sistemas son las simulaciones; el empleo de técnicas de inteligencia artificial como la Lógica Fuzzy, las redes neuronales artificiales y los sistemas expertos; el control de aprendizaje (Control Learning); control predictivo del modelo (MPC) entre otros.

1.4 Tecnologías para la integración de los elementos de Monitoreo y Administración en Agricultura de Precisión

1.4.1 Plataformas IoT

Internet of Things (IoT), método para conectar todo a Internet: conectar objetos o cosas (como automóviles, hogares, dispositivos electrónicos, etc.) que previamente no se conectan entre sí. El principal objetivo de IoT permite garantizar la entrega de la información adecuada a las personas correctas y en el momento justo. Con el rápido desarrollo de Internet y la tecnología de redes, las personas pueden chatear, trabajar, comprar, mantener mascotas y plantas en el mundo virtual que proporciona la red. IoT se puede usar para monitorear y rastrear diferentes dominios como el de la salud, el ambiental, el de utilidad, el de logística, el de agricultura, entre otros. En otras palabras se conecta un grupo de cosas asociadas con sensores e internet desde lugares remotos y se hace la automatización, lo que permite lograr el resultado de calidad deseado (Bojanova et al., 2014).

Las nuevas aplicaciones innovadoras de IoT aumentan la calidad, cantidad, sostenibilidad y rentabilidad de la producción agrícola. IoT puede cambiar el dominio de la agricultura y capacitar a los agricultores para luchar contra las enormes dificultades que enfrentan. La agricultura debe superar las crecientes deficiencias de agua, la disponibilidad restringida de tierras, al mismo tiempo que satisface las crecientes necesidades de consumo de una población mundial.

La arquitectura por la cual se rigen las aplicaciones IoT se muestra en la figura 1.10, mientras en la figura 1.11 se ilustra el ecosistema del llamado Internet of Anything (IoA), en el cual podemos apreciar que los CPS (Cyber-Physical System), el IoH (Internet of Humans) y el CBS (Cyber-Biological System) constituyen el núcleo de la IoT.

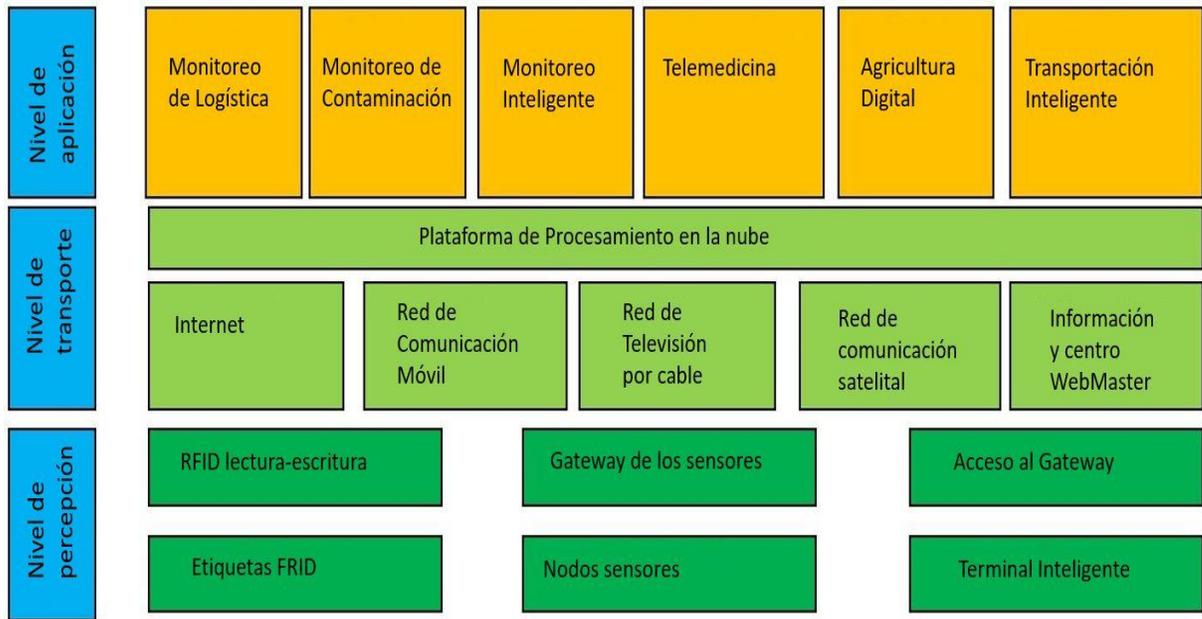


Figura 1.10 Arquitectura de IoT.

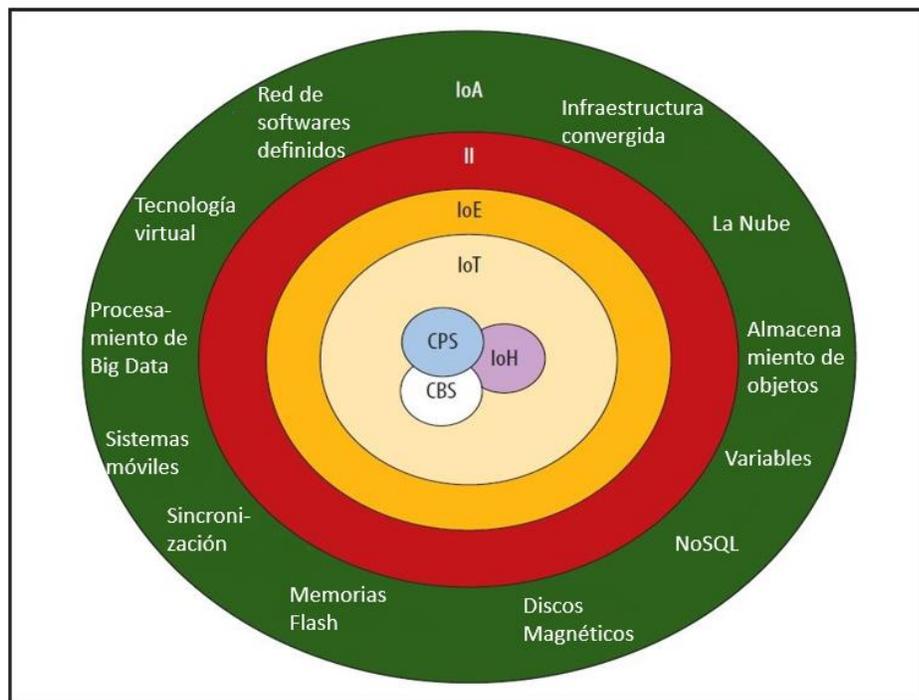


Figura 1.11 Ecosistema de Internet of Anything (IoA).

1.4.2 Sistemas Ciber-Físicos

Los sistemas ciber-físicos (Cyber-Physical Systems, CPS) se definen como tecnologías transformadoras para administrar sistemas que se interconectan entre sus activos físicos y capacidades computacionales (Baheti and Gill, 2011).

Los CPS constituyen una tecnología disruptiva que lleva la innovación a muchas industrias debido a su potencial para integrar tecnologías de diversos sectores, transformar procesos tradicionales en varias áreas de aplicación y permitir nuevos procesos.

Un CPS se comunica para lograr conectar sin problemas y controlar de forma remota los procesos de producción, los servicios de información disponibles a través de Internet de las cosas (IoT) y la computación en la nube. Con tecnologías avanzadas, los CPS pueden realizar una computación inteligente, como la administración predictiva autónoma, el mecanismo de autodiagnóstico/mantenimiento y la planificación colaborativa de la producción para el desempeño comercial.

En la figura 1.12 se muestra la arquitectura general de un CPS de cinco niveles y además se muestran los atributos de cada nivel.

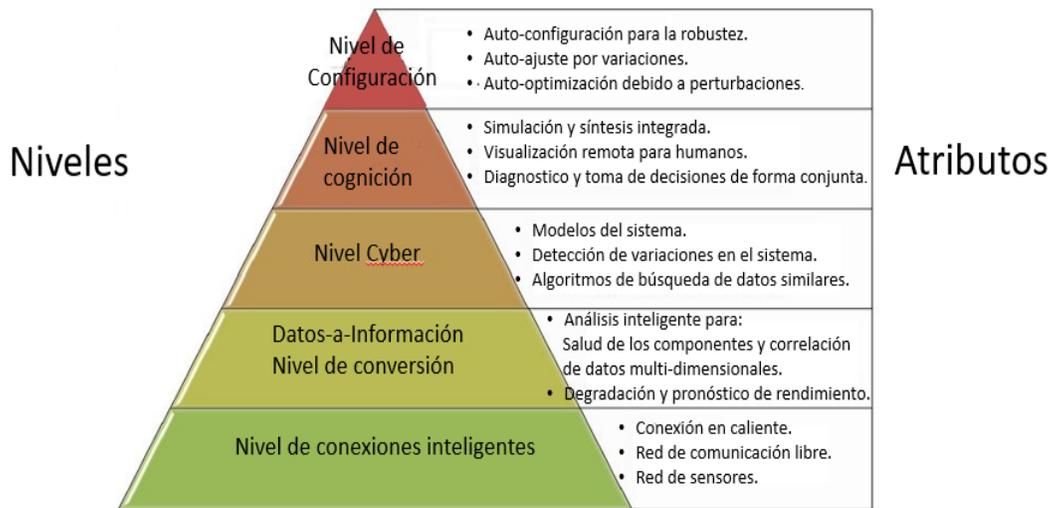


Figura 1.12 Arquitectura general de un CPS de 5 Niveles

Consideraciones Finales

- Se aprecia un notable incremento en la generalización de las novedosas tecnologías en los Sistemas de Monitoreo y Sistemas de Administración en la Agricultura de Precisión, no obstante su eficacia y sostenibilidad depende de las características propias de cada región o país y de otros muchos factores.
- Existen una gran variedad de sistemas y dispositivos de hardware, software y sistemas de comunicación con importantes potencialidades para la Agricultura de Precisión, donde para su eficaz implementación resulta determinante conocer sus ventajas y desventajas para cada esfera de aplicación.
- Los sistemas para el monitoreo en procesos agrícolas de mayor uso por los agricultores a nivel mundial que se basan en GPS, SIG y monitores de rendimiento debido a sus enormes potencialidades y fácil uso.

CAPÍTULO II. Tecnologías aplicables en el contexto de la Agricultura de Precisión.

Este capítulo estará dedicado a mostrar las características y potencialidades de cada una de las tecnologías empleadas para el monitoreo y administración en la Agricultura de Precisión, con vistas a contar con la mayor información a la hora de elegir qué tipo de sistema se empleará en una aplicación en específico.

2.1 Aplicaciones de los elementos empleados para el monitoreo en el contexto de la Agricultura de Precisión

A continuación, se enunciarán algunas de las aplicaciones más representativas de los elementos empleados en el monitoreo, mencionados en el capítulo anterior. Esto posibilita la elección de las tecnologías a emplear para el correcto monitoreo de los procesos agrícolas bajo estudio.

2.1.1 Aplicaciones de los Sistemas de Posicionamiento Global en el contexto de Agricultura de Precisión

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) hace posible registrar la variabilidad en el campo como datos codificados geográficamente. Es posible determinar y registrar la posición correcta continuamente. Esta tecnología considera las áreas agrícolas, campos más detallados que antes, por lo tanto, una mayor base de datos está disponible para el usuario. Los receptores de GPS, junto con los monitores de rendimiento, proporcionan coordenadas espaciales para los datos del monitor de rendimiento. Esto permite la elaboración de mapas de rendimiento de cada campo.

La información recopilada de diferentes datos satelitales y referenciada con la ayuda de GPS, se puede integrar para crear estrategias de gestión de campo para la aplicación de productos químicos, el cultivo y la cosecha (Liaghat and Balasundram, 2010). El desarrollo e implementación de la Agricultura de Precisión se lleva a cabo mediante la combinación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estas tecnologías permiten la recopilación de datos en tiempo real con información de posición precisa, lo que lleva a la manipulación y el análisis eficiente de grandes cantidades de datos geospaciales. Las aplicaciones que se basan en GPS en la Agricultura de Precisión se utilizan para la planificación de fincas, mapeo de campos, muestreo de suelos, guiado de tractores, exploración de cultivos, aplicaciones de tasa variable y mapeo de rendimiento.

Los sistemas de posicionamiento (GPS) se utilizan actualmente en muchas tareas agrícolas (Fulton and Darr, 2018, Lange, 2004). Especialmente, los receptores GPS con las correcciones diferenciales cinemáticas en tiempo real se emplean como sensores de navegación en equipos agrícolas donde pueden proporcionar una precisión a nivel de centímetros (Kise and Zhang, 2008, Rovira-Más et al., 2003). Sin embargo, el elevado coste de los sensores de navegación cinemáticos en tiempo real limita la comercialización de máquinas agrícolas guiadas de forma autónoma, tales como tractores y cosechadoras (Perez-Ruiz et al., 2013, Raffaelli et al., 2013). Además, en el caso de utilizar solo GPS convencionales, la navegación puede fallar o volverse poco confiable cuando las señales enviadas desde satélites están bloqueadas por obstrucciones tales como árboles o edificios. Gomez-Gil et al. (2013) Informan que una alternativa para reducir los errores sería la implementación del filtro de Kalman que podría reducir los errores de cuantificación en el posicionamiento de tractores equipados con receptores GPS de bajo costo en un 43%, así como la desviación estándar del ángulo de rumbo en un 75%.

Otra de las aplicaciones donde se usa el GPS es Ji et al. (2012) donde se diseña un método en tiempo real para medir el área cosechada. En esta investigación, se usa el GPS para medir la distancia operada de la cosechadora y el sensor ultrasónico para medir el ancho del cultivo. Otro método que se diseñó para la planificación de rutas óptimas, entre los cuales se emplea un procedimiento que se apoya en registros de rastreo GPS para calcular la superposición y evaluar la omisión de la operación de maquinaria agrícola es el que se muestra en Meng et

al. (2012). En este trabajo algunos índices de evaluación, incluida la tasa de superposición y la tasa de omisión, se diseñaron para indicar la calidad de la operación de la maquinaria agrícola. Sin embargo, sus autores informan que el cálculo es complejo y no se puede procesar en tiempo real. Para resolver los problemas anteriores, un sistema de monitoreo en tiempo real de la maquinaria agrícola es presentado en Xiang et al. (2016). La información de operación fue diseñada en base a ARM11 y GNSS. El sistema puede mostrar y guardar la información de posicionamiento en tiempo real, el límite del área de operación, etc. También puede analizar y calcular el área del campo total y el área completada, la velocidad de operación, la tasa de superposición, la tasa de omisión y otra información operativa.

Consideraciones sobre los GPS

Los receptores GPS ofrecen diferentes niveles de precisión. La precisión alcanzada con el sistema GPS básico es del orden de 5 a 10 m, lo cual se utiliza sólo en tareas de navegación para la elaboración de mapas de rendimiento o fertilización. Por otro lado, en la mayoría de los casos, la determinación de la posición sólo precisa del conocimiento de dos coordenadas (longitud y latitud). No obstante, en algunas ocasiones es necesario conocer una tercera coordenada, elevación, es lo que se conoce como Agricultura de Precisión 3D.

Sin embargo, para poder obtener una precisión compatible con la mayoría de las operaciones agrícolas se necesita disponer, además de la señal GPS, de una señal de corrección. Se habla entonces de GPS diferencial o DGPS (Differential Global Positioning System), con el que se consiguen precisiones inferiores a 1 m, habitualmente entre 30 y 50 cm, en función del equipamiento utilizado y del tipo de señal de corrección, siendo las más frecuentes la emitida por la banda FM o a partir de un satélite específico. Correcciones diferenciales de pago proporcionadas por empresas (Omnistar, Starfire, etc.) reducen el error.

Existe otra alternativa que incrementa notablemente la precisión en la determinación de la posición. Se trata del RTK (Real Time Kinematic) o GPS cinemático. Para la realización de determinadas labores en campo, como el trabajo entre líneas de cultivos, la siembra, el control de solapamientos y la conducción de maquinaria, la resolución alcanzada por el DGPS tampoco es suficiente. Se necesita en estos casos precisiones a nivel de centímetros (entre 1 y 5 cm) y no únicamente en relación con la posición horizontal, sino en las tres dimensiones. El GPS cinemático determina la posición exacta del móvil midiendo el desfase entre la

transmisión y la recepción de una señal. Sin embargo, la utilización de esta modalidad no está demasiado extendida en la agricultura debido, entre otros motivos, a los riesgos de pérdida de señal en determinadas circunstancias. Además, para el correcto funcionamiento del sistema es necesaria la actuación de como mínimo cinco satélites, lo que en determinados momentos no está siempre garantizado. Sin embargo, las características y ventajas potenciales que ofrece el RTK-GPS inducen a prever una generalización en su uso en un futuro próximo.

En ciertas aplicaciones como las agrícolas no se necesitan posiciones absolutas sino relativas, en este caso la precisión en este posicionamiento relativo es mucho mayor si las medidas se hacen en instantes de tiempo cercanos. De esta forma, para tiempos menores a cinco minutos, un receptor GPS económico con posicionamiento absoluto puede dar errores inferiores al metro. Al aumentar el intervalo de tiempo entre el que se hacen las medidas, el error relativo aumenta.

El precio de estos dispositivos es un aspecto importante a considerar. Los precios de los dispositivos GPS convencionales como el Haicom 204III y el St-906w de Sinotrack ideales para el seguimiento de flotas con precisiones de entre los 5 y 10 m tienen un precio de alrededor de 50-60 USD, mientras que los GPS con corrección diferencial con precisiones por debajo de un metro cuestan más de 1000 USD, los que más se utilizan en la agricultura tienen un precio de entre 2500 y 3500 USD y por último los dispositivos GPS más precisos los RTK GPS con precisiones a nivel de centímetro tienen un precio que oscila entre los 15 000 y 30 000 USD.

2.1.2 Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica en el contexto de Agricultura de Precisión

La introducción de SIG promovió estudios interdisciplinarios, tanto dentro de las ciencias naturales, ambientales, sociales y económicas. Sus aplicaciones se expanden rápidamente en paralelo con los avances en la detección remota y proporcionan infraestructura para el examen de problemas espaciales complejos de formas nuevas y emocionantes (Asadi et al., 2012). SIG demostró ser una herramienta efectiva en el manejo de datos espaciales disponibles en diferentes escalas, voluminosos datos de puntos para realizar un análisis integrado de los mismos sobre diversos recursos de cualquier región y para llegar a

soluciones óptimas para diversos problemas. Varios autores informan las aplicaciones de SIG en el inventario de recursos del suelo (Dwivedi, 2001, Dobos et al., 2000); clasificación de la capacidad del suelo (Sachin, 2011, Rosser et al., 1974); evaluación de la idoneidad del suelo (Srivastava and Saxena, 2004); evaluación de la productividad de la tierra (Patil et al., 2010, Evans and Nizeyimana, 1998) y cuantificación de la pérdida de suelo. SIG juega un papel significativo en la gestión de los recursos naturales, protección del medio ambiente, planificación y desarrollo regional y urbano, además de la gestión de servicios públicos. SIG transforma el sector agrícola de maneras increíbles, las imágenes hiperespectrales y multiespectrales obtenidas, a través de los datos geoespaciales se utilizan para analizar parámetros como la salud del cultivo y la humedad del suelo. El SIG soporta altos niveles de toma de decisiones para el manejo efectivo de fertilizantes y pesticidas, mapeo del estrés e irrigación. Atributos biofísicos de cultivos y suelos se utilizan con tecnologías SIG y RS para la mejora radical de la productividad agrícola.

Dentro de las potencialidades de SIG para la Agricultura de Precisión, podemos mencionar:

- Búsqueda y selección de sitios: SIG puede almacenar, recuperar, analizar y mostrar información de acuerdo a las especificaciones del usuario, lo que es muy útil para la búsqueda avanzada de sitios y decisiones de selección.
- Asignación de recursos: el SIG se utiliza para el uso de la tierra y su clasificación (LULC). La asignación de recursos se utiliza a menudo para estimar la utilización y asignación de un recurso. Por ejemplo, potencial de agua subterránea y estimaciones de rendimiento de cultivos.
- Evaluación de impacto: se utilizan técnicas de evaluación de impacto para evaluar el impacto de una actividad prolongada durante un período específico. Muchos estudios utilizan SIG en la evaluación de impacto de eventos específicos en la productividad agrícola.
- Ubicación-Asignación: Esta pertenece a la aplicación de SIG en segregación de un lugar para realizar una actividad. La mayoría de las actividades de planificación del sitio involucran la asignación de la ubicación.
- Sistemas basados en el conocimiento: estos sistemas combinan diversas fuentes de información y proporcionan vistas sobre la información proporcionada. El resultado es una imagen que se utiliza para proporcionar soluciones al problema en perspectiva.

Consideraciones sobre SIG

Los SIG para su funcionamiento dependen de cuatro elementos fundamentales que los componen, estos son: Datos, Procedimientos, Recursos Humanos, Tecnologías complementarias y Visualización. A continuación, se describen.

Datos

Los datos constituyen la materia prima de un SIG, por lo que su correcto almacenamiento y gestión es de vital importancia. Son necesarios entonces servidores capaces de almacenar la información en forma de bases de datos y además un gestor de bases de datos potente para la gestión de la información como lo son PostgreSQL, Oracle Database, Microsoft SQL Server, Cassandra entre otros.

Procedimientos

Los procedimientos son las metodologías que se emplean en la captura, corrección y almacenamiento de datos, en la elaboración de la información y en el desarrollo de los productos finales de información. Ya que los datos constituyen el elemento más importante de los SIG, se hace evidente la importancia de la obtención de datos de gran calidad.

Recursos Humanos

En un proyecto con la envergadura de un proyecto SIG es crítico contar con el personal profesional que dirige y asimila la transferencia de la tecnología SIG. Se recomienda que el profesional tenga conocimientos de materias como: Fundamentos básicos sobre SIG, Gerencia de SIG, Diseño e implementación de un sistema gestor de bases de datos (DBMS) para SIG, Desarrollo de aplicaciones para SIG fundamentados en Macro Lenguaje y en Programación de Sistemas.

Tecnologías complementarias

Dentro de este elemento figuran tanto los componentes de hardware como el software que se ejecuta en los mismos. Elementos de hardware que se emplean comúnmente en los SIG son ordenadores personales, estaciones de trabajo y servidores. Los requerimientos de hardware para el proyecto se definen una vez que se decida la envergadura del proyecto SIG.

Por otra parte, dentro del software se encuentran aplicaciones como los programas SIG que permiten la visualización y gestión de la información geográfica como lo son el GRASS, el ArcView, el QGIS entre otros; además aplicaciones para la gestión de las bases de datos donde se almacena de forma ordenada la información (PostgreSQL, Oracle Database, Microsoft SQL Server, etc.). Entre las características más importantes a tomar en cuenta a la hora de seleccionar algún programa SIG para el desarrollo del proyecto se encuentran: necesidad del empleo de softwares libres potentes a la hora de analizar y procesar imágenes, que tengan soporte a escala global y sea flexible a la hora de integrar datos de diferentes fuentes.

2.1.3 Aplicaciones de las plataformas de Teledetección en el contexto de la Agricultura de Precisión

En los países en desarrollo, los altos costos asociados al equipo satelital pueden ser un elemento disuasorio para utilizar la teledetección en la Agricultura de Precisión. Sistemas de adquisición de imágenes de bajo costo y baja altitud, sin embargo, tienen el potencial para hacer la Agricultura de Precisión factible para pequeñas y medianas explotaciones. La principal ventaja de la teledetección de baja altitud es el bajo costo de adquisición. Estos sistemas pueden cubrir de 1 a 56 kilómetros cuadrados de superficie terrestre en pocos minutos. Las investigaciones utilizan los índices vegetativos para obtener información relevante a partir de imágenes y luego realizar análisis para estimar la producción, detectar malezas y contar el número de plantas, entre otras aplicaciones (Liaghat and Balasundram, 2010).

En Brasil, investigadores construyeron un sistema dirigible híbrido como una solución económica para el sensado remoto. Tales plataformas tienen varias desventajas como la necesidad de operación manual y la imposibilidad de vuelo ante condiciones de lluvia o viento fuerte.

Una gran cantidad de investigaciones se dedican al desarrollo de aplicaciones para la detección y el clasificado de imágenes capturadas por vehículos aéreos no tripulados (UAVs por sus siglas en inglés). Cámaras térmicas y multiespectrales se utilizan juntos a bordo de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para estimar un rango de propiedades de la planta relacionadas con eficiencia fotosintética y estrés hídrico. Sin embargo, el tamaño, el peso y

los costos de las imágenes multimodales existentes en los sistemas inhiben el despliegue a gran escala del UAV a bordo. Es, por lo tanto, deseable desarrollar una unidad portátil, de bajo costo, compacta y sistema de imágenes ligero junto con ágiles metodologías de despliegue para ayudar a los agricultores a observar granjas de manera efectiva.

Tradicionalmente, los satélites de detección y los vehículos aéreos de gran-altitud permiten a los científicos mapear grandes tierras de cultivo y bosques mediante la adquisición de imágenes multiespectrales y datos estructurales en 3-D. Sin embargo, los datos de estas plataformas carecen de la resolución espacio-temporal necesario para la Agricultura de Precisión (Lan et al., 2010).

Los vehículos terrestres no tripulados (UGV) pueden llevar una variedad de sensores voluminosos como el LiDAR para mapeo volumétrico, así como radar de penetración en el suelo y sensores de conductancia eléctrica para la cartografía precisa del suelo. Sin embargo, debido a las limitaciones de movilidad de estos vehículos, en las granjas no es factible usar UGV para una rápida y persistente vigilancia. Además, los vehículos terrestres son intrusivos, por lo que se afirma que el mapeo denso de huertos y viñedos es una tarea que se realiza mejor por plataformas aéreas y sensores de mano (Das et al., 2015). En los últimos años, los escáneres LiDAR montados en vehículos terrestres y tractores se utilizan para extraer propiedades morfológicas como el dosel, volumen y área foliar (Arnó et al., 2013).

Consideraciones sobre plataformas de teledetección

En Teledetección como se explica anteriormente existe 3 tipos de plataformas que se emplean en la captura de datos, estas son las plataformas terrestres (vehículos terrestres con tecnología LiDAR), aéreas o suborbitales (vehículos aéreos tripulados o remotos que emplean cámaras multiespectrales) y las plataformas orbitales (satélites artificiales como el LANDSAT, SPOT y Sentinel con sensores para la teledetección). Los elementos a considerar en cuanto a la elección de alguna de estas plataformas son:

- Factor económico.
- Resolución espacial.
- Resolución temporal.
- Resolución radiométrica.

- Resolución espectral.

Factor económico

Constituye un aspecto importante a considerar a la hora de implementar cualquier tecnología. Dentro de cada una de las plataformas mencionadas anteriormente existen diferencias entre los precios para la adquisición de la tecnología. Las plataformas orbitales resultan las más baratas ya que la obtención de datos de satélites como el Sentinel 2 es gratuita. Las plataformas terrestres y aéreas poseen costos similares en dependencia del tipo de tecnología que integran.

Resolución espacial

Consiste en el menor objeto detectable por el sistema sensor. En este aspecto las plataformas orbitales son las que menor resolución alcanzan, siendo la mejor la alcanzada por la plataforma orbital comercial IKONOS (propiedad de una empresa estadounidense) que es de 4×4 metros y el Sentinel 2 que es de 10×10 metros. Por supuesto las plataformas terrestres y aéreas alcanzan mucha mayor resolución.

Resolución temporal

Es la capacidad del sensor para detectar cambios temporales sufridos por una misma superficie de estudio. En las plataformas orbitales depende de la periodicidad de los satélites sobre un mismo punto, por otro lado, para las plataformas terrestres y aéreas no existe restricción alguna en este aspecto.

Resolución radiométrica

Indica la capacidad del sensor de diferenciar distintos niveles de intensidad de la radiación capturada.

Resolución espectral

Es la capacidad del sensor para distinguir diferentes longitudes de onda en la radiación electromagnética recibida. Para cada sensor empleado en teledetección el fabricante brinda el número de bandas y su anchura: los sistemas multispectrales constan de entre 2 y 10 bandas mientras que los hiperespectrales van desde las 10 bandas a más de 100.

2.1.4 WSN en Agricultura de Precisión

La exigencia del ambiente agrícola relacionadas con el monitoreo de variables en grandes extensiones geográficas, áreas inaccesibles y contextos hostiles, implican la aplicación de dispositivos inalámbricos, por lo que se destacan en este sentido las redes de sensores inalámbricos (Gascón, 2010).

A continuación, se muestran algunas de las potenciales aplicaciones agrícolas en las que se pueden implementar las mismas:

- Sistema de gestión de riego: hoy en día la agricultura requiere un sistema de gestión de riego para optimizar el uso del agua en aplicaciones agrícolas. La alarmante reducción del nivel de agua subterránea es otra motivación para el requisito de un sistema avanzado en este contexto, las técnicas de micro-riego y uso eficiente del agua son rentables. Sin embargo, la eficiencia de micro-riego puede ser mejorada si se basan en la información ambiental y del suelo. En este sentido, las WSN se aplican como la tecnología coordinadora.
- Monitoreo de sistemas agropecuarios: Actualmente, varios dispositivos y sistemas se utilizan en la agricultura. En este sentido, los dispositivos facilitan la operación en general, y habilita la automatización donde se aplique. Además, tales sistemas de monitoreo remoto contribuyen a mejoras en la gestión de grandes campos agrícolas.
- Control de plagas y enfermedades: El uso racional de pesticidas y fertilizantes ayuda a aumentar la calidad del cultivo, así como a minimizar el coste agrícola. Sin embargo, para controlar el uso de pesticidas, se necesita monitorear la probabilidad y ocurrencia de plagas en los cultivos. Para predecir esto, también es necesaria la información del clima circundante, tales como temperatura, humedad y velocidad del viento. Un WSN puede autónomamente monitorear y predecir estos eventos sobre un campo de interés.
- Uso controlado de fertilizantes: El uso de fertilizantes para la agricultura puede ser controlado al monitorear la variación en la nutrición del suelo, del nitrógeno (N), del fósforo (P), del Potasio (K) y del pH; en consecuencia, el equilibrio nutricional del suelo y la calidad en la producción de cultivos también se mantiene.

- Monitoreo del movimiento de ganado: un rebaño de ganado pastando en un campo puede ser monitoreado usando la tecnología WSN o el identificador de Radio Frecuencia (RFID). Asimismo, se logra el monitoreo en tiempo real de cualquier ganado. Esta tecnología puede ser implementada para monitorear si algún ejemplar se está moviendo cerca de los campos de vegetación o no.
- Monitoreo de la calidad del agua subterránea: El mayor uso de fertilizantes y los pesticidas tienden a disminuir la calidad del agua subterránea. La colocación de nodos sensores habilitados con comunicación inalámbrica ayuda en el monitoreo de la calidad del agua.
- Monitoreo de gases de efecto invernadero: los gases de efecto invernadero y la agricultura están estrechamente relacionados entre sí. Los gases de efecto invernadero son los responsables de aumentar la temperatura del clima y, por lo tanto, tiene un impacto directo en la agricultura. Por otro lado, la emisión de gases de efecto invernadero proviene de diversas fuentes agrícolas. Existen redes de sensores especializadas en la detección de estos gases.
- Seguimiento de activos: la tecnología inalámbrica habilitada para equipos agrícolas, posibilitan el seguimiento remoto de estos activos. Un agricultor puede rastrear la posición de los vehículos agrícolas y los sistemas de riego desde su casa o centro del trabajo.
- Control remoto y diagnóstico: con la llegada de internet de las cosas, son posibles el control remoto y el diagnóstico de equipos agrícolas tales como bombas, luces, calentadores y válvulas en las maquinarias.

Así mismo, se presentan las características más destacadas de las WSN que la convierten en una herramienta potencial para la automatización en el dominio agrícola. Estas son: capacidad de toma de decisiones inteligentes, configuración de topología dinámica, tolerancia a fallas en los nodos, capacidad de aprender del contexto circundante, alta escalabilidad, heterogeneidad de los nodos, tolerancia contra fallas de comunicación en condiciones ambientales adversas, modo de funcionamiento autónomo y seguridad de la información (Ojha et al., 2015).

Aspectos muy importantes a tener en cuenta a la hora de elegir los componentes de una WSN son: la elección del procesador, transceptor y capacidad de la memoria, así como la elección de nodos que requieran baja potencia de operación y de bajo costo (Ojha et al., 2015).

2.2 Aplicaciones de los Sistemas para el perfeccionamiento de la Administración en la Agricultura de Precisión

2.2.1 Sistemas de apoyo en la toma de decisiones (DSS)

Los denominados Sistemas de apoyo en la toma de decisiones ayudan a especialistas, investigadores y directivos en general a la correcta toma de decisiones en función de una eficaz administración para la AP. Posibilitan el manejo de los recursos naturales, prevención de plagas y epidemias, rápida respuesta a factores ambientales, manejo del riego, empleo sostenible de los recursos, maquinaria agrícola, etc. (Petropoulos et al., 2018, Navarro-Hellín et al., 2016).

Varios sistemas de apoyo a las decisiones programan el riego a intervalos predefinidos y aplican volúmenes de riego predefinidos. No incorporan ningún tipo de retroalimentación del sensor sobre el estado del agua de la planta, el estado del agua del suelo y las variables climáticas (Lozoya et al., 2014). Esta estrategia de "lazo abierto" está diseñada en gran medida según los datos heurísticas e históricos. Mareels et al. (2005) sugirieron que este es un enfoque ineficiente que a menudo conduce a un exceso de riego y desperdicio de fertilizantes y otros insumos suplementarios para los cultivos.

Las estrategias de riego en lazo cerrado tienen como objetivo regar: cuando el contenido de humedad del suelo alcanza un cierto umbral (Dabach et al., 2013, Liu et al., 2012, Vellidis et al., 2008); cuando los sensores de la planta indican un cierto umbral de estrés (O'Shaughnessy et al., 2012, Erdem et al., 2010) o con la retroalimentación de los modelos de simulación de cultivos con el objetivo de alcanzar un cierto rendimiento en la respuesta fisiológica del cultivo u objetivo económico (McCarthy et al., 2014). Estas estrategias de riego de lazo cerrado demuestran la mejora de la eficiencia del uso del agua en la producción de cultivos hortícolas en ambientes protegidos. Las condiciones ambientales en tales sistemas de producción se pueden controlar con la retroalimentación de la planta, lo que elimina la respuesta de la planta estocástica que se encuentra a menudo en la producción de cultivos a

escala de campo (Bennis et al., 2008). Chappell et al. (2013) informan un ahorro del 83% del agua para un sistema de control de riego de lazo cerrado implementado en la producción de cultivos protegidos. Señalaron que había menos casos de enfermedades de las plantas en el vivero debido a la eliminación del exceso de riego. Saavoss et al. (2016) informan un aumento del 65% en las ganancias debido a la implementación de un sistema de control de lazo cerrado basado en una red de sensores inalámbricos en un vivero. Los autores señalan que el aumento en las ganancias se debe a la mejora en la calidad de los cultivos y el rendimiento resultante del control preciso de las aplicaciones de riego.

En la producción de cultivos a escala de campo, las necesidades de los mismos varían con el tiempo y el espacio debido a factores bióticos y abióticos (Al-Karadsheh et al., 2002). En este sentido se informan que en estos sistemas de producción de cultivos, las estrategias de lazo cerrado no pueden explicar la dinámica desconocida de los cultivos, la naturaleza estocástica de las variables climáticas y la respuesta de los cultivos, además de la naturaleza variable del sistema de suelo-planta-atmósfera (McCarthy et al., 2013). Este último punto se debe especialmente al crecimiento de los cultivos, el manejo de los cultivos y la infestación de plagas y enfermedades.

Los sistemas de lazo cerrado tampoco pueden considerar el equipo y otras limitaciones operativas. McCarthy et al. (2010) concluye que un sistema óptimo de apoyo a la decisión debe ser "adaptativo" con la capacidad de acomodar la variabilidad temporal y espacial dentro del campo. El sistema de apoyo a las decisiones también debe tener la capacidad de modificar las decisiones de riego en respuesta a la fisiología del cultivo, las incertidumbres en los insumos climáticos, el suelo, los sistemas de riego y las limitaciones del suministro de agua, las consideraciones económicas y la calidad de la retroalimentación del sensor.

DSS Adaptativo:

Las características de un campo cultivado varían con el tiempo. Dentro de estos, las propiedades que típicamente variarán dentro y entre las estaciones incluyen el crecimiento de los cultivos, las propiedades del suelo (debido a la adición de nutrientes y otros procesos de manejo) y el clima. Esto tendrá una influencia directa en el tiempo de riego y el volumen requerido para el crecimiento óptimo del cultivo (Raine et al., 2011).

Un sistema de soporte de decisión adaptativo puede reajustar continuamente el algoritmo de programación de riego para conservar el rendimiento deseado del sistema de riego (McCarthy et al., 2010). El sistema de soporte de decisión adaptativo es capaz de utilizar datos de sensores históricos o en tiempo real para llegar a la sincronización y el volumen de riego que representan adecuadamente la variabilidad temporal y espacial en el campo (McCarthy et al., 2010).

En teoría de control, un sistema de control adaptativo generalmente se acepta como un sistema de control capaz de ajustar los parámetros de su controlador en función de la retroalimentación del sensor de un proceso, de modo que el proceso controlado se comporte de una manera deseable (Raine et al., 2011). McCarthy et al. (2014) señala que un sistema de soporte de decisión adaptativo para el riego puede estar basado en sensores si usan mediciones directas de sensores para la estrategia de riego o en modelos si usan un modelo de simulación calibrado para ayudar en las decisiones de riego.

El desarrollo de sistemas de apoyo de decisión adaptativos presenta una oportunidad para mejorar la sostenibilidad en el riego de precisión a través del uso mejorado del agua y la productividad del cultivo. También mejorarán las aplicaciones sinérgicas de los datos disponibles de los sensores de suelo, planta y clima para llegar a decisiones de programación de riego óptimas (McCarthy et al., 2014).

2.2.2 Modelos mecanicistas

Por otro lado, varios sistemas de apoyo a la decisión de irrigación se basan en modelos físicos complejos que se asemejan mucho al sistema físico real (Delgoda et al., 2016a). Pueden incorporar la representación fisiológica y morfológica de la planta en la herramienta de apoyo a la decisión. Barnard and Bauerle (2015) describieron un sistema de programación de irrigación que se basa en el modelo biofísico espacialmente explícito que acopla la fotosíntesis dentro del dosel y la conductancia estomática. Los datos sobre la temperatura de la hoja, la aerodinámica del dosel y las variables ambientales se utilizan como entradas en el modelo para predecir la transpiración de la planta. Informaron que la herramienta aplicaba entre un 18% y un 56% más de agua que un método de detección para programar el riego en cuatro especies. Sin embargo, señalaron que el enfoque produjo un mayor crecimiento de árboles. Asher et al. (2013) describen un modelo mecánico capaz de inferir las necesidades

de agua de los cultivos. El modelo emplea datos de la temperatura de la hoja como entrada para determinar las características aerodinámicas del cultivo que luego se utilizan en la ecuación de Penman-Monteith para calcular la ET (Evotranspiración) real del cultivo. Un inconveniente importante de estos modelos mecánicos es que incluyen parámetros estáticos que, una vez identificados, se supone que permanecen constantes durante la temporada de cultivo. Esto rara vez ocurre en la práctica, ya que el sistema de cultivo varía con el tiempo debido a factores bióticos y abióticos.

2.2.3 Simulaciones

Los modelos de simulación de cultivos basados en los primeros modelos físicos de fenología de cultivos, física del suelo e hidrología, se pueden aplicar para simular la respuesta de los cultivos al sistema de gestión de riego y de crecimiento de cultivos (Delgoda et al., 2016a). Estos modelos de simulación brindan la oportunidad de evaluar el beneficio de varias estrategias de riego de precisión, ya que eliminan la necesidad de experimentos de campo que requieren mucho tiempo (Jones et al., 2003). Pueden interconectarse a la retroalimentación de sensores en tiempo real (sensores de suelo o planta y datos meteorológicos) para determinar los requisitos diarios de riego de los cultivos. También pueden usarse para predecir el impacto en el rendimiento de una estrategia de riego. Esto se logra empleando datos de pronóstico del tiempo para calcular el balance diario de humedad del suelo y evaluar el impacto de los déficits de humedad del suelo en el crecimiento del cultivo (Jones et al., 2003). DeJonge et al. (2007) y colaboradores investigaron el efecto del manejo de riego de tasa variable en la producción de maíz en Iowa utilizando el modelo de maíz CERES. El rendimiento del maíz se comparó durante un período de 28 años en escenarios simulados de no riego, riego uniforme programado e irrigación de precisión. No informaron diferencias significativas en el rendimiento del maíz y el uso de agua entre los escenarios de riego uniforme y de riego de precisión. Por su parte, Thorp et al. (2008) describe una metodología para aplicar el modelo de crecimiento de cultivos del Sistema de Apoyo a la Decisión para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT) en el análisis de las prácticas de manejo de tasas variables que incluyen el riego en el crecimiento y rendimiento de los cultivos. La plataforma permitió la evaluación de estrategias de riego de precisión en el rendimiento del cultivo en zonas de manejo predefinidas.

Sin embargo, estos sistemas son incapaces de soporte de decisiones en tiempo real y solo pueden aplicarse usando datos históricos.

McCarthy et al. (2010) proponen un marco de simulación, VARIwise, capaz de soporte de decisiones en tiempo real en el riego de precisión. El marco de simulación es capaz de incorporar la entrada de datos en tiempo real de los sensores de campo para llegar a las decisiones de riego. La combinación de diferentes entradas de sensores en el marco de simulación permite un soporte de decisión adaptable con el sistema capaz de reajustar las decisiones de riego basadas en la retroalimentación de la planta y también explorar estrategias de control óptimas.

Los modelos de simulación para uso en el soporte de decisiones de riego requieren una calibración y validación extensas para establecer la precisión del modelo. La limitación en los datos disponibles para este esfuerzo a menudo limita el uso de las plataformas a cultivos específicos.

2.2.4 Inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) es una disciplina académica relacionada con la teoría de la computación cuyo objetivo es emular algunas de las facultades intelectuales humanas en sistemas artificiales. Con inteligencia humana nos referimos típicamente a procesos de percepción sensorial (visión, audición etc.) y a sus consiguientes procesos de reconocimiento de patrones, por lo que las aplicaciones más habituales de la IA son el tratamiento de datos y la identificación de sistemas (Benítez et al., 2014).

La Agricultura de Precisión utiliza la IA para generar técnicas precisas y controladas que ayudan a proporcionar orientación y comprensión sobre el manejo del agua y los nutrientes, los tiempos óptimos de cosecha y siembra, así como cuándo serían los momentos adecuados para la rotación de cultivos. Estos procesos hacen que la agricultura sea más eficiente e incluso puede ayudar a predecir el ROI en cultivos específicos en función de sus costos y margen dentro del mercado.

Si bien IA no eliminará los empleos de los agricultores humanos, si mejora sus procesos y proporciona formas más eficientes de producir, cosechar y vender cultivos.

La inteligencia artificial presenta el potencial de resolver problemas en el riego de precisión que son complejos, no lineales y mal definidos (Hardaha et al., 2012). Se utiliza para implementar el soporte de decisión adaptable en el riego en forma de Redes Neuronales Artificiales (ANN), lógica Fuzzy y Sistemas Expertos con éxitos variados hasta la fecha (Hardaha et al., 2012, Prasad and VINAYA, 2007, Jones et al., 2003).

Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales (ANN) son estructuras de mapeo no lineales empleadas en el modelado cuando la relación de datos subyacente no está bien definida. Los ANN pueden identificar y aprender las correlaciones entre los datos de entrada y los valores de salida correspondientes. Pueden predecir el resultado de nuevos conjuntos de datos independientes, lo que los convierte en una herramienta útil en el modelado predictivo (Kasslin et al., 1992).. Estas redes también son de naturaleza adaptativa y pueden aprender continuamente para brindar soluciones óptimas a problemas específicos en sistemas dinámicos.

Karasekreter et al. (2013) implementan una ANN para programar el riego en un huerto de fresas, utilizan la humedad del suelo y sus propiedades físicas como entradas modelo. El sistema logra un ahorro del 20,5% de agua y de 23,9% de la energía. Sin embargo, los ANN requieren grandes conjuntos de datos para la capacitación y no pueden describir la dinámica física de un sistema. Esto hace que su uso sea limitado en las herramientas de soporte de decisiones en tiempo real.

Lógica Fuzzy

La lógica Fuzzy es un algoritmo de inteligencia artificial que se puede usar para modelar un proceso y relacionarlo con la experiencia humana para llegar a decisiones. Un sistema de lógica Fuzzy está formado por un conjunto que se usa para clasificar los datos de entrada en clases de membresía, una regla de decisión que se aplica a cada conjunto, que culmina en una salida de decisión de tipo humano del sistema (Mousa et al., 2014). Una descripción detallada del proceso se da en (Patil and Desai, 2013).

Mousa et al. (2014) aplican con éxito un modelo de lógica difusa para programar el riego en sistemas de riego por goteo y aspersion utilizando ET, datos de humedad del suelo y etapa de crecimiento del cultivo como datos de modelo. Por su parte. Giusti and Marsili-Libelli

(2015). describen un sistema de soporte de decisión de riego adaptativo implementado con lógica difusa. El sistema incorpora un modelo predictivo de la humedad del suelo y un sistema de inferencia para mantener la humedad del suelo dentro de un umbral aceptable. El sistema adapta las decisiones de riego a la incertidumbre de la lluvia y produjo un ahorro de agua de 13.5% durante un período de simulación de 168 días.

La precisión de los sistemas de lógica difusa está en gran parte vinculada a un conocimiento profundo del sistema. También carecen de una estructura mecánica interna con el dominio de la aplicabilidad limitado a la gama de datos de entrenamiento utilizados en su configuración. En este contexto Delgoda et al. (2016a) sugieren que los puntos mencionados hacen que la toma de decisiones con un sistema difuso sea un proceso ad hoc que limita su aplicación en el soporte de decisiones adaptativas.

Sistemas expertos

Un sistema experto es una herramienta capaz de emular el proceso de razonamiento que un experto humano emplearía en un proceso de toma de decisiones en su campo de experiencia. Captura la experiencia humana en la toma de decisiones y las heurísticas que lo representan en una serie de reglas y hechos (Plant et al., 1992). Un sistema experto generalmente consiste en un componente de base de conocimientos y un motor de inferencia que actúa como una herramienta de razonamiento (Singh and Sharma, 2014).

Los sistemas expertos se adaptan especialmente a problemas dinámicos que son de naturaleza compleja. También son adecuados para tratar con datos incompletos e inciertos (Rani and Rajesh, 2013). Esto los hace muy adecuados para el apoyo a las decisiones de riego, que a menudo requiere la participación de expertos para llegar a decisiones óptimas. Los sistemas expertos aplicados en el soporte de decisiones de riego pueden clasificarse como 'sistemas expertos propiamente dichos' o sistemas expertos híbridos. En (Rani and Rajesh, 2013, Mohan and Arumugam, 1997) se presenta una revisión detallada sobre la aplicación de sistemas expertos en el soporte de decisiones de riego. La clase de las herramientas de apoyo para la toma de decisiones para el riego en los "sistemas expertos", programa el riego en función de la humedad del suelo y los datos climáticos. No pueden considerar la naturaleza variable del sistema de cultivo (crecimiento de los cultivos, infestación de enfermedades y plagas) para llegar a decisiones óptimas de riego. Tampoco pueden dar cuenta de la

naturaleza estocástica de las variables climáticas y no son adecuadas para aplicaciones en tiempo real (Mohan and Arumugam, 1997). Los sistemas expertos híbridos, que también se conocen como sistemas expertos basados en modelos, combinan técnicas algorítmicas y un componente basado en el conocimiento para resolver problemas relevantes para su dominio de aplicación. Su ventaja en el riego es que la decisión óptima de riego se puede tomar combinando el conocimiento experto con la retroalimentación de datos de sensores en el campo, modelos impulsados por datos y modelos de simulación de cultivos (Rani et al., 2011).

Goumopoulos et al. (2014) desarrolla una plataforma de soporte de decisión adaptativa basada en un sistema experto para el riego específico de zonas de plantas de fresa. El sistema incluye una red de sensores inalámbricos de sensores de suelo, clima y plantas que proporcionan información para el sistema de apoyo a la toma de decisiones. También incluye un proceso de aprendizaje automático capaz de inferir nuevas reglas y ampliar la base de conocimientos a partir de conjuntos de datos registrados. Se informó que el sistema redujo el consumo de agua de riego en alrededor del 20%.

El rendimiento de un sistema experto depende en gran medida de la efectividad del proceso de adquisición de conocimiento. Un error en este proceso afectará drásticamente la fiabilidad del sistema y su rendimiento.

2.2.5 Control de aprendizaje

Las estrategias de apoyo a la toma de decisiones de control de aprendizaje realizan la identificación de sistemas mediante la retroalimentación del sensor sin definir un modelo matemático (McCarthy et al., 2013). La identificación de sistemas modela un sistema dinámico que se basa en una serie temporal de datos de entrada/salida medidos (Adeyemi et al., 2017). En Chen and Chang (2008) se presenta una visión general completa de la teoría de la identificación de sistemas. El control de aprendizaje iterativo se puede aplicar en sistemas con modelos mal definidos que operan repetitivamente y asumen la misma condición inicial después de cada iteración. Se adapta bien al problema del riego, ya que la programación y aplicación del riego es un problema repetitivo durante la temporada de cultivo. La naturaleza variable en el tiempo del sistema suelo-planta-atmósfera también puede verse como un problema mal definido. La estrategia también puede mejorar el

rendimiento del sistema al eliminar los efectos de una perturbación repetitiva con dinámicas no definidas. Aplicado al riego, esto puede ser una respuesta medida del cultivo que vuelve a ocurrir como consecuencia del riego. Los cambios temporales en el uso del agua del cultivo y las condiciones climáticas no se consideran (McCarthy et al., 2013).

McCarthy (McCarthy et al., 2010) señala que un inconveniente del enfoque de aprendizaje iterativo puede ser la identificación ineficiente de los sistemas como resultado de la dinámica lenta del sistema de cultivos en respuesta a los eventos de riego. Esto resulta de la evaluación del efecto de un solo volumen de riego en la respuesta de la planta en cualquier evento de aplicación de agua. Ellos sugirieron que este inconveniente puede ser eliminado aplicando el proceso del control iterativo de ascenso de colinas. Esta estrategia de control de aprendizaje emplea un proceso de identificación variado y adaptativo. Se aplica una gama de volúmenes de irrigación en cada evento de irrigación a una cantidad de celdas de prueba en el campo. La respuesta en la celda de prueba que mejor se adapta al rendimiento del sistema deseado se identifica como el proceso de riego óptimo. Informaron que el procedimiento de control iterativo de la escalada de colinas era capaz de maximizar el rendimiento del algodón cuando se utiliza con una combinación de sensores de planta y suelo para proporcionar información sobre el procedimiento de identificación.

Sin embargo, sus conclusiones se basaron en los resultados de un estudio de simulación y no se informó una validación del procedimiento basada en el campo. Los resultados del procedimiento de control de aprendizaje se basan únicamente en las mediciones del sensor y pueden verse afectados en gran medida por la deriva del sensor, ya que el modelo de respuesta del cultivo no se desarrolla a partir del procedimiento de identificación. Este método puede considerarse más como un enfoque de “fuerza bruta” que un enfoque con base científica para programar el riego.

2.2.6 Control predictivo del modelo

El control predictivo del modelo (MPC) es un enfoque de control industrial que se emplea en el soporte de decisiones para problemas multivariables a gran escala con múltiples restricciones (Saleem et al., 2013). El control predictivo del modelo emplea un modelo de planta y un algoritmo de optimización para calcular las entradas de la planta con el fin de lograr un valor futuro de un criterio de rendimiento. El rendimiento del sistema se predice en

un horizonte finito sujeto a restricciones tanto en las entradas como en las salidas de la planta (Lozoya et al., 2014). Los lectores están dirigidos a (Saleem et al., 2013, Qin and Badgwell, 2003, Froisy, 2006) para una revisión en profundidad de la teoría del control predictivo del modelo y su aplicación en diversas industrias.

En el caso de la irrigación, cuando se aplica un modelo de balance de humedad del suelo, la entrada de la planta será la cantidad de irrigación, la producción de la planta será el déficit de humedad del suelo y tanto la ET del cultivo como los valores de precipitación se considerarán perturbaciones ya que no se pueden controlar.

Se requiere una predicción de futuros valores de entrada y perturbaciones en un sistema MPC para determinar la salida óptima del sistema (Delgoda et al., 2016a). Esto resalta la necesidad de incorporar datos de pronóstico del tiempo en el marco de MPC para el apoyo a las decisiones de riego.

El control predictivo del modelo parece estar bien adaptado al dominio del soporte de decisiones de riego. El problema del riego tiene restricciones de entrada en términos de volumen óptimo de riego y restricciones de salida en términos de los umbrales de humedad del suelo y la respuesta deseada de la planta a los déficits de agua (Saleem et al., 2013). (Lozoya et al., 2014, Saleem et al., 2013, Ooi et al., 2008) describieron un modelo de marco de control predictivo para la programación de riego basado en un modelo de balance de humedad del suelo. Emplearon un procedimiento de identificación del sistema para generar un modelo de caja gris del sistema suelo-planta-atmósfera con una red de sensores de humedad del suelo que proporcionan retroalimentación en tiempo real al algoritmo de control. Todos informaron sobre la capacidad de la plataforma de MPC para predecir de manera suficiente las necesidades de riego de los cultivos y también las observaciones de importantes ahorros de agua. Sin embargo, los autores de los sistemas discutidos no tienen en cuenta la naturaleza estocástica de la lluvia y el uso del agua de los cultivos en la dinámica del sistema. Delgoda et al. (2016b) señala que una consideración adecuada de la incertidumbre en la lluvia y los insumos de ET en el modelo de balance de agua empleado en el marco de MPC mejorará la capacidad del sistema de MPC. Se abordan además los inconvenientes señalados en los marcos de MPC anteriores al emplear el control de retroalimentación afín a la perturbación, una técnica de modelado de incertidumbre

ampliamente aplicada en MPC para tener en cuenta la naturaleza estocástica de la lluvia y el uso del agua en los cultivos. Se incluye un modelo de orden simple de la dinámica de la humedad del suelo en el sistema para permitir el cálculo en línea de los parámetros del modelo, lo que explica la naturaleza variable en el tiempo del sistema suelo-planta-atmósfera. Los autores informaron un rendimiento óptimo del sistema en regiones húmedas donde existen incertidumbres considerables en las variables climáticas.

2.3 Aplicaciones de las tecnologías para la integración de los elementos de Monitoreo y Administración.

2.3.1 IOT y CPS en Agricultura de Precisión

La Agricultura de Precisión se descuida regularmente con respecto a los casos de negocios para las aplicaciones de IoT. En cualquier caso, hay numerosos artículos disponibles destinados a agricultores innovadores (Bhanumathi and Kalaivanan, 2019, Ferrández-Pastor et al., 2016). Algunos de ellos utilizan un sistema de sensores agudos para detectar diferentes condiciones comunes, por ejemplo, la adherencia, la temperatura del aire y la calidad del suelo (Nagib and Hamza, 2016, Paraforos et al., 2016). Otros se utilizan para automatizar estructuras de sistemas de agua (Parameswaran and Sivaprasath, 2016, Dlodlo and Kalezhi, 2015).

Otra de las plataformas que se emplean en aplicaciones de AP para lograr la integralidad de diversas tecnologías son los CPS. Esos sistemas son considerados por algunos investigadores como la tecnología clave para lograr implementar la AP (An et al., 2017). En la bibliografía se informa de sistemas automatizados de riego que integran las WSN con un sistema de riego de pivote central empleando CPS (Dong et al., 2013), otra de las aplicaciones es el CPS diseñado por Rad et al. (2015) donde se integran sensores a nivel del terreno, UAVs y UTV, GPS, SIG y DSS para lograr un sistema de gestión para el cultivo de la papa en Rumanía.

Los CPS constituyen una de las bases de IoT, es esta una de las razones de que a veces sea difícil diferenciar el uno del otro. Las diferencias entre estas tecnologías pueden ser consultadas en (Misic and Misic, 2014).

Debido a las semejanzas de las IoT y los CPS las aplicaciones y las consideraciones del empleo son similares para ambos y son las que se exponen a continuación.

Monitoreo de las condiciones climáticas: probablemente los dispositivos de horticultura más famosos son las estaciones climáticas, que se unen a diferentes sensores de cultivo. Situados sobre el campo, reúnen diferente información de la tierra y la envían a la nube. Las estimaciones dadas se pueden utilizar para delinear las condiciones de la atmósfera, seleccionar las cosechas adecuadas y tomar las medidas esperadas para mejorar su capacidad (por ejemplo, cultivo de precisión).

Automatización de invernaderos: a pesar de obtener información natural, las estaciones climáticas pueden modificar las condiciones para coordinar los parámetros dados. En particular, los marcos de mecanización de viveros utilizan un estándar comparativo

Gestión de cultivos: Estaciones climáticas, pueden establecerse en el campo para recopilar información explícita que permitan mejorar la calidad del cultivo; desde la temperatura y la precipitación hasta el potencial hídrico de las hojas, etc. Por lo tanto, se puede evaluar el desarrollo de la cosecha y cualquier inconsistencia para enfrentar cualquier enfermedad o invasión que pueda dañar su rendimiento.

Monitoreo y manejo de ganado: al igual que la observación de productos, hay sensores de horticultura que se pueden emplear en los animales de una granja o entidad pecuaria para evaluar su bienestar y realizar una confección de registros. Estos sensores emplean las plataformas IoT o los denominados CPS para comunicarse con las capas superiores. Esto funciona de la misma manera que los gadgets de IoT para el cuidado de mascotas. Por ejemplo, SCR de Allflex y Cowlar (Evans, 2011) utilizan sensores de agronegocios inteligentes (etiquetas de cuello) para transmitir experiencias de temperatura, bienestar, movimiento y sustento en cada bovino individual como datos agregados sobre el grupo.

Consideraciones sobre IoT y CPS

A continuación, se analizan los diversos factores a tener en cuenta a la hora de desarrollar aplicaciones que se basan en IoT:

- Autonomía: las aplicaciones deben ser totalmente autónomas para poder obtener mayores beneficios según los requerimientos específicos de estas.
- Costo: las soluciones de bajo costo son deseables para el crecimiento y el uso de aplicaciones que se basan en CPS e IoT, por lo que se necesita realizar un análisis

crítico sobre cada componente que posibilite la elección de la tecnología adecuada para este aspecto.

- **Energía:** las técnicas de computación ecológica deben difundirse con la agricultura actual que se basa en IoT, donde los dispositivos IoT consumirán una cantidad de energía mucho menor que puede aumentar su esperanza de vida y hacerlos menos defectuosos, por lo tanto, altamente productivos.
- **Inteligencia artificial:** el aprendizaje automático y las técnicas de inteligencia artificial se deben implementar en conjunto para cubrir las funcionalidades de análisis predictivo y de comportamiento mediante el empleo de un sistema avanzado de soporte de decisiones y evaluaciones en tiempo real.
- **Portabilidad del sistema:** se debe mejorar el aspecto de la variedad de arquitecturas actuales del sistema que sean lo suficientemente solicitadas según los aspectos particulares de los requisitos agrícolas.
- **Robustez:** la arquitectura del sistema debe ser robusta y tolerante a fallas para que las aplicaciones puedan ser sostenibles en su operación.
- **Bajo mantenimiento:** la participación en el mantenimiento en diferentes áreas al mismo tiempo crea un gran problema. Por lo tanto, es necesario diseñar un sistema de bajo mantenimiento que pueda realizar las tareas automáticamente sin intervención humana de manera optimizada.
- **Portabilidad:** la portabilidad es un factor importante que puede aumentar la dificultad en el manejo del sistema. Por lo tanto, se pueden usar equipos de tamaño portátil como SoC (Sistema en chip), SiP (Sistema en paquete), etc. para entregar el producto final.

2.4 Estado actual de los sistemas de monitoreo en el contexto cubano

En Cuba el desarrollo de sistemas de monitoreo en la agricultura aún es incipiente. Los trabajos investigativos sobre este tema y en este contexto hasta el año 2012 se enfocaban en el monitoreo de aplicaciones de logística (Lora Cabrera et al., 2012), levantamiento de destrozos en las cosechas luego del paso de desastres naturales (Batista, 2006) y algunos proyectos sobre aplicaciones de técnicas de AP en la caña de azúcar (Esquivel et al., 2008) .

En el presente quinquenio se ha impulsado el uso de sistemas de monitoreo en aplicaciones más relacionadas con procesos agrícolas tan importantes como el riego y fertirriego, planificación y control de la cosecha, detección de plagas entre otros. La Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas juega un papel protagónico en la investigación, desarrollo e implementación de estos sistemas por todo el país, se pueden destacar proyectos como (Avello Fernández, 2019) donde se diseña un sistema de supervisión y control remoto para el manejo eficiente de máquinas de riego de pivote central basado en tecnología inalámbrica y el empleo de autómatas programables; (Pérez García, 2019) donde su autor desarrolla un Sistema de Información Geográfica basado en software libre con la capacidad de gestionar la información relacionada con las técnicas avanzadas de cultivo aplicadas actualmente a la caña de azúcar en Cuba; (Zubizarreta Luján, 2017) donde se propone una solución para la automatización de riego distribuido basado en redes de sensores inalámbricos; (Pérez García, 2016) en este trabajo sus autores obtienen una metodología para extraer datos de cosecha en las cosechadoras Case IH A8000.

No obstante, en la literatura consultada un sistema para la Administración o manejo integral de la AP aún no se advierte en nuestro país, ni tampoco se han informado estudios acerca de las tecnologías más apropiadas a implementar, así como las arquitecturas de HW o SW que pudieran ser consideradas en este ámbito.

A pesar de ello el estado actual del nivel tecnológico del MINAG en cuanto a infraestructura de las TICs y acciones para impulsar el desarrollo de una Agricultura de Precisión en Cuba, se considera como propicio, ello viene avalado por los siguientes elementos que se mencionan a continuación:

- Telefonía IP: el MINAG cuenta con una pizarra Ericsson arrendada a ETECSA (modernizada en el 2018), capacidad para 5000 extensiones IP y 32 abonados por audio conferencia. Para el 2019 se prevé la compra de licencia para 1000 extensiones IP.
- Sistema de Video conferencia: para 24 estaciones Panasonic, podrá ser desplegado en las Delegaciones Provinciales y en las OSDE
- La red privada virtual (VPN) del MINAG cuenta con más de 790 enlaces en el país, de ellos 268 son estatales (Ministerio, Delegaciones Provinciales y Municipales,

estaciones, laboratorios, e Institutos de Investigación) y 512 pertenecen al sistema empresarial, que incluye 7 cooperativas. Es una de las VPN más grandes del país.

- Centro de Datos: con respaldo de ETECSA
- Infraestructura de Datos Espaciales (IDE): mapa de suelos, datos de estaciones agrometeorológicas de Cuba, Catastro, Mapas GeoCuba.
- Sistema de Inventario en Tiempo Real: único organismo que posee este sistema en todas sus empresas. Lográndose mediante el empleo de las más variadas técnicas de comunicación, tanto en infraestructura, como en conectividad.

Para impulsar el desarrollo de una Agricultura de Precisión en Cuba el MINAG firma un convenio de colaboración con la Universidad Central de Las Villas “Martha Abreu”, a raíz del cual se elaboró una cartera de proyectos relacionadas con los sistemas de riego y las casas de cultivo, entre otros. Además, se presentó un proyecto para el sistema de control y supervisión en tiempo real, que permite la operación y el monitoreo remoto de máquinas de riego de pivote central en la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú. Asimismo, se firmó un convenio de colaboración con la Empresa de Automatización Integral (CEDAI) y se está desarrollando un programa de Agricultura de Precisión donde participan 12 entidades agropecuarias en las que se implementarán tecnologías afines a la AP.

Consideraciones Finales

- Muchos dispositivos empleados en la agricultura para el sensado y procesamiento de datos en redes de sensores inalámbricos están siendo desplazados por dispositivos orientados a IoT (Arduino, Raspberry Pi y sus alternativas).
- Para una mejor administración de las técnicas de Agricultura de Precisión se emplean los DSS, los cuales abarcan tecnologías como la inteligencia artificial, los modelos mecanicistas entre otros, muy empleados en la automatización de procesos agrícolas tan importantes como el riego.
- El conocimiento y evaluación de las características y potencialidades de cada una de las tecnologías que se emplean para el monitoreo y administración en la Agricultura de Precisión, posibilita contar con la información necesaria a la hora de elegir qué tipo de sistema se empleará en una aplicación en específico.

CAPÍTULO III. Sistema de Administración para la Agricultura de Precisión en Cuba. Caso de Estudio UEB Cuba-Venezuela.

A pesar de los esfuerzos e inversiones que se llevan a cabo en la agricultura cubana para potenciar el desarrollo de las novedosas tecnologías relacionadas con la AP y su Administración, no existe un enfoque integral en las propuestas de solución y generalización de estas tecnologías, las cuales son altamente dependientes del contexto de aplicación, así como del nivel de preparación de los recursos humanos, informatización, tipo de comunicación, cultura tecnológica, etc. existentes.

Dado que uno de los propósitos del presente trabajo de investigación va dirigido a proponer una arquitectura genérica aplicable para un Sistema de Administración de la AP en Cuba, como resultado de la sistematización del conocimiento en esta esfera del saber; es que en el presente capítulo nos damos a la tarea de proceder a evaluar la disponibilidad de las novedosas tecnologías aplicadas en la AP y la caracterización para su empleo en Cuba, para lo cual emplearemos como caso de estudio la UEB "Cuba-Venezuela" perteneciente a la Empresa Agrícola de Cultivos Varios "Cubasoy", ubicada en el municipio Venezuela, de la provincia de Ciego de Ávila.

3.1 Propuesta de Arquitectura General para CPS

La introducción y disponibilidad de las tecnologías existentes, descritas en los capítulos anteriores no se implementa de igual manera en todos los agrosistemas, pues son muchos los factores que intervienen en una correcta aplicabilidad de las mismas. Estos elementos van desde la infraestructura tecnológica del país hasta los recursos humanos disponibles y es también altamente dependiente de la región, tipo de cultivo, contexto de aplicación, etc. Es por ello que se diseñan variadas arquitecturas en función de las condiciones propias de las

existentes en cada región, zona o país. En este sentido, en el presente capítulo se realiza una propuesta de arquitectura para un Sistema de Administración de la Agricultura de Precisión, que permita la integración y generalización de las tecnologías que se emplean en el monitoreo y administración de la Agricultura de Precisión que sea aplicable al contexto del país.

Para ello, se tienen como fundamento los análisis efectuados de cada una de las arquitecturas que se informan en la literatura científica y avaladas por un gran número de investigaciones. Se considerará como caso de estudio la UEB Cuba-Venezuela perteneciente a la Empresa Agrícola de Cultivos Varios Cubasoy, en Ciego de Ávila.

Para llevar a cabo la propuesta se seleccionan los componentes de hardware y de software que resultan los más aplicados en dichas investigaciones y que poseen las características para formar parte de una infraestructura general para la implementación de un sistema de este tipo, y aplicable en el contexto de una Agricultura de Precisión en Cuba.

A continuación, se procede a brindar una explicación de las diferentes capas presentes en la arquitectura general del sistema CPS, el cual estará compuesto de cuatro capas. En la selección de las capas se consideran las potencialidades a la hora de integrar los diferentes datos físicos con aplicaciones cibernéticas, que aumentan así las capacidades del sistema para gestionar los procesos agrícolas; así como los componentes de hardware, software y comunicación que mayormente se emplean en cada una de esas capas de manera general.

- Capa Física: Aquí se encuentran todos aquellos dispositivos encargados de la recolección de los datos del sistema agrícola en tiempo real, así como también los actuadores del sistema, como por ejemplo los sensores de humedad, temperatura, pH, GNSS, estaciones agrometeorológicas, drones, bombas hidráulicas etc.
- Capa de comunicación y conversión de los datos a información: Capa compuesta por los dispositivos encargados de la transferencia de los datos de forma rápida y fiable. La comunicación de los elementos de hardware se realiza generalmente empleando vías de comunicación inalámbrica, ya sea WiFi, ZigBee, Bluetooth, GMS, etc. La elección de estas tecnologías de comunicación depende de las facilidades y prestaciones en cuanto a la comunicación, que pudieran existir en el lugar específico de aplicación del sistema.

Además, en esta capa se encuentran elementos para el preprocesamiento de los datos y la conversión de estos a un lenguaje entendible por los ordenadores, u otro hardware que se encargará del almacenamiento y procesamiento de la información; además elementos que permitan el control automatizado de los actuadores. En el contexto que ocupa los más representativos serían los microcontroladores, autómatas programables y las plataformas de uso general como Arduino, Raspberry u otras de diseño específico.

- Capa de Almacenamiento y Análisis de la Información: Este nivel debe estar compuesto por dos estaciones. La estación de almacenamiento y plataformas de aplicación y la estación de cómputo y sistemas inteligentes para el apoyo en la toma de decisiones.

La primera generalmente está constituida por un servidor o conjunto de servidores donde se incorporan las bases de datos para el almacenamiento y manejo de la información y donde se ejecutan los diferentes programas informáticos para el procesamiento y visualización de la información almacenada en estas, de forma clara y comprensible a los usuarios (servidor web).

La segunda funciona como un centro de cómputo donde se procesa la información a un mayor nivel con la ayuda de especialistas y sistemas inteligentes expertos que permiten una gestión de los procesos agrícolas de mayor precisión. Es común encontrar en esta estación programas para el desarrollo de los SIG como QGIS.

- Capa de Aplicación: En esta capa se encuentran las diferentes plataformas remotas tales como ordenadores portátiles, tablets, smartphones etc., que conectados a la red del CPS permitirá la supervisión y el control de los procesos de producción agrícola a través de la información ya procesada y almacenada en las bases de datos.

En la figura 3.1 se puede observar la arquitectura propuesta del sistema CPS de cuatro capas, el funcionamiento de la misma se explicará a continuación.



Figura 3.1. Arquitectura general para sistemas de monitoreo en AP.

Primeramente, los datos obtenidos en la capa física son enviados a la capa superior vía conexión inalámbrica o de forma manual (los datos provenientes de plataformas de teledetección no serán transmitidos por esta vía, sino que se descargarán directamente al centro de cómputo en la capa tres), en esta segunda capa los datos llegarán por una u otra vía al elemento encargado del preprocesamiento donde se convertirán los datos provenientes de diversas fuentes en información entendible por los elementos de hardware encargados del almacenamiento y manejo de los datos; luego la información será enviada al centro de cómputo y sistemas inteligentes de apoyo a las decisiones donde se procesará la información a un alto nivel con la ayuda de especialistas y técnicas de inteligencia artificial, en este centro se tomarán decisiones para la administración de los procesos agrícolas, las cuales serán enviadas, a través de la capa de comunicación, hacia el elemento de control que enviará la señal de mando hacia los actuadores en la capa inferior; además en la estación de computo la información finalmente procesada se reenviará nuevamente al centro de almacenamiento donde se almacenará y se actualizará la nueva información en el servidor web de manera que pueda ser visualizada y analizada en la capa de aplicación.

3.2 Sistema de administración para la UEB Cuba-Venezuela

A continuación, se realiza una caracterización de la entidad donde se realizará la aplicación de la investigación, para posteriormente plantear el Sistema de Administración, considerando la arquitectura genérica propuesta en la figura 3.1, la cual sirve como base para ser aplicada en la UEB Cuba-Venezuela. En este sentido, se fundamenta el porqué de la selección de la tecnología, así como se describen las especificaciones de cada dispositivo propuesto, la topología adecuada para la prolongación de la vida útil de los elementos y la propuesta del despliegue del sistema en el campo en correspondencia con la aplicación en cuestión.

3.2.1 Breve reseña de la entidad.

Esta entidad agropecuaria se dedica desde el año 2007 a la producción de soya, ya en el año 2010 se le incrementa el cultivo del maíz. Se comienza con la creación de las Granjas Militares Batalla de Palma Mocha, Cuba-Venezuela, Sierra Maestra, Cuba-Brasil, La Teresa y Limones Palmero, estas dos últimas pasaron a ser fincas de la Granja Cuba-Brasil. En el año 2012 se le incorpora la Granja Juventud Heroica, con áreas que pertenecían al MINAG.

A finales del año 2013 se da inicio a la estrategia del país de sembrar frijol en gran parte de las áreas, quedando al final del período 36 máquinas para la producción de soya y un área experimental.

Desde el año 2007 hasta el 2013 se ejecutan inversiones de buldoceo con recogida de obstáculos, se mejora la infraestructura administrativa y de servicios, sistemas de riego, viales, mecanización agrícola, industriales y de investigación y desarrollo. Hasta el 2015 se aprueban inversiones para llegar al montaje de 144 máquinas de riego y en el mes de julio del 2017 se traspasa esta entidad al Grupo Agrícola del MINAG, con la finalidad de producir viandas, cultivos varios, granos y hortalizas, con un balance de área que a continuación se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Datos de las áreas de la empresa.

Área Total de la Empresa en (ha)	Área bajo riego por técnica en (ha)						Área total seco en (ha)	Área ociosa o deficiente Explotación en (ha).
	Total	Máq. Riego Pívate Central	Riego por Asper-sión	Riego por Goteo	Riego por Grave-dad	Maq. Enrollado-ras		
28619.39	4490.55	4387.96	12.0	5.0	9.28	76.31	24128.84	24040.12

3.2.2 Localización

Esta entidad agropecuaria, la Empresa Agropecuaria CUBASOY, radica en el territorio de los municipios Venezuela y Majagua, en la Provincia de Ciego de Ávila, se dedica actualmente a la producción agropecuaria.

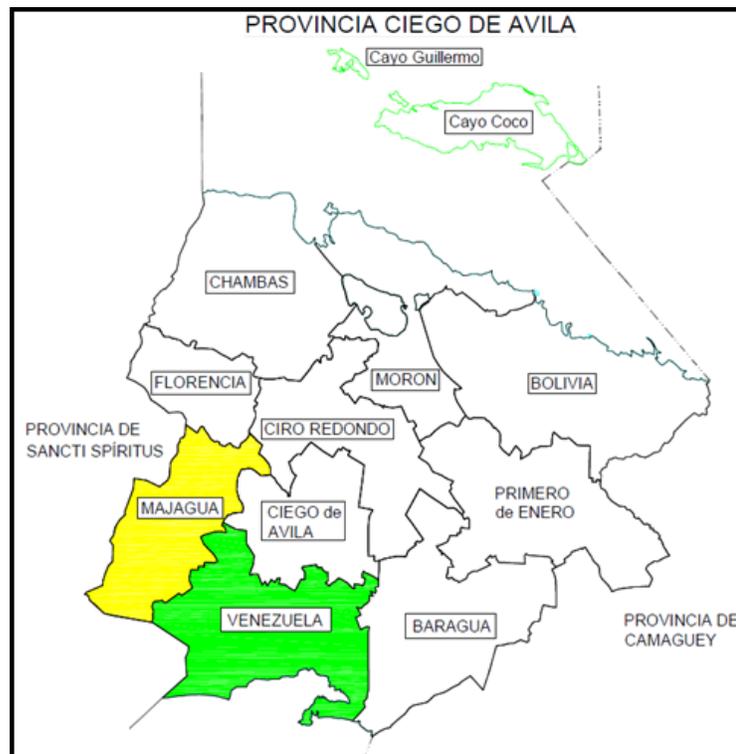


Figura 3.2 Localización de la UEB “Cuba-Venezuela” en la Provincia de Ciego de Ávila

La Dirección de la Empresa se encuentra enclavada en el poblado de “La Carolina”, municipio Venezuela, al este de la carretera Ciego de Ávila – Venezuela, a 12 km de la cabecera provincial y a 6 km del poblado de Venezuela, entre las coordenadas geográficas siguientes: X-727713 - 728053 y Y-217346 - 217464.

La UEB “Cuba-Venezuela” se encuentra próxima a la cabecera del municipio Venezuela, ocupando la parte norte-este del proyecto. Posee dos edificios socio administrativos, una cocina-comedor, además de un taller para el mantenimiento y reparaciones de la maquinaria y el transporte. Cuenta hoy con 16 máquinas de riego instaladas que beneficia un área bruta de 824.97 ha y un área experimental de 97.21 ha, de ellas bajo riego 73.00 ha, con sistemas de riego por goteo, aspersión y enrolladores.

3.2.3 Características Físico Geográficas de la zona.

Relieve: Su relieve llano y de pendientes suaves va declinando del norte al sur con alturas sobre el nivel medio del mar que van desde 40 metros al norte, hasta los 10 metros al sur.

Suelos: Los suelos, en su gran mayoría, son del tipo Ferralíticos, de ellos los Rojos en mayor cuantía 57.66 % (Típicos, hidratados, compactados), Ferralíticos amarillentos, Ferralíticos pardos rojizos y otros en menor por ciento, de relieves llanos con profundidades de forma general desde 0.5-1.0 m, cuya elevación productiva para granos generalmente es de 1 y 2.

Algunos presentan factores limitantes tales como la compactación y el mal drenaje, que deben de ir acompañados de prácticas para mejorar estas atenuantes, las cuales son costosas.

Hidrografía: El área de estudio pertenece a la vertiente hidrográfica Sur, la misma no cuenta con ríos, ni fuentes superficiales de gran magnitud, sólo el canal Los negros y los ríos Majagua y Derramadero, que son de poco caudal. La fuente de abasto fundamental de la zona son las aguas subterráneas, pero las mismas acercándose más al Sur han tenido un gran porcentaje de intrusión salina, aumentando la curva del gramo ((ENPA), 2017).

Hidrogeología: Las áreas de la empresa se localizan sobre la cuenca de aguas subterráneas Sur, en los sectores hidrogeológicos CA-II- 1 y 2 de la vertiente sur de la provincia de Ciego de Ávila, para los cuales se han realizado estudios que arrojaron resultados que plantean que se ha limitado el área acuífera a explotar. Los cálculos realizados arrojan que el área acuífera por encima del canal en el sector CA-II-1 es de 302 km², con un recurso explotable de 65

hm³, en CA-II-2 los cálculos realizados arrojaron que el área acuífera analizada por encima del canal en este sector es de 61 km², con un recurso explotable de 22 hm³. Las zonas más productivas están por debajo de la coordenada Norte 219000 ((ENPA), 2017).

Dadas las condiciones de acuífero abierto con relación directa con el mar, es de vital importancia utilizar las aguas del canal para regar las áreas al sur del mismo, las cuales en su proceso de percolación profunda atenuarían la penetración de la cuña salina y, a su vez, elevarían las cargas hidráulicas a lo largo de la zona costera, disminuyendo el gradiente hidráulico y con ello la velocidad de descarga del acuífero. Actualmente existe una penetración de la intrusión salina en la cuenca Sur incidiendo en esos sectores.

3.2.4 Sectores Hidrogeológicos

Geología: El territorio se encuentra representado fundamentalmente por sedimentos del neógeno, compuestos por calizas, margas, arcillas, arenas, areniscas y conglomerados, las formaciones del cuaternario: arcillas, arenas, gravas, turbas y guijarros se encuentran en la franja costera ((ENPA), 2017).

Clima: Es propicio para los cultivos varios, demostrado por el comportamiento histórico de las variables meteorológicas principales.

El área de estudio se encuentra ubicada en una zona de transición entre la región occidental-central y la oriental, por lo que no se descarta la aplicación de las características de la primera con cierta influencia de la segunda. Posee una amplia plataforma insular que influye en la fluctuación de las temperaturas en la llanura costera; también tiene territorio de llanura interior con influencia de las brisas de la costa norte y sur, reforzada por los alisios y los vientos del sur.

Esto demuestra la presencia del cinturón central convectivo que provoca que la turbulencia originada produzca las turbonadas principalmente en el verano. Las presiones y vientos que se registran en la zona se ajustan a los que caracterizan a la isla. En enero se producen los valores más altos, 1017,2 HP, tanto en la costa como en el centro; en diciembre la variación es de 4 décimas entre la costa y el centro, de forma general es más baja en la costa que hacia el interior, así la humedad media es más alta en esa dirección. Existe, además, la diferencia en el acumulado de las precipitaciones entre los meses de invierno y verano. El territorio es

afectado en menor escala que en el resto del país por los ciclones y huracanes. Los fenómenos meteorológicos locales, turbonadas intensas de verano y tornados, también inciden en esta estación. Los vientos, por su parte, son reforzados por los frentes fríos y los sures, así como por los ciclones y huracanes.

En cuanto a las precipitaciones, la media anual se comporta de norte a sur de 1 200 a 1 400 mm, disminuyendo hacia la costa, donde alcanza de 1 000 a 1 200 milímetros. El período lluvioso se extiende de mayo a octubre alcanzando valores de 1 000 a 1 200 mm en todo el territorio, mientras que en el período seco se extiende de noviembre a abril y existe una amplia franja hacia el sur con precipitaciones menores a 200 mm. En la parte norte de esa área se producen con valores que oscilan de 200 a 300 mm ((ENPA), 2017).

La temperatura media anual corresponde a 24-26 grados, la media de invierno fluctúa entre 20-22 grados en la mayor parte del territorio, llanura interior, mientras que en la costa se mantiene en 22-24 grados en enero. En el verano alcanza de 26-28 grados y el paso a temperaturas inferiores se produce en la tercera decena de noviembre. Las temperaturas máximas absolutas se manifiestan de 34 a 36 grados y la mínima absoluta es de 6-8 grados en toda el área ((ENPA), 2017).

En resumen, se puede afirmar que las condiciones climáticas responden a las llanuras y alturas con humedecimiento estacional relativamente estable, alta evaporación y elevadas temperaturas, entre las que se observan ligeras diferencias entre las llanuras del interior y las de la costa en todos los indicadores.

3.2.5 Vegetación y Calidad del Aire.

Vegetación: La misma se presenta en general de sabana original de hierbas, arbustos y árboles, donde predominaban el Algarrobo, la Guácima, Ocuje, Palma Real, Palma Cana y Guanía, se ha dado paso a los cultivos de la caña de azúcar, viandas y vegetales fundamentalmente. Hacia la costa predomina la vegetación de manglar: Mangle Prieto, Mangle Rojo, Yana y Patabán. En la porción sur hay un tramo costero que, entre Punta de Carapacho y la Ensenada Baja Grande, se caracteriza por ser una costa biogénica de manglar. Hacia el oeste de Punta Carapacho y en el tramo hasta Palo Alto se encuentra una costa abrasiva acumulativa debido a que el mar ha socavado la costa ((ENPA), 2017).

Aire: El mismo contiene los parámetros adecuados de calidad. No existen elementos contaminantes visibles en el territorio.

3.2.6 Resultados de análisis interno de la EA Cubasoy

FORTALEZAS:

- La entidad cuenta con una infraestructura administrativa y productiva creada que funciona.
- Dispone de infraestructura de riego que, aunque tiene deficiencias, tiene un gran porcentaje en explotación.
- Fondo de tierras con condiciones de suelo y agua para la explotación agrícola.
- Fuerza de trabajo capacitada, aunque aún presenta déficit.
- Hay una correcta asimilación de la ciencia y técnica.
- La entidad se encuentra conectada a la red nacional de entidades agrícolas vía WiFi, se espera conectarla vía fibra óptica en los años venideros.
- Existe en la entidad la conexión a la Internet, aunque al no poseer un buen ancho de banda, la misma es a veces muy lenta.

DEBILIDADES:

- Poco nivel de explotación de las áreas agrícolas debido principalmente a la infestación de malezas existente.
- Déficit de maquinarias agrícolas para la preparación de tierras y para la incorporación de nuevas áreas al cultivo.
- Necesidad de mantenimiento al equipamiento existente, tanto a los equipos e implementos agrícolas como para los equipos de riego.
- Insuficiencia de partes y piezas de repuestos para las máquinas de riego.
- Necesidad de completamiento de sistemas de riego en áreas de realengos y en otras sin valor de uso.
- Carencia de herramientas y equipos para el enfrentamiento de averías, para el mantenimiento y las reparaciones.

- El hardware empleado en dicha entidad data de entre los años 2000-2005.
- Insuficiencia de fuerza de trabajo calificada.
- Necesidad de completamiento de la capacidad industrial de la entidad.
- Completamiento de las acciones que tributan a la entrega de tierras.

3.3 Consideraciones sobre la selección de la tecnología

Como principales problemáticas en sentido general a considerar para la implementación de un sistema de Administración para la Agricultura de Precisión en nuestro país (Izaguirre-Castellanos, 2016), se pueden identificar:

- Los sistemas de medición en el contexto agrícola son escasos y no se cuenta con la cultura de mantenimiento y explotación que los mismos exigen.
- Hay carencia de personal técnico especializado para garantizar la sostenibilidad de la aplicación y las mejoras en el diseño futuro del sistema.
- Escasa capacitación de los recursos humanos que atenderan la nueva tecnología, para garantizar así la disponibilidad y preparación de la fuerza calificada.
- La indisciplina tecnológica y social pueden atentar contra la disponibilidad de los recursos de hardware que se dispongan en función del sistema aplicado.

Todos estos elementos deben ser considerados a la hora de implementar un sistema de administración en la agricultura cubana, evaluando de acuerdo al contexto de aplicación la incidencia en mayor o menor medida de cada uno de ellos, buscando la solución más práctica y menos costosa.

Bajo estas consideraciones se demandan los siguientes requisitos para la implementación del sistema:

- 1 Se exige de un personal estable y bien adiestrado, con la preparación y nivel técnico adecuado.
- 2 Necesidad de respaldo logístico desde el punto de vista de talleres o entidades que sean capaces de enfrentar las dificultades propias de una tecnología de punta en el campo.

- 3 Brindar los mantenimientos reglamentarios y necesarios, así como disponer de las partes y piezas necesarias, en función de garantizar la sostenibilidad del sistema.
- 4 Disponibilidad de una plataforma o infraestructura de comunicaciones apropiada al contexto de aplicación, estable y robusta.

Es así que teniendo en cuenta las características de las comunicaciones y tecnologías existentes en Cuba se pasa a seleccionar los componentes de hardware, software y comunicación que se propondrán emplear en este sistema en particular.

Red de sensores inalámbricos

Cada nodo de la red estará compuesto por un transceptor de radio frecuencia (RF), sensores, un micro controlador y la fuente de alimentación. El micro controlador propuesto es el PIC24FJ64GB004 que controlaría el transceptor XBee Pro S2 y que procesaría la información de los sensores de humedad y temperatura del suelo MS10. Estos componentes serían alimentados por pilas recargables AA 2000-mAh Ni-MH (Sony, Australia). Para lograr la autonomía de los nodos se propone instalar una celda fotovoltaica MPT4.8-75 (PowerFilm Solar, Ames, IN). El micro controlador, el transceptor, las baterías recargables y los componentes electrónicos serían encapsulados en un contenedor a prueba de agua hecho de polivinilo chloride, con grado de protección IP 56 (CITMA, 2015).

Estación Agrometeorológica: Se tomarán datos de velocidad y dirección del viento, precipitaciones, temperatura y humedad relativa del ambiente, que serán proporcionados por la estación agrometeorológica 78346 localizada en el municipio Venezuela, de la provincia Ciego de Ávila, estación cercana a la UEB Cuba-Venezuela (Instruments, 2016).



Figura 3.3 Estación Agrometeorológica 78346.

Satélite artificial Sentinel 2:

Se propone también emplear las imágenes multispectrales proporcionadas por el satélite Sentinel 2 ya que este brinda imágenes con una resolución de 5×5 metros en un total de 12 bandas espectrales de forma gratuita con periodicidad de 5 días. Con lo cual se podrán tener datos del estado vegetativo de los cultivos en ese tiempo.



Figura 3.4 Satélite artificial Sentinel 2.

Dispositivo de comunicación Wi-Fi Router F8434 ZigBee+ WCDMA:

EL dispositivo que se propone es el Wi-Fi Router F8434 ZigBee+ WCDMA, el cual es compatible con el estándar ZigBee, Wi-Fi y WCDMA, que es el estándar de la 3G en Cuba. Además, es un dispositivo muy potente, las especificaciones de este componente se encuentran en el Anexo I (Xiamen Four-Faith Communication Technology Co., 2013).



Figura 3.5 Wi-Fi Router F8434.

Se propone la Raspberry Pi 3 Modelo B+ para efectuar las funciones de preprocesamiento de los datos y la transformación de estos en un lenguaje entendible por el servidor y los gestores de bases datos debido a sus altas prestaciones en capacidad de procesamiento y bajo costo. Las prestaciones de este dispositivo aparecen ilustradas en el Anexo II (Velasco, 2018).



Figura 3.6 Raspberry Pi 3 con su encapsulado.

Autómata Programable Modicon M221 Schneider: Se propone el empleo de este PLC ya que cumple con los requisitos de la aplicación y además es de la firma Schneider Electric la cual tiene muy buenas relaciones con Cuba y cuenta con sucursales en el país permitiendo el acceso a elementos para la reparación, mantenimiento y programación del mismo, aspectos que inciden en la sostenibilidad de la aplicación. El PLC se empleará como dispositivo controlador y servirá para enviar las señales de mando hacia los elementos actuadores, posee además la capacidad de comunicarse con el servidor.



Figura 3.7 PLC Modicon M221

Como servidor se propone usar el servidor Power Edge r230 debido a que se encuentra actualmente en uso en la empresa donde se realiza la propuesta del sistema. Las especificaciones de dicho servidor se encuentran en el Anexo III (Dell, 2016).



Figura 3.8 Servidor Power Edge r230

Como sistema gestor de bases de datos se propone el NoSQL Cassandra. Se elige este gestor de base de datos debido a que es de tipo NoSQL y por tanto tiene características como leer y escribir datos rápidamente, permite soporte de almacenamiento masivo, es fácil de expandir y de bajo costo. Además, Cassandra tiene características propias que la diferencian de otras bases de dato de este tipo, sus características son: el esquema es muy flexible y no requiere diseñar el esquema de la base de datos al principio y agregar o eliminar el campo de forma muy conveniente; admitir consultas de rango, es decir, puede realizar consultas de rango por clave; alta escalabilidad: un único punto de falla no afecta a todo el clúster y es compatible con la expansión lineal. El Cassandra es un sistema de base de datos distribuida que se compone de muchos nodos de base de datos, una operación de escritura se replicará en otros nodos y la solicitud de lectura se enrutará a un determinado nodo. Para un clúster de Cassandra, solo agregar un nodo puede lograr el objetivo de escalabilidad. Además, Cassandra también admite una rica estructura de datos y un potente lenguaje de consulta (Han et al., 2011). Debe tenerse en cuenta que las bases de datos de tipo NoSQL no son compatibles con bases de dato de tipo SQL que es el estándar industrial hoy en día, sin embargo, para una cantidad de datos a almacenar y procesar como las que generan las aplicaciones de Agricultura de Precisión las bases de datos basadas en NoSQL se presentan como las ideales según las potencialidades antes descritas (Han et al., 2011).

Servidor Web: Se propone el empleo de un servidor Web basado en el lenguaje HTML5 debido a su amplio uso en aplicaciones web, facilidad de desarrollo, seguridad y alta escalabilidad (Hickson and Hyatt, 2011).

Software QGIS:

Se elige este software por su arquitectura extensible, flexibilidad en a la hora de sintetizar procedimientos o adecuar herramientas del software según los requerimientos de la aplicación, además desde sus inicios se ha hecho muy popular entre los desarrolladores por lo que cuenta hoy en día con un amplio soporte y por último la cualidad de que es un software libre (Pérez García, 2019).

DSS basado en sistemas expertos híbridos: Como se había planteado anteriormente los sistemas expertos tienen la capacidad de adaptarse especialmente a problemas dinámicos que son de naturaleza compleja. Así mismo son adecuados para tratar con datos incompletos e

incierto. Esto los hace muy adecuados para el apoyo a las decisiones de riego, que a menudo requiere la participación de expertos para llegar a decisiones óptimas. Es por esto que resulta seleccionado como DSS del sistema propuesto (Adeyemi et al., 2017).

3.4 Propuesta de un Sistema Ciber-Físico para la UEB Cuba-Venezuela

La EA Cubasoy es una de las 11 entidades elegidas a nivel nacional para avanzar en la incorporación de tecnologías que permitan un desarrollo estable de la Agricultura de Precisión. Dentro de esta entidad se dieron indicaciones para comenzar los estudios de nuevas tecnologías en el campo de cultivos que se encuentra en la UEB Cuba-Venezuela, campos que se encuentran actualmente cultivados con maíz. Esta orientación viene dada ya que en esta zona existe buena cobertura 3G, lo que posibilita el uso de esta red con fines de comunicación.

En la figura 3.9 se muestra la arquitectura del sistema propuesto, que se formula a partir de la arquitectura general para estos tipos de sistemas presentada en la figura 3.1. La propuesta consiste en una arquitectura de CPS de cuatro capas, las mismas serán descritas a continuación.

Capa física - utilizada para el proceso de adquisición de información. La información se recopilará a través de una red de sensores inalámbricos a nivel del suelo, trabajo humano y la utilización de las imágenes multiespectrales provistas por el satélite artificial Sentinel 2 de forma gratuita. Todas las mediciones se georreferenciarán utilizando GPS y contendrán información del estado vegetativo de las plantas, humedad y temperatura del suelo etc.

Capa de comunicación: la comunicación inalámbrica es una tecnología indispensable para la Agricultura de Precisión. Esta capa es la encargada de la comunicación empleando los Router F8434, el preprocesamiento de los datos y la transformación de estos en un lenguaje entendible por el servidor y los gestores de bases datos con la Raspberry Pi 3 y el PLC Modicon M221 que envía las señales de mando hacia los actuadores.

Capa de Almacenamiento y Análisis de la Información: En esta capa se encontrará en la estación de almacenamiento y aplicaciones el servidor Power Edge r230 donde estarán implementados el servidor web y las bases de datos. En la estación de computo los especialistas podrán analizar y realizar un mayor nivel de procesamiento de los datos gracias al empleo del software QGIS y el apoyo del DSS basado en sistemas expertos híbridos, con

lo cual se tomaran decisiones que serán enviadas en forma de señales de mando hacia el elemento de control de la capa inferior (PLC Modicon M 221) y además se enviará la información ya procesada en forma de mapas temáticos hacia el servidor web ubicado en la estación de almacenamiento y aplicaciones para ser visualizados en una interfaz web de manera amigable y de fácil entendimiento por parte de los usuarios que hacen uso de las plataformas remotas en la capa superior.

Capa de aplicación: esta capa proporcionará soluciones a los problemas que se presenten tomando como base la información procesada y almacenada localmente, pero también a partir de las bases de conocimiento obtenidas de otra ubicación donde ocurrieron situaciones similares. De esta manera, los agricultores pueden seguir la evolución de ciertos parámetros de interés y tomar las decisiones apropiadas para aumentar la productividad agrícola.

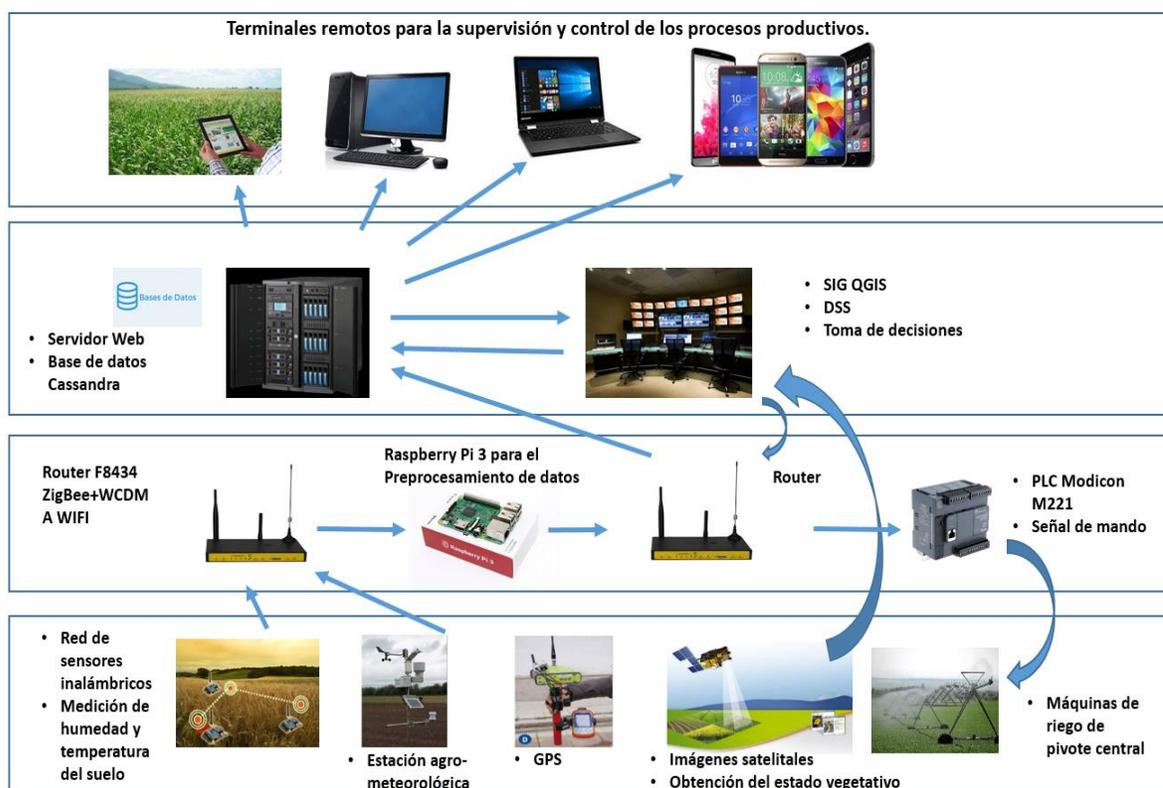


Figura 3.9 Arquitectura propuesta para el CPS de cuatro capas.

3.4.1 Datos que facilitan la elección del hardware y comunicación

Para ayudar en la elección del hardware se mostrarán en los anexos IV y V un conjunto de tablas con las especificaciones de los diferentes componentes que integran una red de

sensores inalámbricos, en el mercado existen otras alternativas, pero en estas tablas solo se muestran las más representativas.

De esta manera y como resultado derivado de la sistematización del conocimiento en relación con los Sistemas de Administración de la Agricultura de Precisión, queda planteada una solución de plataforma para el manejo de una Agricultura de Precisión que es aplicable en el contexto cubano y ejemplificada su implementación para el caso particular del agrosistema que caracteriza a la Empresa Agropecuaria CUBASOY, basado en las novedosas tecnologías actualmente en explotación y acorde a las condiciones de nuestro país en sentido general y a tenor de la caracterización efectuada de la UEB “Cuba-Venezuela” de la Provincia de Ciego de Ávila.

3.5 Análisis económico

Los sistemas de administración a pesar de caracterizarse por tener un costo de inversión inicial significativo, se justifica su implementación debido su gran potencial para mejorar la gestión de procesos agrícolas. Si hablamos de la salud de los cultivos, las tecnologías presentes en estos sistemas permiten conocer el estado vegetativo de un campo cultivado, así como también permite la detección y prevención de plagas, posibilitando conocer el lugar preciso en el que se encuentran estas y aplicar los químicos correspondientes solo en el área afectada y en la cantidad correcta disminuyendo por consiguiente el efecto negativo que tienen estos sobre el medio ambiente (Valero Ubierna et al., 2010). En el caso del riego se encuentra en la bibliografía que como resultado de la aplicación de estos sistemas se ha logrado ahorrar hasta el 20% de los recursos hídricos en comparación con las técnicas convencionales (Adeyemi et al., 2017). Las maquinarias agrícolas encargadas de la cosecha son equipadas con un conjunto de sensores que permiten la creación de mapas de rendimiento, que permiten trazar mapas para conocer las áreas de mayor producción y calidad del producto, obteniéndose datos para mejorar la producción en las áreas donde esta no fue la deseada (Valero Ubierna et al., 2010). Por otra parte, se puede realizar una mejor gestión del ganado, empleando estas tecnologías se puede conocer las áreas donde el ganado prefiere pastar, además a las vacas preñadas se le inserta un sensor que indica cuando esta rompió

aguas y la posición exacta donde está ocurriendo el parto, con lo que el especialista encargado puede apoyar en este proceso y disminuir el riesgo de la pérdida del bobino (Evans, 2011).

En el caso particular del contexto que nos ocupa el coste estimado de la inversión para la implementación del sistema propuesto oscila entre los 7000 USD. Luego de la implementación de este sistema, según la opinión de los especialistas del departamento de producción de dicha entidad, se estiman para un período de 3 años un aumento del 10% de la producción en esa empresa de cultivos varios y una reducción de los gastos en fertilizantes y plaguicidas del 5%, además de una reducción del empleo de recursos hídricos de alrededor de un 15 % y alrededor del 12% de ahorro de portadores energéticos.

Consideraciones Finales

- La propuesta de arquitectura se diseña para poder ser generalizada a los variados sistemas agro-productivos de nuestro país y considera la integración de las novedosas tecnologías.
- El análisis y evaluación del contexto agrícola donde prevé implementar la aplicación de un Sistema Administración de la AP, según los indicadores considerados en la UEB Cuba-Venezuela, permite evaluar la sostenibilidad y eficacia de las tecnologías a emplear.

CONCLUSIONES

- 1 La aplicación de las novedosas tecnologías a nivel mundial de los Sistemas de Monitoreo y Sistemas de Administración en la Agricultura de Precisión presenta un notable incremento, no obstante el éxito de su implementación y generalización depende de las características propias de cada región o país y de otros muchos factores geográficos, climáticos, económicos, sociales y culturales.
- 2 La integración de las novedosas tecnologías (SIG, GPS, WSN, teledetección, DSS), así como el empleo de técnicas de comunicación inalámbricas son imprescindibles para conformar un sistema para la Administración de la Agricultura de Precisión.
- 3 Los sistemas Ciber-Físicos se muestran como el tipo de sistema a emplear en la administración de la Agricultura de Precisión en Cuba debido a su gran potencial a la hora de integrar tecnologías de diferentes sectores.
- 4 La arquitectura del sistema propuesta puede ser empleada de forma general en cualquier sistema agro-productivo de Cuba, donde para una adecuada implementación del Sistema de Administración de la Agricultura de Precisión a utilizar, se debe efectuar previamente un minucioso estudio y caracterización del contexto de aplicación, así como evaluar la sostenibilidad y eficacia de las tecnologías disponibles.

RECOMENDACIONES

- Continuar desarrollando estudios relacionados con el objeto de investigación del presente trabajo, con vistas a potenciar la aplicación de los Sistemas de Administración de la Agricultura de Precisión en Cuba.
- Mantener un adecuado nivel de actualización acerca de las novedosas tecnologías que continuamente se aplican e implementan a nivel mundial en la esfera de los Sistemas de Administración de la Agricultura de Precisión en Cuba, con vistas a su posible inserción en el contexto de nuestro país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (ENPA), E. N. D. P. P. L. A. 2017. Informe técnico empresa Cubasoy. Empresa Cubasoy.
- ADEYEMI, O., GROVE, I., PEETS, S. & NORTON, T. 2017. Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation. *Sustainability*, 9, 353.
- AL-KARADSHEH, E., SOURELL, H. & KRAUSE, R. Precision Irrigation: New strategy irrigation water management. Proceeding of the Conference on International Agricultural Research for Development, Deutscher Tropentag, Wiltzenhausen, Germany, 2002. 9-11.
- AN, W., WU, D., CI, S., LUO, H., ADAMCHUK, V. & XU, Z. 2017. Agriculture cyber-physical systems. *Cyber-Physical Systems*. Elsevier.
- ARNÓ, J., VALLÈS, J. M., LLORENS, J., SANZ, R., MASIP, J., PALACÍN, J. & ROSELL-POLO, J. R. 2013. Leaf area index estimation in vineyards using a ground-based LiDAR scanner. *Precision agriculture*, 14, 290-306.
- ASADI, S., VASANTHA RAO, B. & SEKAR, S. 2012. Creation of physical characteristics information for Natural Resources Management Using Remote sensing and GIS: A Model study. *Published in the International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2.
- ASHER, J. B., YOSEF, B. B. & VOLINSKY, R. 2013. Ground-based remote sensing system for irrigation scheduling. *Biosystems engineering*, 114, 444-453.
- ATZBERGER, C. 2013. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote sensing*, 5, 949-981.
- AVELLO FERNÁNDEZ, L. 2019. *Sistema de supervisión y control remoto para máquinas de riego de pivote central empleando tecnología inalámbrica*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería
- BAHETI, R. & GILL, H. 2011. Cyber-physical systems. *The impact of control technology*, 12, 161-166.
- BARNARD, D. & BAUERLE, W. 2015. Species-specific irrigation scheduling with a spatially explicit biophysical model: A comparison to substrate moisture sensing with insight into simplified physiological parameterization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 48-59.
- BATISTA, D. R. P.-D. 2006. Uso de imágenes de satélites en la evaluación, monitoreo y manejo de daños causados por fenómenos naturales en la agricultura. Reflexiones. *Tecnologías Espaciales, Desastres y Agricultura en Iberoamérica (I)*, 129.
- BENÍTEZ, R., ESCUDERO, G., KANAAN, S. & RODÓ, D. M. 2014. *Inteligencia artificial avanzada*, Editorial UOC.
- BENNIS, N., DUPLAIX, J., ENÉA, G., HALOUA, M. & YOULAL, H. 2008. Greenhouse climate modelling and robust control. *Computers and electronics in agriculture*, 61, 96-107.
- BHANUMATHI, V. & KALAIVANAN, K. 2019. The role of geospatial technology with IoT for precision agriculture. *Cloud Computing for Geospatial Big Data Analytics*. Springer.
- BOJANOVA, I., HURLBURT, G. & VOAS, J. 2014. Imagineering an internet of anything. *Computer*, 47, 72-77.
- CITMA, M. D. C. Y. T. Y. M. A. 2015. Definición y Tabla del Grado de Protección (IP). *Norma cubana*
- COUNCIL, N. R. 1997. *Precision agriculture in the 21st century: Geospatial and information technologies in crop management*, Natl Academy Pr.
- CHAPPELL, M., DOVE, S. K., VAN IERSEL, M. W., THOMAS, P. A. & RUTER, J. 2013. Implementation of wireless sensor networks for irrigation control in three container nurseries. *HortTechnology*, 23, 747-753.

- CHEN, B. S. E. & CHANG, Y. 2008. A review of system identification in control engineering, signal processing, communication and systems biology. *J. Biomech. Eng.*, 1, 87-109.
- DABACH, S., LAZAROVITCH, N., ŠIMŮNEK, J. & SHANI, U. 2013. Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. *Irrigation Science*, 31, 27-36.
- DAS, J., CROSS, G., QU, C., MAKINENI, A., TOKEKAR, P., MULGAONKAR, Y. & KUMAR, V. Devices, systems, and methods for automated monitoring enabling precision agriculture. 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2015. IEEE, 462-469.
- DE GRAUWE, A. & CARRON, G. 2007. Supervision: A key Component of a Quality Monitoring System, Module 1. *International Institute for Educational Planning*.
- DEJONGE, K. C., KALEITA, A. L. & THORP, K. R. 2007. Simulating the effects of spatially variable irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa. *Agricultural water management*, 92, 99-109.
- DELGODA, D., MALANO, H., SALEEM, S. K. & HALGAMUGE, M. N. 2016a. Irrigation control based on model predictive control (MPC): Formulation of theory and validation using weather forecast data and AQUACROP model. *Environmental Modelling & Software*, 78, 40-53.
- DELGODA, D., SALEEM, S. K., MALANO, H. & HALGAMUGE, M. N. 2016b. Root zone soil moisture prediction models based on system identification: Formulation of the theory and validation using field and AQUACROP data. *Agricultural Water Management*, 163, 344-353.
- DELL 2016. PowerEdge_R230_SpecSheet_v4.1.
- DLODLO, N. & KALEZHI, J. The internet of things in agriculture for sustainable rural development. Emerging Trends in Networks and Computer Communications (ETNCC), 2015 International Conference on, 2015. IEEE, 13-18.
- DOBOS, E., MICHELI, E., BAUMGARDNER, M. F., BIEHL, L. & HELT, T. 2000. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. *Geoderma*, 97, 367-391.
- DONG, X., VURAN, M. C. & IRMAK, S. 2013. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems. *Ad Hoc Networks*, 11, 1975-1987.
- DWIVEDI, R. 2001. Soil resources mapping: A remote sensing perspective. *Remote Sensing Reviews*, 20, 89-122.
- ERDEM, Y., ARIN, L., ERDEM, T., POLAT, S., DEVECI, M., OKURSOY, H. & GÜLTAŞ, H. T. 2010. Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). *Agricultural Water Management*, 98, 148-156.
- ESQUIVEL, M., HERNÁNDEZ, B., FERNÁNDEZ, F., MARRENO, S., PONCE, E., QUINTANA, L., GONZÁLEZ, L., MAYET, A., MUÑOZ, R. & GARCÍA, J. 2008. Agricultura de precisión en la caña de azúcar. *Mapping*, 42-49.
- EVANS, B. & NIZEYIMANA, E. GIS-based quantification of regional nutrient loads. Proceedings of the 3rd International Conference on Diffuse Pollution, Edinburgh, Scotland, 1998. 48-55.
- EVANS, D. 2011. The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. *CISCO white paper*, 1, 1-11.
- FAZLOLLAHI, B., PARIKH, M. A. & VERMA, S. 1997. Adaptive decision support systems. *Decision support systems*, 20, 297-315.
- FERRÁNDEZ-PASTOR, F. J., GARCÍA-CHAMIZO, J. M., NIETO-HIDALGO, M., MORA-PASCUAL, J. & MORA-MARTÍNEZ, J. 2016. Developing ubiquitous sensor network platform using internet of things: Application in precision agriculture. *Sensors*, 16, 1141.
- FROISY, J. B. 2006. Model predictive control—building a bridge between theory and practice. *Computers & chemical engineering*, 30, 1426-1435.
- FULTON, J. & DARR, M. 2018. GPS, GIS, guidance, and variable-rate technologies for conservation management. *Precision Conservation: Geospatial Techniques for Agricultural and Natural Resources Conservation*, 65-81.
- GASCÓN, D. 2010. Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible. *Tecnología y Sociedad*, 53-55.
- GIUSTI, E. & MARSILI-LIBELLI, S. 2015. A Fuzzy Decision Support System for irrigation and water conservation in agriculture. *Environmental Modelling & Software*, 63, 73-86.
- GOMEZ-GIL, J., RUIZ-GONZALEZ, R., ALONSO-GARCIA, S. & GOMEZ-GIL, F. 2013. A kalman filter implementation for precision improvement in low-cost GPS positioning of tractors. *Sensors*, 13, 15307-15323.

- GOUMOPOULOS, C., O'FLYNN, B. & KAMEAS, A. 2014. Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support. *Computers and electronics in agriculture*, 105, 20-33.
- GUPTA, J. N., FORGIONNE, G. A. & MORA, M. 2007. *Intelligent decision-making support systems: foundations, applications and challenges*, Springer Science & Business Media.
- GUTIERREZ, S. K., SANTANA, L. H., MORALES, R. O., DÍAZ, O. A. & MORA, I. D. 2019. Análisis de imágenes multispectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados en agricultura de precisión. *Revista Científica de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones ISSN: 1815-5928*, 39, 79-91.
- HAN, J., HAIHONG, E., LE, G. & DU, J. Survey on NoSQL database. 2011 6th international conference on pervasive computing and applications, 2011. IEEE, 363-366.
- HARDAHA, M., CHOUHAN, S. & AMBAST, S. 2012. Application of artificial neural network in prediction of response of farmers' water management decisions on wheat yield. *J. Indian Water Resour. Soc*, 32, 1-12.
- HERNANDEZ-SANTANA, L. Conferencia Magistral Grupo de trabajo para el desarrollo de la robótica en Cuba In: VILLAS., U. C. M. A. D. L., ed. II Convención Científica Internacional Ciencia, Tecnología y Sociedad UCLV-2019. XVIII Simposio de Ingeniería Eléctrica SIE-2019. , 23-30 junio 2019 2019 Cayo Santa María.: UCLV.
- HICKSON, I. & HYATT, D. 2011. Html5. *W3C Working Draft WD-html5-20110525*, May.
- INSTRUMENTS, P. 2016. Instrucciones de uso. Estación meteorológica PCE-FWS 20.
- IZAGUIRRE-CASTELLANOS, E. R.-R., R 2016. Los sistemas de riego inteligentes. Contexto actual y perspectivas de su implementación en Cuba.
- JI, B.-B., LI, J., YANG, Y.-P. & ZHANG, S. 2012. A real-time measurement based on GPS which was designed for calculating the harvest area of combine. *Chinese Agricultural Mechanization*, 6, 89-92.
- JONES, J. W., HOOGENBOOM, G., PORTER, C. H., BOOTE, K. J., BATCHELOR, W. D., HUNT, L., WILKENS, P. W., SINGH, U., GIJSMAN, A. J. & RITCHIE, J. T. 2003. The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18, 235-265.
- KARASEKRETER, N., BAŞÇIFTÇI, F. & FIDAN, U. 2013. A new suggestion for an irrigation schedule with an artificial neural network. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 25, 93-104.
- KASSLIN, M., KANGAS, J. & SIMULA, O. 1992. Process state monitoring using self-organizing maps. *Artificial neural networks*. Elsevier.
- KISE, M. & ZHANG, Q. 2008. Development of a stereovision sensing system for 3D crop row structure mapping and tractor guidance. *Biosystems Engineering*, 101, 191-198.
- KRUTZ, R. L. 2005. *Securing SCADA systems*, John Wiley & Sons.
- LAN, Y., THOMSON, S. J., HUANG, Y., HOFFMANN, W. C. & ZHANG, H. 2010. Current status and future directions of precision aerial application for site-specific crop management in the USA. *Computers and electronics in agriculture*, 74, 34-38.
- LANGE, A. 2004. GPS weather data recording system for use with the application of chemicals to agricultural fields. Google Patents.
- LEYVA RAFULL, L. Z., SOUZA ALVES DE, C. M. & ORLANDO, R. C. 2001. Agricultura de precisión. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10, 7-10.
- LIAGHAT, S. & BALASUNDRAM, S. K. 2010. A review: The role of remote sensing in precision agriculture. *American journal of agricultural and biological sciences*, 5, 50-55.
- LIN, J.-S. & LIU, C.-Z. A monitoring system based on wireless sensor network and an SoC platform in precision agriculture. *Communication Technology*, 2008. ICCT 2008. 11th IEEE International Conference on, 2008. IEEE, 101-104.
- LIU, H., YANG, H., ZHENG, J., JIA, D., WANG, J., LI, Y. & HUANG, G. 2012. Irrigation scheduling strategies based on soil matric potential on yield and fruit quality of mulched-drip irrigated chili pepper in Northwest China. *Agricultural water management*, 115, 232-241.
- LORA CABRERA, D., FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, M., RAMOS GONZÁLEZ, R. & GARCÍA DE LA FIGAL COSTALES, A. E. 2012. Factibilidad económica del empleo de las herramientas de agricultura de precisión en la Empresa Pecuaria "Niña Bonita". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21, 19-23.
- LOZOYA, C., MENDOZA, C., MEJÍA, L., QUINTANA, J., MENDOZA, G., BUSTILLOS, M., ARRAS, O. & SOLÍS, L. 2014. Model predictive control for closed-loop irrigation. *IFAC Proceedings Volumes*, 47, 4429-4434.

- MANTOVANI, E. C. & MAGDALENA, C. 2014. Manual de agricultura de precisión. *Embrapa Milho e Sorgo-Livro científico (ALICE)*.
- MAREELS, I., WEYER, E., OOI, S. K., CANTONI, M., LI, Y. & NAIR, G. 2005. Systems engineering for irrigation systems: Successes and challenges. *IFAC Proceedings Volumes*, 38, 1-16.
- MCCARTHY, A. C., HANCOCK, N. H. & RAINE, S. R. 2010. VARIwise: A general-purpose adaptive control simulation framework for spatially and temporally varied irrigation at sub-field scale. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70, 117-128.
- MCCARTHY, A. C., HANCOCK, N. H. & RAINE, S. R. 2013. Advanced process control of irrigation: the current state and an analysis to aid future development. *Irrigation Science*, 31, 183-192.
- MCCARTHY, A. C., HANCOCK, N. H. & RAINE, S. R. 2014. Development and simulation of sensor-based irrigation control strategies for cotton using the VARIwise simulation framework. *Computers and electronics in agriculture*, 101, 148-162.
- MENG, Z., LIU, H., WANG, H. & FU, W. 2012. Optimal path planning for agricultural machinery. *Nongye Jixie Xuebao= Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 43, 147-152.
- MESAS-CARRASCOA, F., SANTANO, D. V., MEROÑO, J., DE LA ORDEN, M. S. & GARCÍA-FERRER, A. 2015. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. *Biosystems engineering*, 137, 73-83.
- MISIC, V. B. & MISIC, J. 2014. *Machine-to-machine communications: architectures, technology, standards, and applications*, CRC Press.
- MOHAN, S. & ARUMUGAM, N. 1997. Expert system applications in irrigation management: an overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 17, 263-280.
- MORALES, R. O. & GINORI, J. V. L. Cell Microscopy Imaging: A Review on Digital Image Processing Applications.
- MOUSA, A. K., CROOCK, M. S. & ABDULLAH, M. N. 2014. Fuzzy based Decision Support Model for Irrigation System Management. *International Journal of Computer Applications*, 104.
- NAGIB, A. M. & HAMZA, H. S. 2016. SIGHTED: A framework for semantic integration of heterogeneous sensor data on the Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 83, 529-536.
- NAVARRO-HELLÍN, H., MARTÍNEZ-DEL-RINCON, J., DOMINGO-MIGUEL, R., SOTO-VALLES, F. & TORRES-SÁNCHEZ, R. 2016. A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 121-131.
- NEMÉNYI, M., MESTERHÁZI, P., PECZE, Z. & STÉPÁN, Z. 2003. The role of GIS and GPS in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 40, 45-55.
- O'SHAUGHNESSY, S. A., EVETT, S. R., COLAIZZI, P. D. & HOWELL, T. A. 2012. A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. *Agricultural water management*, 107, 122-132.
- OJHA, T., MISRA, S. & RAGHUWANSHI, N. S. 2015. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66-84.
- OOI, S. K., MAREELS, I., COOLEY, N., DUNN, G. & THOMS, G. 2008. A systems engineering approach to viticulture on-farm irrigation. *IFAC Proceedings Volumes*, 41, 9569-9574.
- PARAFOROS, D. S., VASSILIADIS, V., KORTENBRUCK, D., STAMKOPOULOS, K., ZIOGAS, V., SAPOUNAS, A. A. & GRIEPENTROG, H. W. 2016. A farm management information system using future internet technologies. *IFAC-PapersOnLine*, 49, 324-329.
- PARAMESWARAN, G. & SIVAPRASATH, K. 2016. Arduino Based Smart Drip Irrigation System Using Internet of Things. *Int. J. Eng. Sci*, 5518.
- PATIL, P. & DESAI, B. 2013. Intelligent irrigation control system by employing wireless sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, 79.
- PATIL, S., PATIL, V. & AL-GAADI, K. 2010. Wheat acreage, productivity and production estimation through Remote Sensing and GIS techniques. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4, 3132-3138.
- PAVÓN-PULIDO, N., LÓPEZ-RIQUELME, J., TORRES, R., MORAIS, R. & PASTOR, J. 2017. New trends in precision agriculture: a novel cloud-based system for enabling data storage and agricultural task planning and automation. *Precision agriculture*, 18, 1038-1068.
- PEREZ-RUIZ, M., CARBALLIDO, J., AGÜERA, J. & RODRÍGUEZ-LIZANA, A. 2013. development and evaluation of a combined cultivator and band sprayer with a row-centering RTK-GPS guidance system. *Sensors*, 13, 3313-3330.
- PÉREZ GARCÍA, C. A. 2016. *Metodología para la extracción de datos de cosecha en cosechadoras cañeras Case IH A8000*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería

- PÉREZ GARCÍA, C. A. 2019. *Sistema de información geográfica para la aplicación de técnicas avanzadas de cultivo en la caña de azúcar*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería ...
- PETROPOULOS, G., SRIVASTAVA, P., PILES, M. & PEARSON, S. 2018. Earth observation-based operational estimation of soil moisture and evapotranspiration for agricultural crops in support of sustainable water management. *Sustainability*, 10, 181.
- PLANT, R., HORROCKS, R., GRIMES, D. & ZELINSKI, L. 1992. CALEX/Cotton: An integrated expert system application for irrigation scheduling. *Transactions of the ASAE*, 35, 1833-1838.
- POPOVIĆ, T., LATINOVIĆ, N., PEŠIĆ, A., ZEČEVIĆ, Ž., KRSTAJIĆ, B. & DJUKANOVIĆ, S. 2017. Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 255-265.
- PRASAD, G. & VINAYA, B. A. 2007. PANI: An Expert System for Irrigation Management. *Computer Sciences and Telecommunications*, 40-44.
- QIN, S. J. & BADGWELL, T. A. 2003. A survey of industrial model predictive control technology. *Control engineering practice*, 11, 733-764.
- QUEVEDO HERRERO, I., RODRÍGUEZ LÓPEZ, Y., HERNÁNDEZ ALFONSO, P. M. & FREIRE ROACH, E. 2006. La aplicación de la Agricultura de Precisión: su impacto social. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15, 42-44.
- RAD, C.-R., HANCU, O., TAKACS, I.-A. & OLTEANU, G. 2015. Smart monitoring of potato crop: a cyber-physical system architecture model in the field of precision agriculture. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 73-79.
- RAFFAELLI, M., MARTELLONI, L., FRASCONI, C., FONTANELLI, M. & PERUZZI, A. 2013. Development of machines for flaming weed control on hard surfaces. *Applied engineering in agriculture*, 29, 663-673.
- RAINE, S., SMITH, R., BAILLIE, C., MCCARTHY, A. & BAILLIE, J. 2011. Review of Precision Irrigation Technologies and their Application.
- RANI, M. & RAJESH, T. 2013. Expert System with Special Reference to Agriculture. *Int. J. Recent Technol. Eng*, 2, 85-89.
- RANI, P. M. N., RAJESH, T. & SARAVANAN, R. 2011. Expert systems in agriculture: A review. *Int. J. Sci. Technol. Eng*, 3, 59-71.
- ROSSER, J., SWARTZ, G., DAWSON, N. & BRIGGS, H. 1974. A land capability classification for agricultural purposes. *Div. Land Utilization. Tech. Rep*, 14.
- ROVIRA-MÁS, F., ZHANG, Q., REID, J. & WILL, J. 2003. Machine vision based automated tractor guidance. *International Journal of Smart Engineering System Design*, 5, 467-480.
- SAAVOSS, M., MAJSZTRIK, J., BELAYNEH, B., LEA-COX, J. & LICHTENBERG, E. 2016. Yield, quality and profitability of sensor-controlled irrigation: A case study of snapdragon (*Antirrhinum majus* L.) production. *Irrigation science*, 34, 409-420.
- SACHIN, P. 2011. Land capability classification for integrated watershed development by applying remote sensing and GIS techniques. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 6, 46-55.
- SALEEM, S. K., DELGODA, D., OOI, S. K., DASSANAYAKE, K. B., LIU, L., HALGAMUGE, M. & MALANO, H. 2013. Model predictive control for real-time irrigation scheduling. *IFAC Proceedings Volumes*, 46, 299-304.
- SINGH, H. & SHARMA, N. 2014. Design and Development of Fuzzy Expert System for Potato Crop. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng*, 4, 278-283.
- SRBINOVSKA, M., GAVROVSKI, C., DIMCEV, V., KRKOLEVA, A. & BOROZAN, V. 2015. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Journal of Cleaner Production*, 88, 297-307.
- SRIVASTAVA, R. & SAXENA, R. 2004. Technique of large-scale soil mapping in basaltic terrain using satellite remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 679-688.
- THORP, K. R., DEJONGE, K. C., KALEITA, A. L., BATCHELOR, W. D. & PAZ, J. O. 2008. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. *computers and electronics in agriculture*, 64, 276-285.
- TRIANA ESCOBEDO, S. 2018. *Implementación de una aplicación para el procesamiento primario de imágenes de grandes dimensiones en un entorno HPC*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

- VALERO UBIERNA, C., NAVAS GRACIA, L. M., GONZÁLEZ HERRERO, F., GÓMEZ GIL, J., RUIZ RUIZ, G., BARREIRO ELORZA, P., ANDÚJAR SÁNCHEZ, D., DIEZMA IGLESIAS, B., BAGUENA ISIEGAS, E. & GARRIDO IZARD, M. 2010. Ahorro y eficiencia energética en la Agricultura de Precisión. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- VÁZQUEZ BLANCO, L. B. 2017. *Sistema automatizado en pulverizador para aplicación variable de fitosanitarios*. Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería
- VELASCO, R. 2018. *Review: Raspberry Pi 3 Modelo B+* [Online]. Available: <https://hardzone.es/2018/07/02/review-raspberry-pi-3-modelo-b/> [Accessed].
- VELLIDIS, G., TUCKER, M., PERRY, C., KVIEN, C. & BEDNARZ, C. 2008. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *Computers and electronics in agriculture*, 61, 44-50.
- XIAMEN FOUR-FAITH COMMUNICATION TECHNOLOGY CO., L. 2013. F8X34 Series Router User Manual. China.
- XIANG, M., WEI, S., ZHANG, M. & LI, M. 2016. Real-time monitoring system of agricultural machinery operation information based on ARM11 and GNSS. *IFAC-PapersOnLine*, 49, 121-126.
- YE, J., CHEN, B., LIU, Q. & FANG, Y. A precision agriculture management system based on Internet of Things and WebGIS. *Geoinformatics (GEOINFORMATICS)*, 2013 21st International Conference on, 2013. IEEE, 1-5.
- ZHANG, N., WANG, M. & WANG, N. 2002. Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and electronics in agriculture*, 36, 113-132.
- ZUBIZARRETA LUJÁN, D. 2017. *Diseño de red de sensores inalámbricos para aplicaciones de riego agrícola*. Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería

ANEXOS

Anexo I Especificaciones Wi-Fi Router F8434

Estándar y Bandas	Ancho de Banda	Potencia Tx	Sensibilidad Rx
UMTS/WCDMA/HSDPA/HSUPA /HSPA+ 850/1900/2100MHz 850/900/1900/2100MHz(opcional) GSM850/900/1800/1900MHz GPRS/EDGE CLASS 12	HSUPA:5.76Mbps (velocidad de subida VS) HSDPA:7.2Mbps (Velocidad de Descarga VD) UMTS:384Kbps (VD/VS) HSPA+:21 Mbps (Velocidad de Descarga) 5.76Mbps (Velocidad de subida)	< 24 dBm	< -109 dBm

Anexo II Especificaciones Raspberry Pi 3 Modelo B+

- Procesador:
 - Chipset Broadcom BCM2387.
 - 1,2 GHz de cuatro núcleos ARM Cortex-A53
- GPU
 - Dual Core VideoCore IV ® Multimedia Co-procesador. Proporciona Open GL ES 2.0, OpenVG acelerado por hardware y 1080p30 H.264 de alto perfil de decodificación.
 - Capaz de 1 Gpixel / s, 1.5Gtexel / s o 24 GFLOPs con el filtrado de texturas y la infraestructura DMA
- RAM: 1GB LPDDR2.
- Conectividad
 - Ethernet socket Ethernet 10/100 BaseT
 - 802.11 b / g / n LAN inalámbrica y Bluetooth 4.1 (Classic Bluetooth y LE)
 - Salida de vídeo
 - HDMI rev 1.3 y 1.4
 - RCA compuesto (PAL y NTSC)
 - Salida de audio
 - jack de 3,5 mm de salida de audio, HDMI
 - USB 4 x Conector USB 2.0
 - Conector GPIO
 - 40-clavijas de 2,54 mm (100 milésimas de pulgada) de expansión: 2x20 tira
 - Proporcionar 27 pines GPIO, así como 3,3 V, +5 V y GND líneas de suministro
 - Conector de la cámara de 15 pines cámara MIPI interfaz en serie (CSI-2)
 - Pantalla de visualización Conector de la interfaz de serie (DSI) Conector de 15 vías plana flex cable con dos carriles de datos y un carril de reloj
 - Ranura de tarjeta de memoria Empuje / tire Micro SDIO

Anexo III Especificaciones del servidor Poweredge r230 de Dell

Característica	Especificación técnica
Factor de forma	Servidor en rack de 1 U
Procesador	1 procesador de las siguientes familias de productos: <ul style="list-style-type: none"> • Familia de productos de procesadores E3-1200 v5 Intel® Xeon® • Intel Pentium® • Intel Core™i3 • Intel Celeron®
Chipset	Intel C236
Sistema operativo	Microsoft® Windows Server® 2012 Microsoft Windows Server 2012 R2, x64 Red Hat® Enterprise Linux® VMware® Vsphere® 2015 SUSE® Linux Enterprise Server®
Memoria	Arquitectura: DIMM de hasta 2.133 MT/s DDR4 Tipo de memoria: UDIMM Sockets del módulo de memoria: 4 RAM máximo: hasta 64 GB
Compatibilidad con hipervisores	Microsoft Windows Server con Hyper-V® VMware® vSphere® ESXi®
Almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> • SATA de 2,5" de 7.200 • 2.5" nearline SAS 7.200

	<ul style="list-style-type: none"> • Unidades de disco duro SAS de 2,5" de 10.000 • Unidades de disco duro SAS de 2,5" de 15.000 • Unidades de disco de estado sólido SATA de 2,5" • Discos duros de 3,5" Enterprise SATA de 7.200 • Discos duros de 3,5" nearline SAS de 7.200 • Unidades de entrada SATA de 3,5" de 7.200
Compartimientos de unidades	<ul style="list-style-type: none"> • 2 discos duros de 3,5" con cables • 4 discos duros de 3,5" con cables • 4 unidades de 3,5" de intercambio directo o de 2,5" de intercambio directo en portadora de unidad híbrida
Ranuras	• 2 ranuras PCIe 3.0: ranuras x16, altura completa (1x8 3.0) + ranura x8, bajo perfil (1x4 3.0)
Controladoras RAID	PERC S130, PERC H330, PERC H730, PERC H830
Controladora de red	Broadcom® 5720
Comunicaciones	2 LOM de 1 GbE
Alimentación	PSU con cable de 250 W
Chasis	<ul style="list-style-type: none"> • 2 discos duros de 3,5" cableados, 1U de chasis de 19,5" • 4 discos duros de 3,5" cableados, 1U de chasis de 19,5" • 4 unidades de 3,5" de intercambio directo o de 2,5" de intercambio directo en portadora de unidad híbrida
Acceso al dispositivo	<p>5 puertos USB en total:</p> <p>Parte posterior: 2 puertos USB 3.0</p> <p>Parte frontal: 2 puertos USB 2.0</p>

	Interno: 1 puerto USB 3.0
Soporte de rack	Rieles estáticos ReadyRails™ para realizar el montaje sin herramientas en racks de 4 postes con orificios cuadrados o redondos sin rosca, o bien el montaje con herramientas en racks de 4 postes con rosca y de 2 postes.

Anexo IV Comparación de algunas plataformas de sensores inalámbricos.

Especificación	MICA2	MICAz	TelosB	IRIS	LOTUS	Imote2	SunSPOT
Procesador	ATmega128L	ATmega128L	TIMSP430	ATmega128L	CortexM3 LPC 17xx	Marvell/XScale PXA271	ARM920T
Programación							Java
Velocidad del reloj (MHz)	7.373	7.373	6.717	7.373	10-100	13-416	180
Ancho del Bus (bits)	8	8	16	8	32	32	32
Memoria del sistema (kB)	4	4	10	4	64	256	512
Memoria flash (kB)	Programa:128 Serie:512	Programa:128 Serie:512	Programa:48 Serie:1024	Programa:128 Serie:512	Programa:512 Serie:64x1024	Programa: programable Serie:32x1024	Programa: 4096 -
Frecuencia operativa de banda (MHz)	868/915	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Chip Transceptor	CC1000	CC2420	CC2420	Atmel RF230	Atmel RF231	CC2420	802.15.4
Velocidad de datos (kbps)	4/50	Programable	Programable	Programable	-	En pasos de 5 MHz	-
Conectividad I/O	UART, I2C, SPI, DIO	UART,I2C, SPI,DIO	UART,I2C, SPI,DIO	UART, I2C, SPI,DIO	3xUART, I2C,I2S SPI,GPIO,ADC	3xUART, I2C,2xSPI, GPIO,DIO,JTAG	DIO, I2C, GPIO

Anexo V Comparación de algunos módulos de comunicación.

Parámetros	<u>ZigBee</u>	WiFi	Bluetooth	GPRS/3G/4G	<u>WiMAX</u>
Estándar	IEEE 802.15.4	IEEE 802.11a,b,g,n	IEEE 802.15.1	-	IEEE 802.16a,e
Frecuencia de Banda	868/915MHZ 2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	865 MHz, 2.4 GHz	2-66 GHz
Velocidad de datos	20-250 kbps	1-54 Mbps	1-24 Mbps	50-100 kbps /200 kbps/ 0.1-1 Gbps	0.4-1 Gbps (estacionario), 50-100 Mbps (móvil)
Rango de transmisión	10-20 m	20-100 m	8-10 m	En toda el área con cobertura GMS	Menor o igual a 50 km
Consumo de energía	Bajo	Alto	Medio	Medio	Medio
Costo	Bajo	Alto	Bajo	Medio	Alto