

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

DEDICATORIA

A mi mujer, Mercedes, y a mi hija, Dánae, por aguantarme y ser pacientes en mis malhumores, preocupaciones y falta de dedicación de tiempo en momentos de estrés y agobio laboral y personal. Sois las personas que me impulsan a seguir aun cuando las adversidades intentan frenarme y hundirme. Sin vuestro apoyo no me hubiera metido en esta aventura que, como sabéis, es una “espinita que tenía clavada” desde que decidí acabar mis estudios universitarios allá por los años 90.

A mi madre, Carmen, que si no fuera por ella no me habría desarrollado en esta bonita profesión que es la informática (¡Mamá tu sabes por qué!). Gracias por tus sabios consejos en los malos momentos, que es cuando una madre demuestra su valía.

A mi padre, Antonio, que aunque ya no está con nosotros su recuerdo pervive fuerte en mi mente y corazón. Papa sé que cuando esta aventura acabe estarás orgulloso de mí.

A mi hermano Antonio, por el apoyo prestado en todos los aspectos de mi vida. Fuiste y eres un magnífico hermano mayor (aunque ya los dos tenemos algunos años).

Gracias. Os quiero.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia porque me hacen sentir bien y querido, a las personas que han colaborado profesionalmente conmigo y me han enseñado todo lo que conozco en todos los ámbitos de la informática y, por supuesto, a Rosa, la directora de este trabajo, que aceptó, dirigió y me animó a trabajar en él, posibilitando así su desarrollo.

Rafael Ángel Ferrer Martínez

Trabajo Fin de Grado - 2015/16

Grado en Ingeniería Informática (Plan 2015)

Universidad de Almería

PREÁMBULO

La evolución de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (T.I.C) han fomentado que los diferentes sectores donde se aplican promuevan un cambio en la mentalidad y metodología de su trabajo. La historia nos enseña que una revolución en la tecnología implica un cambio en la mentalidad, de modo de vida y metodologías de trabajo, como por ejemplo la revolución industrial, donde en la segunda mitad del siglo XVIII comenzó un proceso de transformación económica, social y tecnológica consecuencia del paso de una economía rural basada fundamentalmente en agricultura y el comercio a una economía de carácter urbano, industrializada y mecanizada.

Desde las últimas décadas del siglo pasado hasta la actualidad nos encontramos viviendo otra revolución que implica un cambio total en los modos de vivir y trabajar, es decir, se está implantando la llamada sociedad del conocimiento que se conceptualiza como una innovación de las tecnologías de la información y las comunicaciones, donde el incremento en las transferencias de información modifica en muchos sentidos la forma en que se desarrollan las actividades en la sociedad. Emergen de la implantación de las T.I.C., en la cotidianidad de las relaciones sociales, culturales y económicas.

La sociedad del conocimiento se ha ido implantando paulatinamente en todos los sectores económicos y, en particular, en los sectores productivos. Recientemente se está viviendo una explosión tecnológica en los sectores primarios ya que necesitan aplicar innovaciones tecnológicas para optimizar sus rendimientos para así minimizar la volatilidad y fluctuaciones de los precios en mercado.

Es impensable en esta época de revolución tecnológica a la sociedad del conocimiento concebir empresas de cualquier sector y, en particular, de sectores primarios como es el sector agroalimentario que trabajen de espaldas a la tecnología ya que estarían condenadas al fracaso. El conocimiento a través de la tecnología ofrece capacidad de anticipación, optimización en el uso de recursos, planificación de acciones, monitorización de operaciones destinadas a maximizar rendimientos tanto en calidad como en cantidad y, en definitiva, capacidad para hacer más rentables y sostenibles en el tiempo a las empresas.

La agricultura, para muchas zonas como puede ser Almería, es el motor económico y social y por lo tanto el medio de vida de toda su población. La agricultura genera empleo directo e indirecto e induce otros sectores como puede ser el de las tecnologías auxiliares. Su importancia es vital ya que no solo se está hablando de un medio de vida de millones de personas, sino de la fuente de alimentos de toda la población mundial. Es una actividad que hay que cuidar y hacer sostenible tanto económicamente como medioambientalmente.

Otro factor muy importante a tener en cuenta sobre todo en el sector agroalimentario es el medioambiente. Por la propia naturaleza de este sector, una mala gestión agronómica implica un impacto muy negativo en los recursos naturales (contaminación en acuíferos, contaminación ambiental, etc.). La aplicación de estas nuevas tecnologías fomentará el uso de los recursos en los momentos y cantidades adecuadas y el uso de otros componentes menos nocivos e incluso beneficiosos para el medio ambiente.

Los recursos del planeta son finitos con lo que hay que hacer sostenible su uso. En definitiva se ha de encontrar un adecuado equilibrio entre los recursos que el planeta nos ofrece, las necesidades de alimentar a la población y la sostenibilidad económica de las empresas productoras. Este equilibrio tan solo será posible si el ser humano se concientiza y toma medios para ello ayudado de todo lo que ofrece esta nueva sociedad del conocimiento donde la tecnología se convierte en el medio para conseguir este fin.

Contenido

1. Introducción	8
1.1. Interés	8
1.2. Objetivo	10
1.3. Alcance	10
1.4. Fases de la realización del trabajo. Cronograma	10
1.4.1. Cronograma de Actividades y Tareas	11
1.4.2. FASE I. Actividad 1 Recopilación de conocimiento y experiencias vividas durante mi carrera profesional en este ámbito.	12
1.4.3. FASE II. Actividad 2. Revisión bibliográfica en relación a la temática tratada	12
1.4.4. FASE III. Actividad 3. Revisión de material y métodos existentes en cada uno de los ámbitos de actuación	14
1.4.5. FASE IV. Actividad 4. Ordenación de la información y estructuración en niveles de aplicación de las tecnologías	14
1.4.6. FASE V. Actividad 5. Construcción de la memoria en función de la estructura definida ¹⁵	
2. Definición del modelo SMART Agriculture en agricultura de precisión	17
2.1. Bases tecnológicas necesarias para la aplicación del modelo SMART Agriculture	17
2.2. Tecnologías aplicadas en agricultura de precisión para el modelo SMART Agriculture	31
3. Beneficios del modelo SMART Agriculture	39
3.1. Beneficios a las explotaciones agrícolas	39
3.2. Beneficios medioambientales	39
3.3. Beneficios sociales	40
4. Sistemas tecnológicos en general aplicados en diversos ámbitos del modelo SMART Agriculture.	42
4.1. Tecnologías de base que la explotación agrícola ha de disponer para afrontar un modelo SMART Agriculture	42
4.2. Ámbitos del modelo SMART Agriculture	42
4.2.1. <i>Monitorización de cultivos para ayuda a la toma de decisiones</i>	42
4.2.2. <i>Actuaciones automatizadas</i>	47
4.2.3. <i>Modelos de cálculo predictivo</i>	48
4.2.4. <i>Integración con maquinaria agrícola y robotización de labores</i>	50
4.2.5. <i>Análisis Big Data</i>	50
4.2.6. <i>Certificaciones medioambientales</i>	51
5. Aplicación de sistemas tecnológicos a las metodologías y procesos empleados en agricultura de precisión	53

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

5.1. Monitorización automatizada de cultivos	53
5.2. Actuaciones automatizadas. Control automatizado del riego agrícola.....	75
5.3. Modelos de cálculo predictivo	82
5.4. Integración con maquinaria agrícola y robotización de labores	96
5.5. Análisis BIG DATA	101
5.6. Certificaciones medioambientales	104
6. Investigación, desarrollo e innovación que se está llevando a cabo en el campo de las tecnologías aplicadas a la SMART Agriculture	107
7. Sistemas inteligentes en agricultura de precisión	110
7.1. Tecnologías de captura de datos	110
7.2. Modelos para la ayuda en la toma de decisiones estratégicas en el manejo de cultivos.....	110
7.3. Modelos predictivos	111
7.4. Sistemas expertos.....	112
7.5. Integración con maquinaria agrícola	113
8. Investigación, desarrollo e innovación en modelos inteligentes que se pueden aplicar en agricultura de precisión.....	117
8.1. Análisis hiperespectral de imágenes de cultivo	117
8.2. Toma de datos automática en campo para auto-calibración y entrenamiento de modelos. Sistemas de enseñanza continua.....	121
8.3. Toma de decisiones autónoma del sistema inteligente e interacción automatizada con sistemas de actuación en tiempo real	123
8.4. Modelos de análisis y toma de decisiones. Observación / Predicción de situaciones deseables en el cultivo. Simulación de escenarios	125
9. Trazabilidad integral del producto consumible para seguridad alimentaria.....	128
10. Impactos del conocimiento agronómico a través de las tecnologías en los rendimientos económicos de los cultivos y en los sistemas de comercialización.....	133
11. Resultados, discusión y conclusiones.....	136
Bibliografía.....	141

Índice de Ilustraciones.

Figura 1 – Diagrama de Gantt. Cronograma de actividades.....	11
Figura 2 – Esquema de niveles de innovación en explotaciones agrícolas.....	17
Figura 3 – Esquema de funcionalidades software.	19
Figura 4 – Esquema del proceso de trazabilidad.	21
Figura 5 – Esquema del proceso de cálculo de huellas.....	22
Figura 6 – Esquema del proceso DSS.....	23
Figura 7 – Esquema de telecontrol remoto de dispositivos.	25
Figura 8 – Esquema de un Sistema de monitorización automatizada de cultivos.	26
Figura 9 – Esquema de un Sistema de robotización de actividades de campo.	27
Figura 10 – Esquema de obtención de datos a través de teledetección.	28
Figura 11 – Gestión geográfica de parcelas agrícolas - AGROGIS.	29
Figura 12 – Esquema de sistemas de seguimiento de maquinaria en campo.	30
Figura 13 – Flujograma de proceso.	43
Figura 14 – Sistema de información geográfica para información agronómica. AGROGIS.....	53
Figura 15 – AGROGIS visualizando una de las tablas con los metadatos de una capa.	54
Figura 16 – NDVI a fecha 01 de enero de 2016.....	55
Figura 17 – NDVI a fecha 08 de enero de 2016.....	56
Figura 18 – NDVI a fecha 02 de febrero de 2016.	57
Figura 19 – NDVI a fecha 05 de marzo de 2016.	58
Figura 20 – Imagen de finca para cálculo de indicadores de variabilidad de cultivo.	59
Figura 21 – Fórmulas de cálculo de los indicadores de variabilidad del cultivo basados en NIR.	60
Figura 22 – Diferentes ejemplos de los indicadores de variabilidad de cultivo.	61
Figura 23 – Instalación de una red inalámbrica de sensores (WSN).....	62
Figura 24 – Estructura de un computador de control. Tomada de la asignatura Programación Distribuida y Sistemas en Tiempo Real.....	63
Figura 25 – Sensor de presión y caudal en toma de riego del fabricante GRE.	64
Figura 26 – Dendrómetro del fabricante Plantsens.....	64
Figura 27 – Sensor de temperatura y turgencia de hoja del fabricante Yara Zimplant.	65
Figura 28 – Sensores ambientales para medir parámetros fenológicos del fabricante Ranch System.	66
Figura 29 – Datalogger del fabricante Ranch System.....	67
Figura 30 – Interfaz de usuario de un Sistema de monitorización con sensores.	69
Figura 31 – Sistema SCADA para el control de riego en múltiples sectores del fabricante Agrosistemas.....	70
Figura 32 – Electroválvulas para control automatizado del paso de agua en un sector de riego o en un hidrante.	71
Figura 33 – Esquema de construcción de un DSS.	72
Figura 34 – Gráfica de datos resultante de las tablas de indicadores.	73
Figura 35 – Gráfica de datos comparativos entre años en un Sistema DSS.	74
Figura 36 – Triángulo de texturas.....	76
Figura 37 – Esquema de un Sistema SCADA.	78
Figura 38 – Estación remota del fabricante Measure Instruments.....	79
Figura 39 – Electroválvula de cierre automático.	81
Figura 40 – Esquema de ejecución de los modelos.	84
Figura 41 – Esquema del modelo de crecimiento del cultivo.....	85
Figura 42 – Flujograma de proceso en la ejecución de la simulación.	86

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Figura 43 – Esquema de funcionamiento del modelo.	88
Figura 44 – Gráficos de parámetros que actúan como entrada al modelo.	89
Figura 45 – Esquema modelo cálculo momentos de recolección.	91
Figura 46 – Esquema modelo estimación de la producción.	93
Figura 47 – Esquema de objetivos de los modelos agronómicos.	96
Figura 48 – Propuesta de la estrategia de navegación.	99
Figura 49 – Imagen de Qlikview extraída de su página WEB.	102
Figura 50 – Imagen de Power BI extraída de su página WEB.	103
Figura 51 – Ejemplo de redes neuronales simples y múltiples capas.	111
Figura 52 – Esquema de un sistema experto.	113
Figura 53 – Finca agrícola donde el tractor ha de ser guiado.	114
Figura 54 – Esquema representativo de un sistema de toma de imágenes de cultivo.	118
Figura 55 – Patrón multiespectral.	119
Figura 56 – Patrón hiperespectral.	119
Figura 57 – Imagen tomada de hoja de lechuga para análisis hiperespectral.	120
Figura 58 – Gráfica de análisis resultante.	120
Figura 59 – Flujograma de proceso de un algoritmo que aplica inteligencia artificial.	122
Figura 60 – Flujograma de proceso de un algoritmo que aplica inteligencia artificial y automatización de procesos.	124
Figura 61 – Flujograma de proceso del Sistema de trazabilidad integral.	128

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.- Interés

2.- Objetivo

3.- Alcance

4.- Fases de la realización del trabajo. Cronograma

1. Introducción

1.1. Interés

La agricultura es un motor fundamental para el desarrollo de la economía de los países. Prueba de ello son los datos de la FAO [RI1] que revelan como la agricultura impulsa la economía de la mayoría de los países en desarrollo, mientras que en los países industrializados, históricamente, muy pocos han experimentado un rápido crecimiento económico y una reducción sensible de la pobreza sin una influencia determinante del sector agroalimentario. Las estadísticas, sin embargo, solo consideran a la agricultura como una actividad económica, cuando representa una forma de vida, un patrimonio, una identidad cultural y un pacto ancestral con la naturaleza, que no tienen valor monetario.

Uno de los aspectos donde la agricultura es sinónimo de crecimiento económico es cuando se aplican técnicas que optimizan el empleo de los recursos y se intensifica la producción, provocando así un incremento en el rendimiento económico de los cultivos, con lo que hace más sostenible tanto económicamente como medioambientalmente las explotaciones agrícolas.

No obstante, el sector agroalimentario no está exento de riesgos e incertidumbres, así el riesgo agrícola se puede dividir en varias categorías. Las que más impacto pueden tener sobre la sostenibilidad de las explotaciones agrícolas son:

- Riesgo sobre el rendimiento: se trata probablemente del riesgo que más se contempla en la agricultura, ya que refleja directamente el impacto de determinadas acciones sobre el rendimiento. Las causas más típicas de riesgo sobre el rendimiento son las condiciones climáticas, hídricas y nutricionales.
- La volatilidad de los precios: La información sobre el precio del producto es crucial para los productores. Los precios de los productos agrícolas pueden sufrir rápidas e importantes fluctuaciones en amplias zonas geográficas, dependiendo de las condiciones de oferta y demanda tanto locales como mundiales. Por ejemplo, una meteorología favorable o desfavorable en un lugar del mundo puede ocasionar incertidumbre y riesgo sobre los precios en mercados.

Para minimizar los impactos negativos de estos riesgos sobre la sostenibilidad y rentabilidad de las explotaciones agrícolas, solo cabe la optimización en el uso de recursos y en la ejecución de los procesos que se realizan en las fincas. En relación a esto surgen los conceptos de “*agricultura de precisión (Precision Agriculture)*” y “*agricultura inteligente (SMART Agriculture)*”. Una definición de cada concepto es:

- Agricultura de precisión: Wikipedia define agricultura de precisión [RI2] como la gestión de parcelas agrícolas sobre la base de la observación, la medida y la actuación frente a la variabilidad entre cultivos y dentro del propio cultivo. Adicionalmente indica que requiere el uso de un conjunto de tecnologías. Es decir, gestión agronómica de los cultivos a través de la monitorización de los parámetros clave (observación), medida para acotar los recursos a emplear en su gestión (medida) y actuación en función de las características biológicas y fenológicas propias de cada especie y variedad de cultivo y sus impactos con las otras especies y variedades con las que se relaciona (actuación según variabilidad entre cultivos y dentro del propio cultivo). El uso de tecnologías, como las TIC (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones), ayudan a realizar de forma eficiente todos los procesos de monitorización, medida y actuación que redundan en una gestión más productiva, rentable y sostenible de las explotaciones agrícolas.
- Agricultura inteligente: se puede definir como la agricultura que utiliza las TIC para alcanzar los objetivos de optimización en el uso de recursos y el incremento en la productividad, rentabilidad y sostenibilidad de las explotaciones agrícolas.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Si se pudiera obtener información oportuna sobre las condiciones del cultivo y las condiciones de comercialización de los productos agroalimentarios en los diferentes mercados se conseguirían mayores beneficios económicos, una mejor asignación de los recursos y por lo tanto una mayor rentabilidad y sostenibilidad de las explotaciones agrícolas. Las técnicas de agricultura de precisión y, en general, todas las técnicas que se pueden enmarcar en la "SMART Agriculture" están orientadas a conseguir los objetivos anteriormente descritos.

Como se ha introducido anteriormente, SMART Agriculture podría definirse como la gestión agronómica "inteligente" de las explotaciones agrícolas, pero ¿Qué significa "inteligencia" en el contexto agronómico de los cultivos? La Real Academia Española de la Lengua define inteligencia como:

- Capacidad de entender o comprender. Pero los agricultores, desde el inicio de los tiempos, encajan perfectamente en esta definición.
- Capacidad de resolver problemas. ¿Quién resuelve los problemas en las explotaciones agrícolas? (los agricultores).
- Conocimiento, comprensión, acto de entender. ¿Alguien tiene más conocimiento y comprensión del sector que los agricultores?
- Habilidad, destreza y experiencia. ¿Quién duda de esta definición aplicada a los agricultores?

Pues entonces, ¿Qué significa "inteligencia" en este contexto? No cabe duda que más inteligente que un agricultor para gestionar una explotación agrícola no existe, pero tradicionalmente ha realizado esta gestión utilizando criterios basados en la experiencia y en procedimientos aprendidos de generación en generación. Si complementa estas formas de actuar con otras herramientas tecnológicas que ofrezcan datos biológicos y fenológicos de los cultivos que orienten sobre su estado y necesidades, si se usan técnicas de anticipación de potenciales situaciones que fomenten un mejor desarrollo de cultivo y, en general, si se utilizan técnicas que simulen como las plantas se desarrollan y alerten sobre situaciones de riesgo, el agricultor podrá tomar mejores decisiones estratégicas de manejo de los cultivos orientadas a incrementar el rendimiento de los cultivos. Esto es inteligencia agronómica. No tiene nada que ver con capacidades cognitivas, sino con el uso de herramientas tecnológicas que ofrezcan información adicional de valor totalmente complementaria a la que el agricultor ya tiene.

Las tecnologías aplicadas a la SMART Agriculture fomentarán la optimización del uso de recursos que impactan en la sostenibilidad tanto económica como medioambiental de las explotaciones agrícolas e intensificará y maximizará la producción tanto en calidad como en cantidad de los productos agroalimentarios, que en definitiva redundará en una mejora cualitativa de los alimentos de origen agrícola que el consumidor obtiene (alimentos más saludables).

En definitiva, si las explotaciones agrícolas son sostenibles, el consumidor final tiene la seguridad absoluta de estar adquiriendo productos saludables y el impacto medioambiental es mínimo, el modelo de producción agroalimentario será duradero y fructífero ya que actuará simbióticamente con la naturaleza produciendo alimentos para una población cada vez más en aumento.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

1.2. Objetivo

Este documento refleja el detalle de un Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Informática según el plan de estudios de 2015 y contiene contenidos monográficos sobre la temática específica de tecnologías aplicadas a agricultura de precisión. Tiene como principal objetivo reflejar un detalle de las tecnologías, procesos y metodologías que se enmarcan dentro de la SMART Agriculture (una posible traducción es agricultura inteligente).

Tal y como identifica el título de este trabajo: “Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión”, este documento reflejará:

- Los modelos tecnológicos aplicados a todos los procesos metodológicos que se pueden enmarcar dentro de este paradigma de trabajo en el sector agroalimentario.
- Experiencias que se están llevando a cabo tanto en proyectos de investigación como en situaciones ya aplicadas en sistemas productivos.
- Objetivos que se persiguen con el uso de este tipo de tecnologías aplicadas a los procesos agrícolas.
- Beneficios económicos, sociales y medioambientales que se obtienen con el uso de estas tecnologías aplicadas a los procesos agrícolas.

1.3. Alcance

El alcance de este Trabajo de Fin de Grado es identificar todas las tecnologías que se pueden aplicar a las metodologías y procesos que se realizan en agricultura de precisión. El alcance de este trabajo es un hacer un estudio que caracterice, identifique y clasifique todas las tecnologías orientadas a mejorar procesos y reorienten metodologías que fomenten la optimización eficaz y eficiente el uso de recursos y por lo tanto fomenten la reducción de costes de los cultivos. Esta optimización en el uso de los recursos redundará en explotaciones agrícolas más sostenibles tanto económicamente como medioambientalmente.

El trabajo hará un recorrido por las principales tecnologías, procesos y metodologías que se están aplicando o se están investigando en el campo de la agricultura de precisión y que se pueden enmarcar en el concepto de “SMART Agriculture”.

1.4. Fases de la realización del trabajo. Cronograma

Este trabajo se ha realizado siguiendo las siguientes fases:

- FASE I: Recopilación de conocimiento y experiencias vividas durante mi carrera profesional en este ámbito. En esta fase se realiza la actividad correspondiente a recopilar toda la información de la que dispongo consecuencia de las experiencias vividas a lo largo de toda mi carrera profesional. Consciente de que tengo conocimiento no publicable debido a que es propiedad de la empresa en la cual estuve desarrollando el trabajo en ese momento, discrimino entre información publicable y no publicable de manera que este trabajo de fin de grado solo contiene aquella que es publicable.
- FASE II: Revisión Bibliográfica en relación a la temática tratada. En esta fase se desarrolla la actividad correspondiente a la revisión bibliográfica que aporta contenidos a cada una de los temas tratados. En esta actividad se desarrollan 2 tareas:
 - o Revisión de bibliografía propia.
 - o Revisión de bibliografía externa, es decir, revisión bibliográfica de la que no dispongo y que es necesaria para completar algunos aspectos importantes en los temas tratados. Para ello se utilizan los recursos de la Biblioteca Nicolás Salmerón de la Universidad de Almería.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- FASE III: Revisión de material y métodos existentes en cada uno de los ámbitos de actuación. En esta fase se desarrolla la actividad de revisión de material y métodos relacionados con la temática tratada. En esta actividad se desarrollan dos tareas:
 - o Revisión de materiales de interés a través de INTERNET.
 - o Revisión de materiales de interés en revistas y publicaciones especializadas del sector agroalimentario.
- FASE IV: Ordenación de la información y estructuración en niveles de aplicación de las tecnologías. En esta fase se desarrolla la actividad de ordenación y estructuración de toda la información recopilada. En esta actividad se desarrollan dos tareas:
 - o Ordenación de la información recopilada.
 - o Definición de la estructura definitiva de contenidos de la memoria.
- FASE V: Construcción de la memoria en función de la estructura definida. En esta fase se realiza la actividad de construcción de la memoria correspondiente al trabajo de fin de grado según la estructuración definitiva de contenidos realizada en la fase anterior. En esta fase se realizan dos actividades.
 - o Construcción de la memoria.
 - o Construcción de la presentación para la defensa del trabajo de fin de grado ante el tribunal designado.

1.4.1. Cronograma de Actividades y Tareas

A continuación se identifica un diagrama de Gantt con el cronograma de actividades y tareas realizadas en este trabajo.

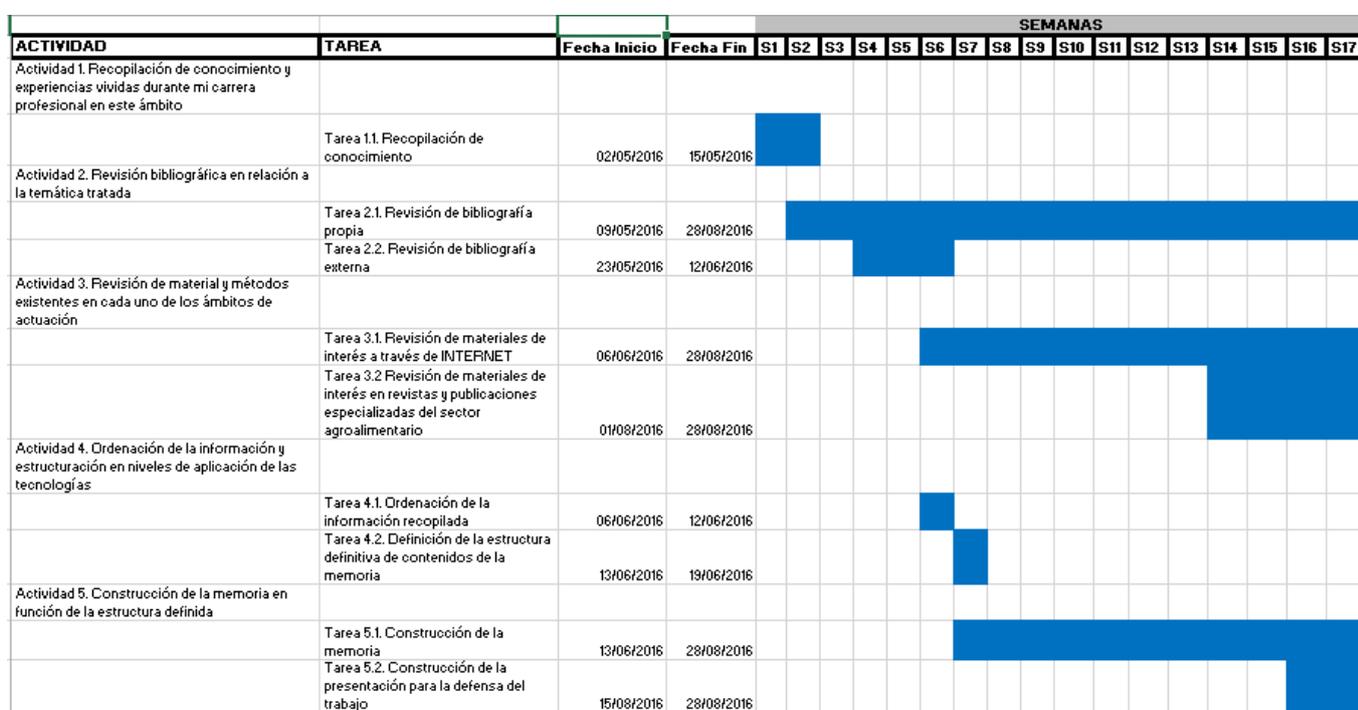


Figura 1 – Diagrama de Gantt. Cronograma de actividades

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

A continuación se detalla el trabajo realizado en cada una de las fases.

1.4.2. FASE I. Actividad 1 Recopilación de conocimiento y experiencias vividas durante mi carrera profesional en este ámbito.

En la primera fase realizo una recopilación del conocimiento que tengo en relación a las experiencias vividas durante toda mi carrera profesional (desde el año 1998 hasta la actualidad). Toda ella se ha desarrollado en el sector de las tecnologías de la información y comunicaciones aplicadas al sector agroalimentario. En particular, desde el año 2013, como responsable del área de I+D+i de la empresa Grupo Hispatec Informática Empresarial S.A. he participado muy intensamente en proyectos I+D+i, donde he colaborado con investigadores y diversos especialistas en SMART Agriculture en el ámbito de soluciones tecnológicas aplicadas a agricultura de precisión.

Exceptuando aquellas tecnologías desarrolladas explícitamente para aquellas entidades que tienen la propiedad sobre lo desarrollado, en este trabajo de fin de grado se identifica información obtenida en base a mi experiencia profesional y estudios realizados para llevar a cabo los proyectos en los que he intervenido. En este trabajo se ha realizado un proceso de discriminación de los contenidos que son publicables y los que no son publicables debido a que son propiedad de alguna entidad, de manera que este trabajo de fin de grado solo contempla aquellos contenidos que son publicables.

Adicionalmente he asistido a diversos simposios y ponencias de especialistas en agricultura de precisión y, en general, de SMART Agriculture, que me han permitido adquirir un conocimiento en técnicas y metodologías que me permite dar contenido a este trabajo fin de grado. En este aspecto, cabe destacar mi asistencia a:

- 10th European Conference on Precision Agriculture 2015. Evento celebrado en Volcani Center (Israel) en julio de 2015.
- II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola (IISNIH16). Automatización y TICs en agricultura. Evento celebrado en la Universidad de Almería (España) en Febrero de 2016.
- Feria Internacional de Maquinaria Agrícola (FIMA 2016). Evento celebrado en la Feria de Zaragoza (España) en febrero de 2016.
- Segundo Congreso de Frutos Rojos. Evento celebrado en Huelva (España) en junio de 2016. En este congreso fui ponente en una conferencia sobre agricultura de precisión en el ámbito del cultivo de la fresa, donde expuse contenidos relativos a la monitorización automatizada, a través de plataformas TICs y WSN (Wireless Sensor Network), de parámetros fenológicos observados y previstos que impactan en el cultivo. Todo ello en el ámbito de los sistemas DSS (Decision Support System) para la ayuda a la toma de decisiones en el manejo agronómico del cultivo.

En ellos se presentaron tecnologías y metodologías de trabajo que prácticamente cubren todo el ámbito de la SMART Agriculture reflejado en este trabajo de fin de grado.

1.4.3. FASE II. Actividad 2. Revisión bibliográfica en relación a la temática tratada

En la segunda fase realizo una búsqueda de bibliografía existente a este respecto. Aunque ya tenía conocimiento previo de la existencia de algunos de estos libros e incluso tengo en propiedad algunos de ellos, realizo una búsqueda de lo publicado en el ámbito de la agricultura de precisión y de la SMART Agriculture, seleccionando aquellos que ofrecen información de interés para la realización de este trabajo de fin de grado. Para ello empleo los recursos que

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

ofrece la Biblioteca Nicolás Salmerón de la Universidad de Almería que, en el ámbito de la SMART Agriculture, aporta datos suficientes y de calidad para dotar de contenidos a este trabajo de fin de grado.

En el epígrafe Bibliografía de este documento, en particular lo catalogado como “RB – Referencias Bibliográficas” se identifica las publicaciones que se han seleccionado y que sirven como base bibliográfica en el desarrollo de este trabajo.

Para la realización de la actividad correspondiente a la revisión bibliográfica se realizan dos tareas. Estas tareas se realizarán a lo largo de todo el desarrollo de este trabajo de fin de grado, ya que en fase de construcción de la memoria, también se realiza revisión bibliográfica para ir completando más eficientemente los contenidos aportados.

- Revisión bibliográfica propia

Los libros de los que dispongo en propiedad son los correspondientes a: [RB1], [RB2], [RB3], [RB4], [RB5] y [RB6]. En estos libros realizo una búsqueda de contenidos, metodologías y estructura que permita definir la estructura definitiva de este trabajo de fin de grado. Las temáticas específicas detectadas en cada uno de ellos son:

- [RB1]: Este libro es de temática general en agricultura de precisión y contiene información de experiencias, métodos y proyectos que se están llevando a cabo en todos los ámbitos de la SMART Agriculture.
- [RB2]: Este libro detalla proyectos, experiencias y productos presentados en el evento celebrado en Israel, al cual asistí, en Julio de 2015 en Vocani Center. La información extraída de este libro aporta contenidos en los apartados que se catalogarán en relación a experiencias que se están llevando a cabo en el ámbito de la SMART Agriculture.
- [RB3]: Este libro detalla proyectos, experiencias y productos presentados en el evento celebrado en Almería, al cual asistí, en febrero de 2016 en la Universidad de Almería. La información extraída de este libro aporta contenidos en los apartados que se catalogarán en relación a experiencias que se están llevando a cabo en el ámbito de la SMART Agriculture.
- [RB4]: Este libro aporta contenidos específicos sobre ingeniería del riego agrícola. En él se detallan técnicas, metodologías y mecanismos para llevar a cabo una buena gestión del riego agrícola e introduce las posibilidades de ser gestionado a través de sistemas TICs.
- [RB5]: Este libro aporta contenidos sobre herramientas informáticas que soportan las diferentes tecnologías aplicables en agricultura de precisión. Hace especial énfasis en los sistemas GIS (Sistema de Información Geográfico).
- [RB6]: Este libro aporta contenidos específicos sobre tecnologías aplicables a la resolución de problemas de producción que pueden tener las explotaciones agrícolas.

- Revisión bibliográfica externa:

Para esta tarea se hace uso de los recursos provistos por la Biblioteca Nicolás Salmerón de la Universidad de Almería, buscando libros relacionados con los aspectos clave de la temática tratada. El libro que localizo y que aporta contenidos en uno de los aspectos clave de la agricultura de precisión es:

- [RB7]: Este libro aporta contenidos temáticos sobre manejo, modelización y control, con soporte de las TICs, de estructuras de cultivo invernadas. Aunque la temática se focaliza en cultivos bajo invernadero, los modelos y elementos de control que aporta orientan sobre las técnicas aplicables a otro tipo de estructuras de cultivo, con lo cual, en todo lo catalogado en relación a la

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

modelización de técnicas de desarrollo de cultivos y predicción de impactos fenológicos, este libro aporta conocimiento.

1.4.4. FASE III. Actividad 3. Revisión de material y métodos existentes en cada uno de los ámbitos de actuación

De forma adicional a la revisión bibliográfica, en esta fase se realiza un proceso de búsqueda de material documental vario existente que de soporte de conocimiento sobre las tecnologías que se contemplan en este trabajo.

La actividad que se desarrolla en esta fase se divide en dos tareas. Estas tareas se realizarán a lo largo de todo el desarrollo de este trabajo de fin de grado, ya que en fase de construcción de la memoria, también se realiza revisión de material y métodos para ir completando más eficientemente los contenidos aportados:

- Revisión de materiales de interés a través de INTERNET

En el epígrafe Bibliografía de este documento, en particular lo catalogado como “RI – Referencias INTERNET” se identifican los artículos, documentos e información en general que ha servido en la preparación de información para la construcción de este trabajo.

En esta tarea se realiza un proceso de búsqueda en INTERNET de información existente en cada uno de los aspectos tratados.

- Revisión de materiales de interés en revistas y publicaciones especializadas en el sector agroalimentario

En el epígrafe Bibliografía de este documento, en particular en lo catalogado como “RP – Referencias Publicaciones” se identifican artículos que aportan información de interés en la temática específica. Para la localización de este tipo de publicaciones especializadas se hace uso de los recursos de la Biblioteca Nicolás Salmerón de la Universidad de Almería y de algunas publicaciones que dispongo en propiedad.

1.4.5. FASE IV. Actividad 4. Ordenación de la información y estructuración en niveles de aplicación de las tecnologías

Una vez recopilada toda la información que soporta los contenidos que contiene este trabajo, en esta fase se realiza un proceso de homogeneización y ordenación en función de la estructura que tendrá el documento. En este proceso todo el soporte documental queda preparado para la construcción de este documento.

La actividad desarrollada en esta fase se compone de dos tareas:

- Ordenación de la información recopilada

En esta tarea se ordena toda la información que se ha recopilado en fases anteriores, de manera que se pueda definir una estructura coherente en la memoria a construir.

- Definición de la estructura definitiva de contenidos de la memoria a construir

Una vez que se ha ordenado toda la información recopilada, se estructura un índice de contenidos definitivo, que es el que se contempla en esta memoria.

1.4.6. FASE V. Actividad 5. Construcción de la memoria en función de la estructura definida

En esta fase se realiza el proceso de construcción de la memoria donde se estructura toda la información recopilada. Como resultado de esta fase se obtiene este documento y una presentación donde a través de una secuencia de diapositivas se muestra un resumen ejecutivo que actuará como soporte a una exposición oral de los contenidos que aquí se reflejan.

En esta actividad se realizan dos tareas:

- Construcción de la memoria

Se realiza este documento que aporta los contenidos del trabajo de fin de grado según la estructura definida en la fase anterior.

- Construcción de la presentación para la defensa del trabajo de fin de grado ante el tribunal designado

Se realiza una presentación, a efectos de resumen ejecutivo del trabajo realizado, con el objetivo de que sirva de soporte a la exposición que se ha de realizar ante el tribunal que evalúa este trabajo de fin de grado.

CAPÍTULO 2. DEFINICIÓN DEL MODELO SMART AGRICULTURE EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

1.- Bases tecnológicas necesarias para la aplicación del modelo SMART Agriculture

2.- Tecnologías aplicadas en agricultura de precisión para el modelo SMART Agriculture.

2. Definición del modelo SMART Agriculture en agricultura de precisión

2.1. Bases tecnológicas necesarias para la aplicación del modelo SMART Agriculture

El modelo de trabajo SMART Agriculture, es decir, el modelo de trabajo aplicando “inteligencia” en los procesos agrícolas, requiere unas bases tecnológicas sobre las cuales aplicar todas las tecnologías innovadoras destinadas al manejo óptimo de los cultivos. A continuación se identifica una posible clasificación de las explotaciones agrícolas según sus bases tecnológicas:

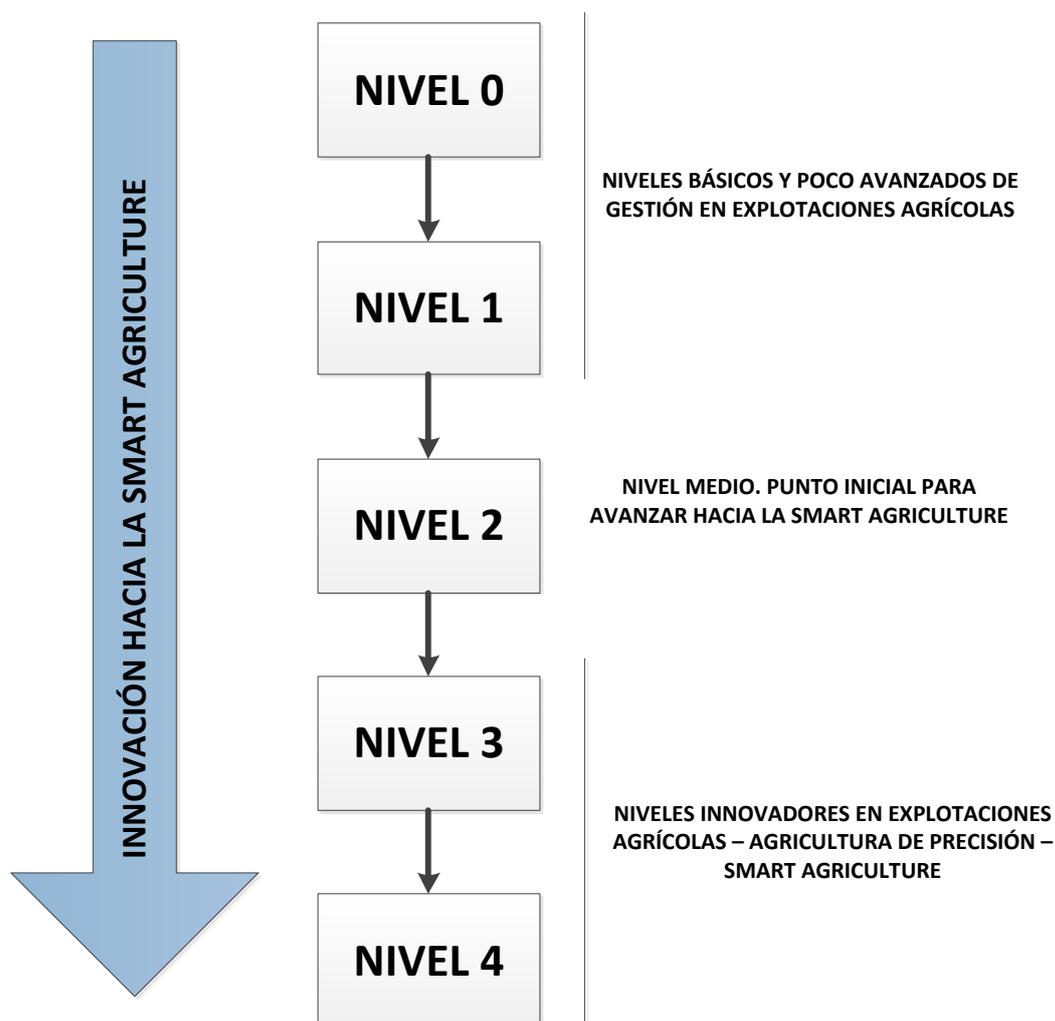


Figura 2 – Esquema de niveles de innovación en explotaciones agrícolas.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Explotaciones agrícolas de nivel 0:

Serían aquellas explotaciones agrícolas que no hacen uso de sistemas de información para su gestión, es decir, realizan una gestión y manejo de cultivos tradicional basado en la experiencia de campañas productivas pasadas. Las características de este tipo de explotaciones es la dificultad en evaluar su sostenibilidad económica, la dificultad en evaluar la rentabilidad y productividad y, en definitiva, la imposibilidad de poder medir y evaluar si la explotación agrícola ofrece las garantías suficientes tanto de calidad en sus productos, como de rentabilidad económica que garantice su continuidad.

- Explotaciones agrícolas de nivel 1:

Serían aquellas explotaciones agrícolas que, aun usando algunos dispositivos de medición de condiciones de cultivo, como por ejemplo sondas de humedad para medir humedad de suelo, el manejo se sigue realizando de forma tradicional aunque apoyados por estos nuevos datos. No obstante, este tipo de explotaciones agrícolas no utilizan sistemas TIC para apoyar su gestión, con lo que dificulta todos los procesos de evaluación de los procesos de calidad en los productos y rentabilidad general de la explotación agrícola.

- Explotaciones agrícolas de nivel 2:

Serían aquellas explotaciones agrícolas que disponen de un sistema TIC básico para la gestión de la explotación, donde se realiza una gestión económica para medir la rentabilidad de los cultivos y la gestión del cuaderno de campo o cuaderno de explotación. Desde el 01 de enero de 2014, en España, es obligatorio por ley el registro de las operaciones en las fincas y los cultivos, fundamentalmente en el ámbito del uso de fitosanitarios, en lo que se ha definido como el cuaderno de campo o cuaderno de explotación. Esta ley es el Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios. Este registro, básicamente contiene la siguiente información:

- Fincas agrícolas que conforman la explotación.
- Actores que trabajan en ella (propietarios de la explotación, asesores técnicos, operadores, aplicadores fitosanitarios, responsables, etc.).
- Maquinaria agrícola que opera en la explotación.
- Recomendaciones de aplicación fitosanitaria.
- Aplicación fitosanitaria, indicando materias activas de los productos, plazos de seguridad en la aplicación, cantidades, etc.
- Análisis realizados.
- Muestreos realizados
- Operaciones genéricas para mantenimiento de cultivo y finca.

Dada la obligatoriedad legal de este registro de datos, muchas explotaciones agrícolas han realizado un proceso de informatización de sus procesos para poder dar soporte a la información requerida por este Real Decreto. Esto les ha permitido adquirir un nivel básico en TIC, es decir un software de gestión y registro de actividades de campo, que les permite seguir avanzando hacia las tecnologías innovadoras que permiten realizar una gestión y manejo inteligente de los procesos agrícolas.

Este tipo de aplicaciones informáticas de gestión de las explotaciones agrícolas se estructuran según el siguiente esquema de funcionalidades:

GESTIÓN DE LA EXPLOTACIÓN AGRÍCOLA

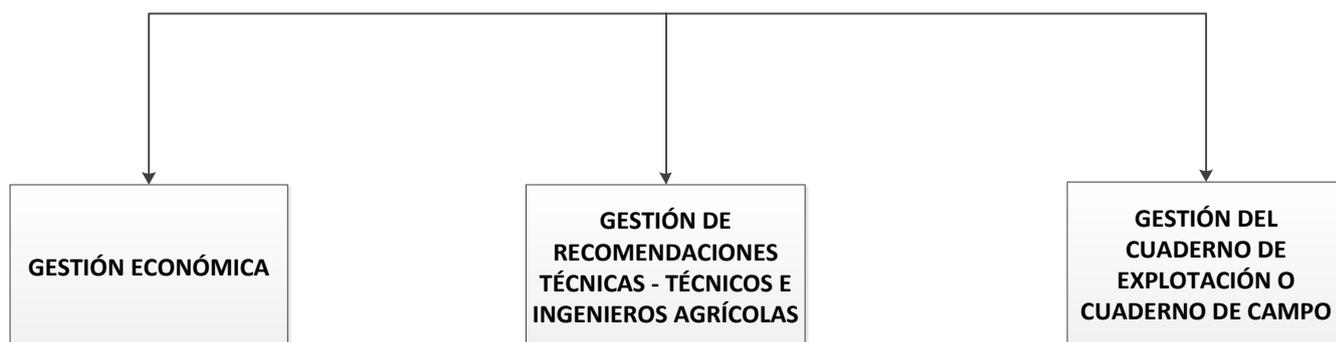


Figura 3 – Esquema de funcionalidades software.

Cada área funcional suele ofrecer las siguientes funcionalidades:

- Gestión económica: Ofrece las funcionalidades correspondientes a la gestión de la rentabilidad económica y control de costes y producción de la explotación agrícola. Se ofrecen funcionalidades de registro de costes relativos a los insumos, costes de fitosanitarios, abonos y demás recursos empleados en el manejo de los cultivos y mantenimiento de las fincas, costes relativos a las personas que trabajan en las fincas, donde por cada actividad se registran las horas empleadas, costes relativos al uso de maquinaria agrícola para cada actividad, etc. También se ofrecen funcionalidades relativas a la producción obtenida, tanto económicamente como en cantidad y calidad. Registrando los costes y la producción, se permite la evaluación del rendimiento económico de la explotación agrícola.
- Gestión de recomendaciones técnicas – Técnicos e ingenieros Agrícolas: Ofrece las funcionalidades correspondientes a la gestión de las actividades que realizan los técnicos e ingenieros agrícolas en las explotaciones agrícolas. Fundamentalmente se refiere al registro de visitas de seguimiento, asesoramiento y recomendaciones de manejo de cultivo (aplicaciones fitosanitaria, realización de análisis, realización de muestreos, realización de operaciones culturales, etc.).
- Gestión del cuaderno de campo o cuaderno de explotación: Ofrece las funcionalidades requeridas por el Real Decreto 1311/2012 en cuanto al registro de datos anteriormente descrito. También ofrece las funcionalidades de consulta en tiempo real de la información registrada en el cuaderno de campo.

Un ejemplo de aplicación informática de gestión de la explotación agrícola es ERP Agro módulo Explotaciones Agrícolas – Agricultores [RI3] de la empresa Grupo Hispatec Informática Empresarial S.A.

- Explotaciones agrícolas de nivel 3:

Serían aquellas explotaciones agrícolas que, de forma adicional a disponer de sistemas TIC para la gestión de la explotación agrícola, disponen de otros mecanismos de gestión y control remoto de elementos que realizan operaciones en campo, como por ejemplo: sistemas SCADA y bombas que realizan los procesos de fertirriego, sistemas de control de clima en invernaderos, sistemas de apertura y cierre de ventanas en invernaderos, etc.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Explotaciones agrícolas de nivel 4:

Serían aquellas explotaciones agrícolas que, de forma adicional a disponer de sistemas TIC para gestión de la explotación agrícola y sistema de telecontrol remoto de sistemas que operan en los cultivos, disponen de sistemas de monitorización, gestión y ayuda a la toma de decisiones en el manejo de los cultivos. La revista Almería en verde editada por Coexphal, en su número 139 [RP1], publicita una aplicación móvil para agricultores que ha sido creada por una cooperativa agrícola muy importante en Almería. En ella se ofertan servicios de monitorización y gestión para la ayuda a la toma de decisiones como herramienta de valor añadido a la propia gestión productiva. Esto significa que el sector cada vez es más receptivo a este tipo de soluciones ya que aportan un valor que hace a las explotaciones agrícolas más competitivas.

Algunos ejemplos de este tipo de sistemas de valor pueden ser:

- Trazabilidad automatizada para seguridad alimentaria

Desde la plantación de las semillas en el nuevo cultivo, pasando por el control fenológico de su desarrollo vegetativo y generativo, hasta el control del manipulado en las cadenas de producción y comercialización donde el producto se pone a disposición del consumidor final, se podría aportar, investigar, desarrollar, e innovar tecnología que permita realizar el seguimiento exhaustivo de todos los procesos, de manera que el consumidor final pueda tener información completa de como se ha manipulado el producto. Adicionalmente los mercados, en el ámbito de los procesos de seguridad alimentaria que apliquen, podrían obtener toda la información requerida a efectos de protección de la salud de los consumidores.

Controlar esta información y proveer su accesibilidad de forma ágil y sencilla es una labor que los productores y las cadenas de comercialización han de promover al objeto de proveer seguridad y confianza en sus mercados objetivo. A través de, por ejemplo, codificación BIDI se puede proveer al consumidor final y a las cadenas de comercialización una forma ágil, rápida, y sencilla de acceso a la información, es decir, todos los datos que se gestionan en todos los procesos que se realizan desde el tratamiento de las semillas hasta la puesta a disposición del producto al consumidor final (*ver ilustración 3 - esquema de secuencia de procesos*).

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

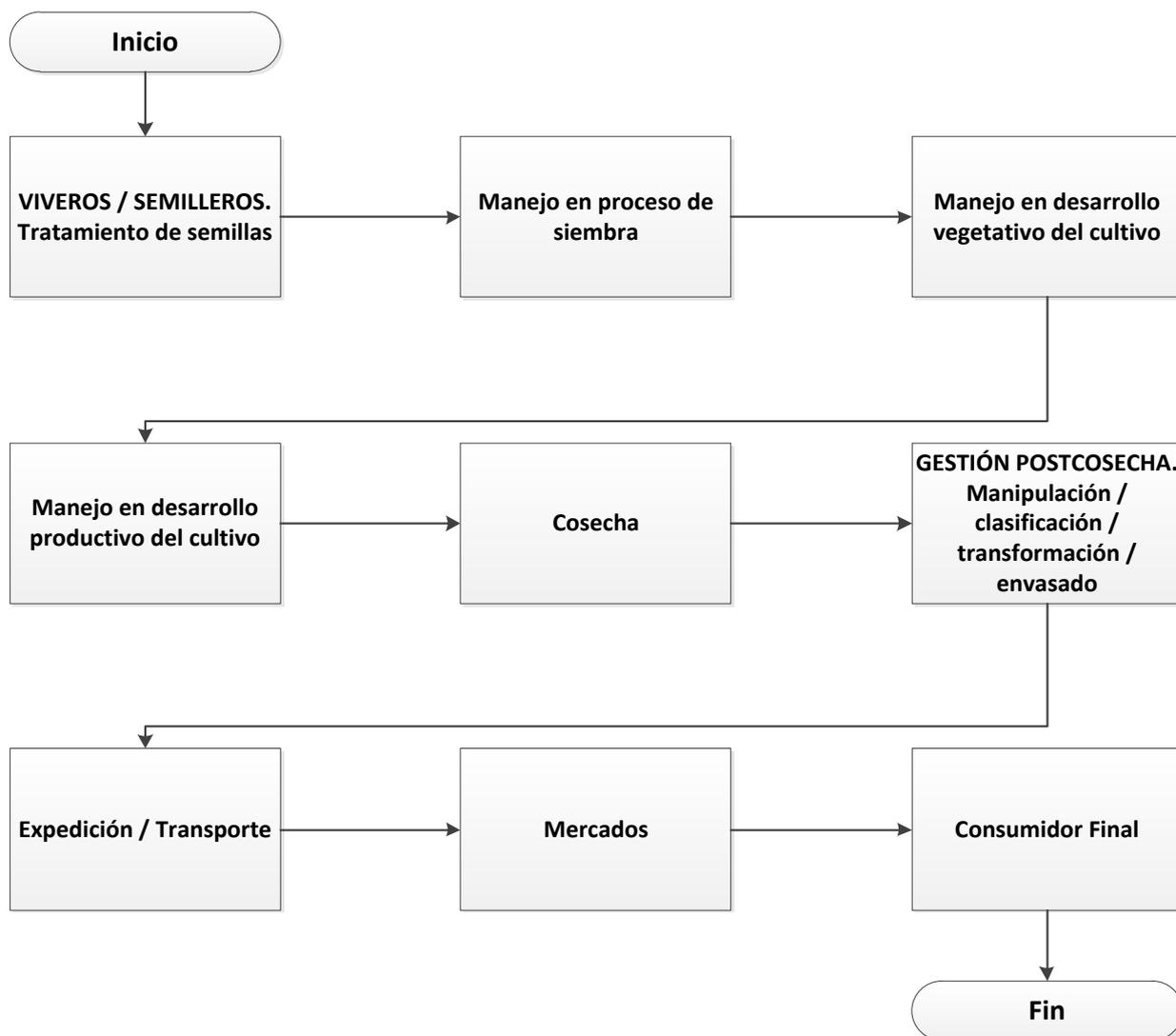


Figura 4 – Esquema del proceso de trazabilidad.

- Cálculo de huellas medioambientales

Asociado a los procesos de trazabilidad agroalimentaria descritos anteriormente, y como garantía adicional, tanto en la seguridad en el tratamiento de los alimentos, como en el respecto al medio ambiente, se contempla el análisis de procesos y la investigación en tecnología para la recogida y el cálculo, ambos de forma automática, de indicadores en todo el ciclo de vida del producto agrícola, es decir, desde su siembra en el cultivo hasta su consumo final. Algunos ejemplos de estas huellas medioambientales son:

- **Huella de Carbono:** Es un indicador de impacto ambiental relativo al consumo de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en todo el proceso (desde campo, hasta consumidor final). El cálculo de esta huella medioambiental exige la recopilación de una gran cantidad de datos donde la automatización de los procesos de recogida de información es fundamental. Implican datos relativos a emisiones de gases de efecto invernadero, aplicación de agroquímicos, aplicación de fitosanitarios, consumo energético en todos los procesos de producción, suministro, transporte, manipulación, etc.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- **Huella Hídrica:** Es un indicador de sostenibilidad que facilita detectar impactos sobre el recurso hídrico a causa de los hábitos de consumo. En definitiva es el volumen de agua utilizado directa o indirectamente en la producción de un determinado producto. En los procesos agrícolas, el uso del agua en toda la cadena productiva y comercializadora es continuo, con lo cual se requiere análisis de procesos y automatización, tanto en recogida de datos, como en cálculo.
- **Huella Ecológica:** Es un indicador de impacto ambiental generado por la demanda de productos. Se basa en la estimación, a partir del análisis, de los recursos que se consumen y los residuos que se producen en todo el proceso (desde campo, hasta consumidor final)

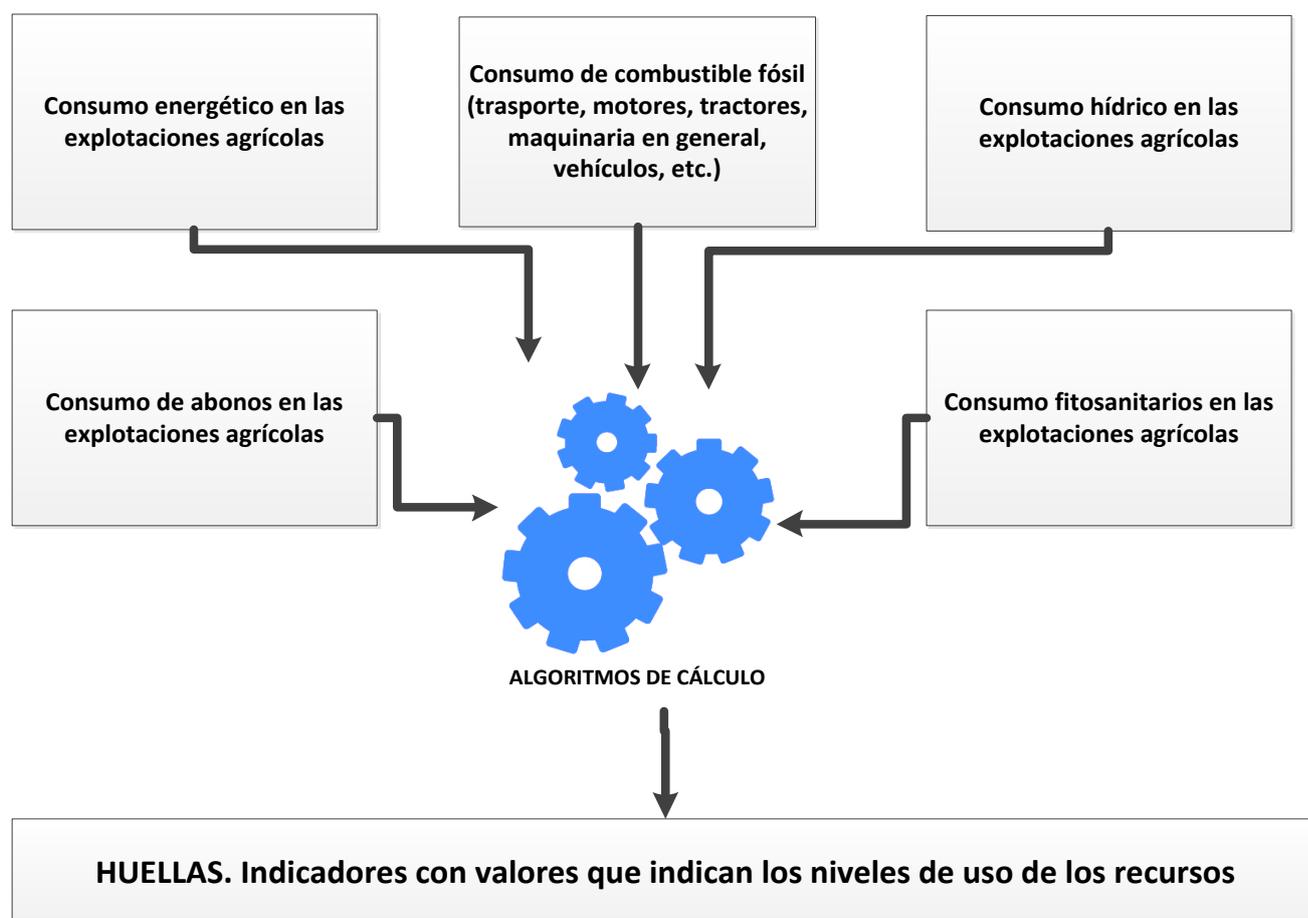


Figura 5 – Esquema del proceso de cálculo de huellas.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Sistemas de ayuda a la toma de decisiones estratégicas en el manejo de los cultivos

Utilizando diferentes fuentes de datos, tales como sensores de planta / clima / suelo, tomas periódicas de información fenológica de los cultivos, teledetección, imágenes, meteorología de la zona, etc., se puede llevar a cabo un estudio sobre el desarrollo vegetativo y productivo de los cultivos con el objetivo de definir un conjunto de indicadores (por ejemplo relativos a olores, colores, tamaños, calibres, rugosidad, estructura de fruto, necesidades hídricas, fertirrigación, fitosanitaria, etc.), con sus correspondientes valores umbral y óptimos que puedan servir como cuadro de mandos para la toma de decisiones estratégicas en los cultivos (sistemas DSS). La variedad de fuentes de información de las que se puede disponer requiere un análisis avanzado de datos para su homogeneización. A través de técnicas BIG DATA, se puede estructurar un sistema de indicadores clave de rendimiento (PKI) que, a través de un SMART GRID, puedan ser presentados al usuario final como soporte de ayuda a la toma de decisiones estratégicas en el manejo de los cultivos.

La información para la toma de decisiones podrá ser presentada a través de diferentes canales de comunicación (WEB, Mobile, SMS, Email, RSS, etc.), pudiendo actuar automáticamente sobre elementos electromecánicos de control de los cultivos (Telecontrol remoto de cultivos, tales como, sistemas de riego, de ventilación, etc.).

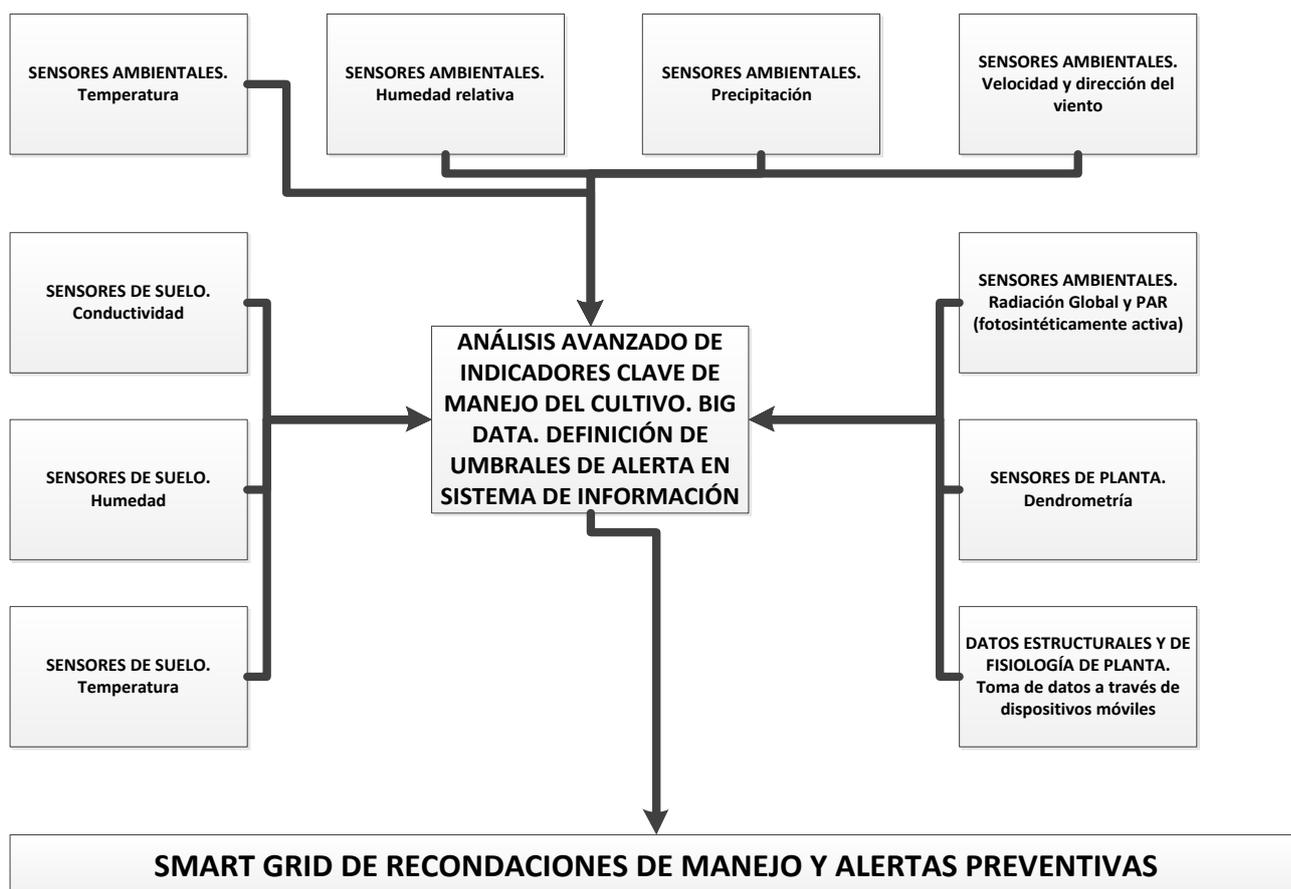


Figura 6 – Esquema del proceso DSS.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

○ Telecontrol remoto de cultivos

Utilizando sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) se puede estudiar la interacción con los diferentes sistemas electromecánicos que operan en los cultivos, tales como:

- **Bombas de suministro/vaciado de balsas:** En los procesos de llenado / vaciado de balsas se podría estudiar el uso de estos elementos. A través de sistemas informáticos se podrían automatizar estos procesos en base a un proceso previo de toma de decisiones (según costes energéticos, según umbrales, según cálculo de necesidades hídricas de las plantas, etc.).
- **Sistemas de Fertirrigación:** Según el estudio agronómico oportuno y análisis automático de los valores relativos a los indicadores definidos, una de las actuaciones automáticas que podría resultar es fertirrigar en unos volúmenes y tiempos determinados. Todos los algoritmos de decisión e interacción automática con los elementos electromecánicos tienen que ser soportados por sistemas de información robustos.
- **Control de clima:** A través de la actuación en diversos dispositivos que permitan modificar las condiciones climáticas del cultivo, se pueden modificar los parámetros óptimos de clima para maximizar la producción. Algunos de estos sistemas pueden ser:
 - **Sistemas de ventilación en invernadero:** Según el estudio agronómico oportuno y análisis automático de los valores relativos a los indicadores definidos, una de las actuaciones automáticas que podría resultar es ventilar determinadas zonas del cultivo. Todos los algoritmos de decisión e interacción automática con los elementos electromecánicos (por ejemplo, motores de apertura de ventanas al exterior), tienen que ser soportados por sistemas de información robustos.
 - **Sistemas de inyección de Calor:** A través de estos sistemas se puede controlar la temperatura ambiental.
 - **Sistemas de Humidificación:** A través de estos sistemas se puede controlar la humedad ambiental.
- **Control de CO₂:** A través de la actuación en dispositivos de inyección de CO₂ se podrá realizar aportes adicionales de CO₂ que mejoran la fotosíntesis y por consecuencia los índices de producción.
- **Cualquier otro sistema electromecánico susceptible de ser automatizado:** En general, y dependiendo del nivel de tecnificación del cultivo, se podría disponer de más elementos electromecánicos. Si estos son susceptibles de ser automatizados, podrían ser integrados en los sistemas de información para que, en base a un proceso previo de toma de decisiones, se pueda actuar automáticamente.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

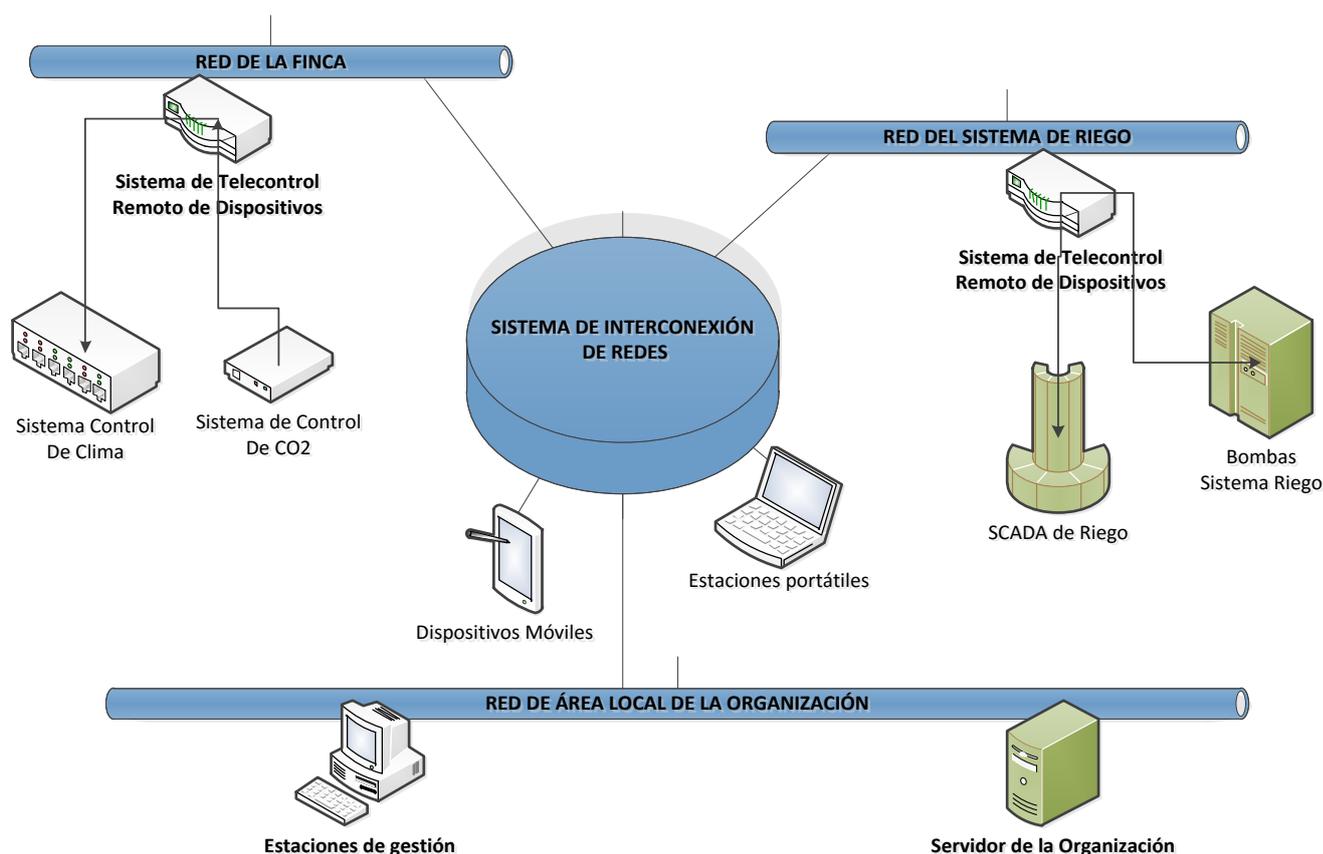


Figura 7 – Esquema de telecontrol remoto de dispositivos.

- Monitorización automatizada de cultivos

Cualquier cultivo está sujeto a una serie de variables (biológicas, ambientales, etc.) que han de ser gestionadas y controladas al objeto de que el desarrollo vegetativo y productivo de las plantas siga los parámetros y directrices esperadas por el agricultor (concepto de agricultura de precisión). Para ello se podrían desarrollar sistemas de información que ayuden al agricultor en el proceso de monitorización de todos estos parámetros. Utilizando una combinación de sondas y sensores, que capturan de forma automática la información, y el desarrollo de sistemas software de análisis de esta información, se podrían establecer plataformas de control y monitorización de cultivos para que los agricultores puedan realizar un seguimiento continuo.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

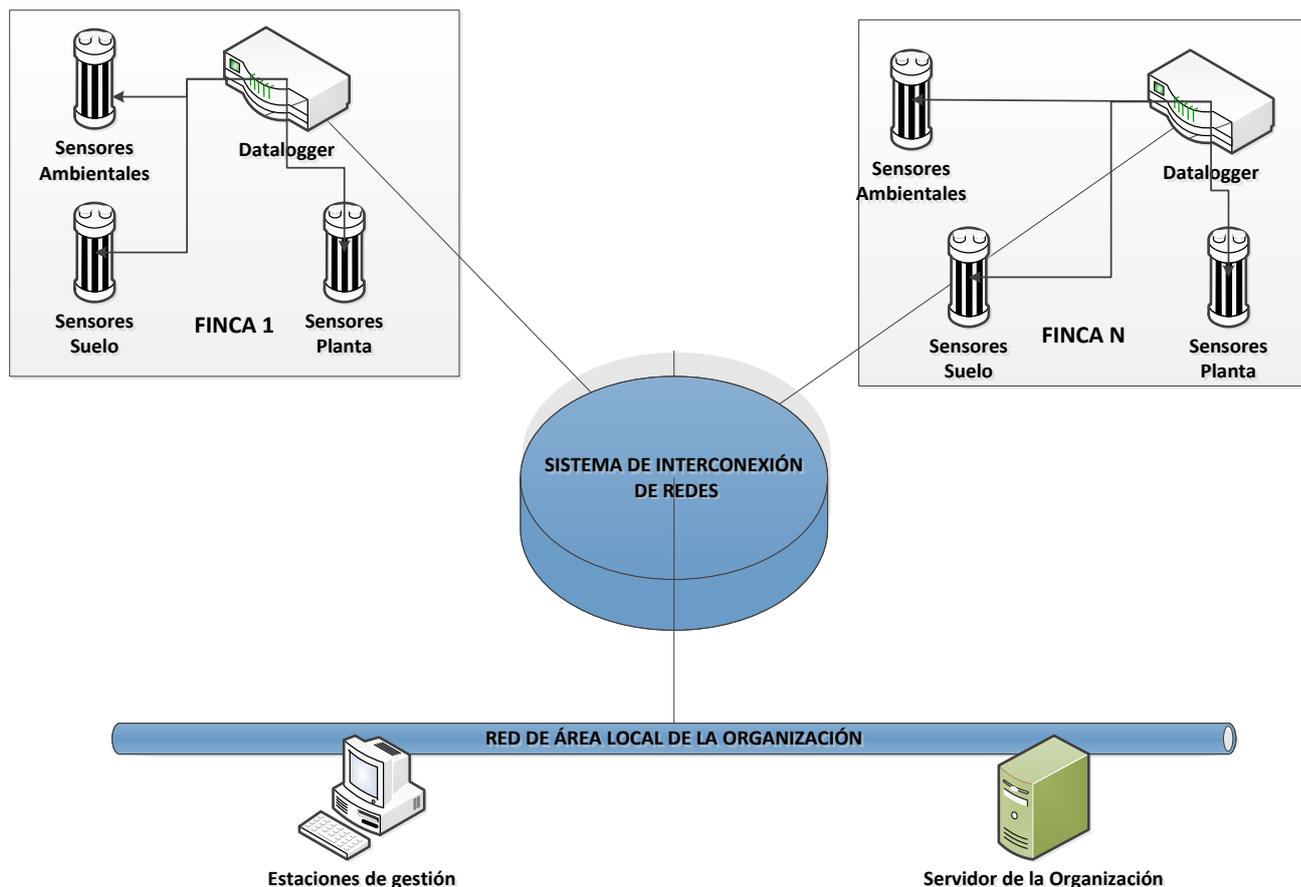


Figura 8 – Esquema de un Sistema de monitorización automatizada de cultivos.

- Robotización de actividades en campo

En cultivos ubicados en entornos controlados donde la situación de las plantas y los procesos están muy estructurados y definidos, se podría aplicar automatización a ciertas labores / operaciones culturales a través Robots. Un ejemplo podría ser la recolección de fruto, donde a través de sistemas de visión artificial el robot podría detectar frutos maduros y tomar decisiones en función de calidades y calibres, para posteriormente, utilizando sistemas automáticos de corte, realizar la recolección. Posteriormente, utilizando sistemas de clasificación y empaque automático, el producto, desde campo, podría quedar preparado para su entrada en el sistema comercializador. Estos sistemas automatizados (ROBOTS) tienen la capacidad de capturar datos (de recolección, de tipo de actividad, de situación de cultivo, etc.) y enviarlos automáticamente, a través de sistemas de interconexión inalámbricos, al sistema de información. Esto permite no solo realizar la actividad en sí de forma automatizada, sino que adicionalmente se puede obtener datos clave para la construcción de indicadores de rendimiento y/o seguimiento de cultivo.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

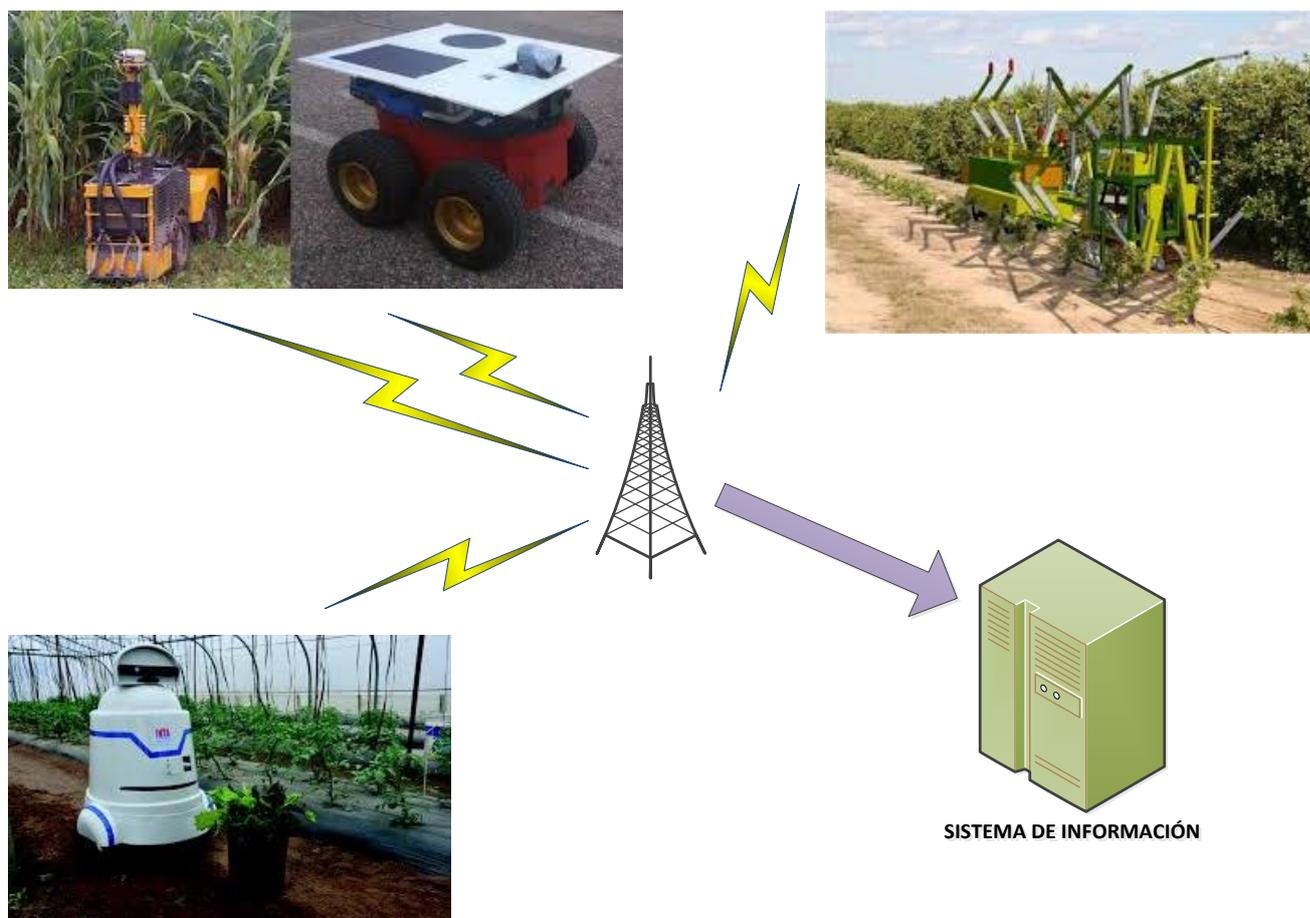


Figura 9 – Esquema de un Sistema de robotización de actividades de campo.

- Teledetección

Como información adicional de entrada a los procesos de estudio agronómico de los cultivos, se podrían contemplar fotografías o grabaciones aéreas que recojan información de una determinada área de cultivo (tomadas desde satélites o drones especializados en esta tecnología).

Los teledetectores registran radiación natural emitida o reflejada por los objetos y áreas circundantes que están siendo observados. En particular, aplicada esta tecnología a los cultivos, se podrían obtener datos fenológicos de las plantas según los niveles de radiación captados.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

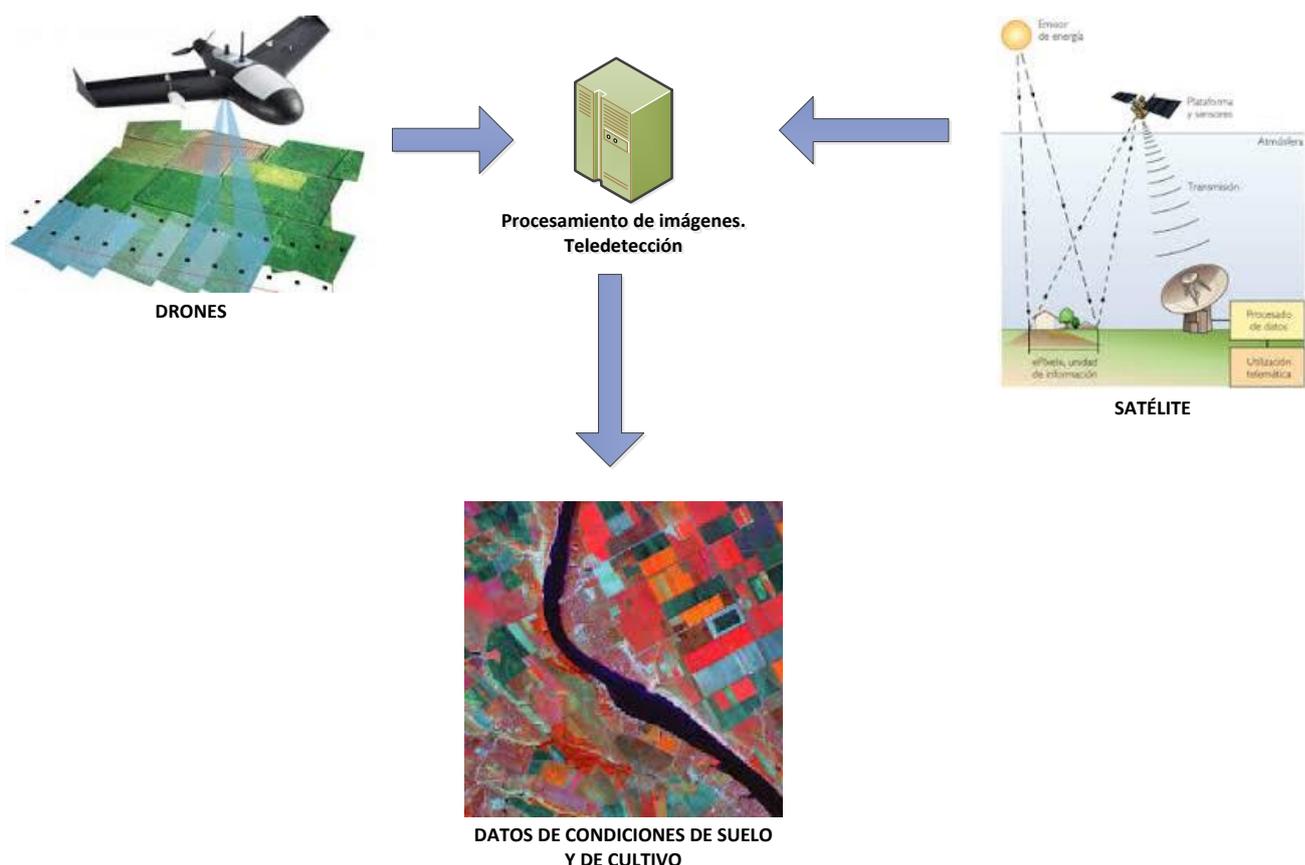


Figura 10 – Esquema de obtención de datos a través de teledetección.

- *Sistema de Información Geográfica tematizados en Agricultura de Precisión (AGROGIS)*

La agricultura de precisión es un concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas basado en la existencia de variabilidad en campo. Para acotar esta variabilidad se necesitan herramientas tecnológicas que acoten los procesos y sus resultados. Una de estas herramientas puede ser los sistemas GIS (SIG – Sistema de Información Geográfico).

Utilizando sistemas SIG se permite tener geoposicionado cualquier elemento relacionado con los cultivos, tales como plantas, elementos de riego, elementos de suministro energético, elementos automotrices, elementos electromecánicos, etc., e incluso tener asociada información descriptiva a cada uno de estos elementos al objeto de poder realizar una explotación de esta información para la toma de decisiones.



GESTIÓN GEOGRÁFICA DE PARCELAS AGRÍCOLAS

Geoposicionado de cultivos, de infraestructura de riego, por variedad, NDVI, etc.

Figura 11 – Gestión geográfica de parcelas agrícolas - AGROGIS.

- Seguimiento de maquinaria en explotaciones agrícolas

Abundando en el concepto de agricultura de precisión, el seguimiento productivo de la maquinaria empleada en los cultivos es fundamental a la hora de realizar los cálculos de costes asociados a estos recursos vs su productividad.

Según los modelos de maquinaria, se podría estudiar el que pueda ser telecontrolada, monitorizada, y geoposicionada. Esto permite que, utilizando las TIC, y en base a criterios agronómicos (monitorización automatizada de cultivos), se pueda interactuar con la maquinaria para optimizar el binomio productividad del recurso – productividad del cultivo.

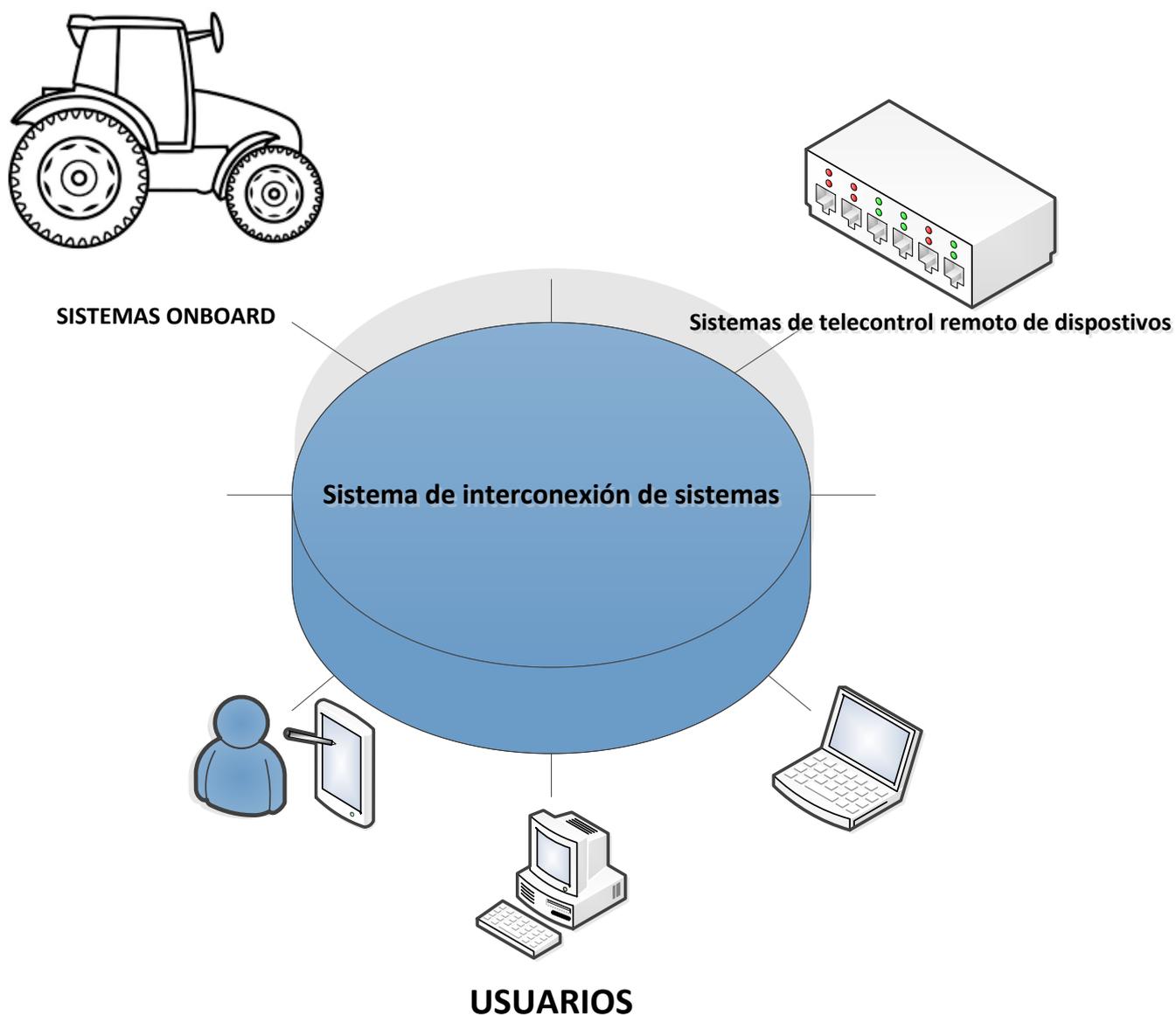


Figura 12 – Esquema de sistemas de seguimiento de maquinaria en campo.

○ Sistemas Predictivos

En el ámbito de la meteorología y la agronomía se podrían estudiar modelos de estimación en base a una serie de parámetros que se pueden capturar automáticamente en campo.

Los sistemas predictivos permiten, no solo anticipar los datos de producción de los cultivos y por consiguiente mejorar la planificación de comercialización de los productos, también permiten optimizar el empleo de los recursos, es decir el coste de la producción, y, en la medida de lo posible, ajustar la producción a la demanda del mercado objetivo. Los sistemas predictivos aplicables al sector agroalimentario:

- Previsión Agro-meteorológica. Para cultivos en invernadero, tanto en interior como en exterior.
- Estimación de desarrollo vegetativo y generativo de los cultivos según su fenología.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Estimación de la producción
 - o Eficiencia hídrica y energética en riego agrícola

Tomando como base las líneas operativas anteriormente descritas, se podrían realizar estudios orientados a la mejora en el uso de los principales recursos que se emplean en los cultivos. Estos son, la energía y el agua.

Gran parte de los costes asociados a una explotación agrícola son los derivados del uso de la energía y el agua. Tal y como se ha indicado anteriormente, con el estudio agronómico oportuno y aplicando técnicas relativas a agricultura de precisión, junto con tecnologías de información y comunicaciones, se podría explotar la información para tomar las decisiones más óptimas en el consumo de estos recursos (cuando es más económico consumir, que volumen a consumir en cada momento, de que fuentes de energía consumir en cada momento, etc.).

El empleo de estas técnicas no solo redundan en un ahorro de costes al agricultor, también se orientan al cumplimiento de todos los protocolos relacionados con el cuidado del medioambiente.

- o Fertirriego

El cálculo de las cantidades de riego y nutrientes en los cultivos es una tarea fundamental tanto en la optimización de recursos hídricos y energéticos, como en la optimización de elementos químicos que pueden contaminar suelos y acuíferos. El objetivo es calcular cuánto y cuando lo necesita la planta para que todo sea absorbido. Para ello se puede estudiar el cultivo para diseñar e implementar tecnológicamente modelos de cálculo de:

- Dosis de riego: Basado en datos climáticos, dependiendo del tipo de suelo, el tipo de cultivo, y si es cultivo bajo invernadero o no, se puede estudiar el cálculo de la dosis de riego y su planificación. Una vez implementado tecnológicamente el modelo, se podría combinar con sistemas SCADA (anteriormente descritos en este documento) para la programación automática del riego (automatización del riego).
- Cálculo de la dosis de nutrientes: Asociado al cálculo de la dosis de riego, se puede completar con un modelo de cálculo de dosis de nutrientes. Con respecto a nutrientes, como los Nitratos, hay que optimizar su lixiviación en suelo y aproximar lo máximo posible su uso a lo que realmente necesita la planta para mejorar en la eficiencia del uso de este recurso. Utilizando sistemas tecnológicos, como sensores y sistemas que analizan el suelo, se puede estudiar y definir un modelo tecnológico que realice este cálculo.

2.2. Tecnologías aplicadas en agricultura de precisión para el modelo SMART Agriculture

Las tecnologías aplicadas en agricultura de precisión para el modelo SMART Agriculture son aquellas tecnologías que posicionan a las explotaciones agrícolas en los niveles 3 y 4, según la clasificación que se ha identificado anteriormente. A lo largo de este documento se desarrollarán cada una de estas tecnologías identificando sus objetivos y lo que aportan a la gestión eficiente y sostenible de las explotaciones agrícolas. A continuación se identifican y posteriormente en este documento se detallarán:

- En el ámbito de la trazabilidad automatizada para seguridad alimentaria, las tecnologías que se pueden aplicar se ciñen fundamentalmente al registro automatizado de datos en campo, es decir, incorporación al sistema de información de toda la información agronómica y de manejo del cultivo a efectos de ofrecer información al consumidor final relativa a todas las operaciones realizadas sobre la

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

planta y producto que está consumiendo. Dentro de estas tecnologías podemos identificar:

- Sistemas de integración con maquinaria agrícola: A través de protocolos estandarizados de comunicación, como puede ser ISOBUS, los sistemas informáticos tienen capacidad de integración con el software embebido que tienen los sistemas que controlan los diferentes dispositivos de las máquinas (sistemas “*onboard*”). En definitiva, la maquinaria agrícola empleada para las operaciones de campo pueden emitir datos que son capturados por los sistemas de información que gestionan la explotación agrícola.
- Sistemas de integración con los SCADA que gestionan los procesos de fertirriego: A través de protocolos estandarizados de comunicaciones, como pueden ser los servicios SOA (Service Oriented Architecture – arquitectura orientada a servicios), los sistemas software de gestión de la explotación agrícola y el de control del SCADA pueden intercambiar datos, como por ejemplo las dosis de fertilizante que se emplea en cada operación de riego (cantidades de Nitrato, Potasio, etc.).
- Sistemas móviles de captura de datos: A través de dispositivos móviles, los operarios de las fincas pueden registrar los datos relativos a las operaciones realizadas en los cultivos. Estos datos alimentan la información de trazabilidad que se le puede ofrecer al consumidor final. Algunos dispositivos móviles de captura de datos automatizada pueden ser: SMART phones y tablets con software específico de captura y envío automatizado de datos a los sistemas de información, o SMART pens (bolígrafos digitales). Bolígrafos que incluyen mini cámaras digitales y sistemas de comunicación para que, conforme se vaya escribiendo, el bolígrafo vaya capturando el dato escrito, lo interprete y lo envíe al sistema centralizado de información.
- Sistemas BIG DATA para análisis avanzado de la información capturada: Data la cantidad de información y su diversidad, es importante utilizar sistemas analíticos avanzados que sean capaces de homogeneizar y estructurar la información capturada, de manera que se pueda presentar de forma amigable y entendible para el usuario final (consumidor de los productos producidos en la explotación agrícola).
- En el ámbito del cálculo de las huellas medioambientales, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente son algoritmos implementados en software para el cálculo automatizado del valor resultante en función del consumo de recursos que se realiza, bien a nivel de la organización en global, bien a nivel de cada producto que produce la organización. Es decir, con la solución software de gestión integral de la explotación agrícola, se va registrando todo el consumo de recursos en las diferentes actividades que se van realizando en campo. Todos estos recursos consumidos tendrán relacionado una tabla de equivalencias en cuanto a cantidades que se está empleando. La huella será la agrupación de todas estas cantidades. En cualquier caso (organización o producto) algunas de estas huellas son:
 - Huellas de carbono: Según la agencia de certificación AENOR, la huella de carbono [RI4] es una *eco etiqueta* para descubrir el cálculo de las emisiones de todos los gases de efecto invernadero asociados a organizaciones, eventos o actividades o al ciclo de vida de un producto en orden a determinar su contribución al cambio climático y se expresa en toneladas de CO2 equivalentes. La huella de carbono es un instrumento para determinar, evaluar y comunicar el efecto de los productos, servicios y organizaciones en el cambio climático. La huella de carbono contribuye a:
 - La cuantificación, reducción y neutralización de las emisiones de CO2 en productos y organizaciones en el marco de la mitigación del cambio climático.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- La creación de un mercado de productos y servicios con reducida generación de carbono, dando respuesta a la demanda social y medioambiental actual.
- La identificación de oportunidades de ahorro de costes en las organizaciones.
- La demostración ante terceros de los compromisos de la organización con la responsabilidad social a través de sus requisitos en mitigación del cambio climático.
- Huellas hídricas: Según la Asociación Española para la Calidad (AEC), la huella hídrica [RI5] mide el volumen de agua consumida, evaporada o contaminada, ya sea en unidad de tiempo o en unidad de masa. Además es un indicador del uso de agua, uso tanto directo como indirecto. Este concepto (en inglés Water Footprint) se dio a conocer en 2002 por Arjen Hoekstra del instituto de educación del agua de la UNESCO. A día de hoy se define como: “el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir bienes y servicios de un individuo, de una comunidad o de una empresa”. El indicador de huella hídrica es válido para llevar a cabo acciones de mejora en el consumo de agua. La Organización Internacional de Estandarización (ISO) está trabajando en una norma en relación con la huella hídrica (ISO 14046). En relación con la toma de datos para el cálculo a través del algoritmo automatizado en el sistema de información, este concepto clasifica las fuentes de agua en:
 - Agua gris: El volumen de agua contaminada asociada a la producción de bienes y servicios. En particular en agricultura de precisión se refiere a la cantidad de agua contaminada en los procesos productivos de las fincas.
 - Agua verde: Es el volumen de agua evaporada. En particular en agricultura de precisión se refiere a la medición de la cantidad de agua evaporada en el proceso de riego y a la cantidad de evapotranspirada por las plantas, cálculo que se puede realizar a través de la ETC del cultivo (Evapotranspiración del cultivo).
 - Agua azul: Es el volumen de agua dulce consumida de los recursos hídricos (aguas superficiales o subterráneas). En particular en agricultura de precisión sería la cantidad de agua utilizada en el proceso de riego.
- En el ámbito de los sistemas de ayuda a la toma de decisiones estratégicas en el manejo de los cultivos, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente están relacionadas con la construcción de módulos software que implementen “SMART GRID”, es decir, tablas de datos que presenten valores de indicadores clave de rendimiento (PKI – Performance Key Indicators). A través de la definición de umbrales y alertas por cada indicador, el gestor del cultivo puede tomar decisiones tanto preventivas como reactivas en relación al manejo del cultivo, es decir, las actividades que se han de realizar tanto en la finca como en el cultivo para que su desarrollo, tanto vegetativo como productivo, sea el óptimo. Entiendo desarrollo óptimo como el orientado a la generación de producto agrícola de máxima calidad y máxima producción.
- En el ámbito del telecontrol remoto de cultivos, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente están relacionadas con la implantación en las fincas de estaciones de control remoto de elementos usados en las labores de campo. Este tipo de elementos, que pueden operar y captar datos en las fincas, una vez conectados con el sistema de información, pueden ser controlados por los agricultores de forma que puedan ejecutar operaciones en campo sin estar presentes en él. Los beneficios que ofrece este tipo de sistemas al agricultor es la optimización de su trabajo y la posibilidad de actuar de forma simultánea en varias fincas de su explotación agrícola. La optimización de estas labores redundará en una reducción de costes de cultivo, ya que se optimiza los costes de personal.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- En el ámbito de la monitorización automatizada de cultivos, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente están relacionadas con la instalación en las fincas de sondas y sensores que tienen la capacidad de tomar datos automáticamente (datos fenológicos, de fisiología de planta, de características de suelo, etc.) para que posteriormente puedan ser interpretados a través de indicadores y alertas que permitan establecer un sistema de monitorización de los estados de las plantas. Una posible implantación de este tipo de sistemas puede ser: Un conjunto de dataloggers (sistemas que concentran datos procedentes de sondas y sensores) instalados en las zonas de muestreo que se hayan determinado en las fincas, es decir, en puntos de seguimiento detallado a monitorizar, que están conectados en tiempo real con los sistemas de información y que tienen conectados un conjunto de sondas y sensores, como pueden ser:
 - Sensores de temperatura ambiental: La temperatura ambiental es uno de los valores fenológicos más importantes que determinan el desarrollo vegetativo y productivo de las plantas. Es importante registrar informáticamente estos valores como indicadores clave para tomar decisiones en el manejo del cultivo.
 - Sensores de humedad relativa ambiental: La humedad relativa ambiental es otro de los valores fenológicos importantes que determinan el desarrollo vegetativo y productivo de las plantas. Es importante registrar informáticamente estos valores como indicadores clave para tomar decisiones en el manejo del cultivo.
 - Sensores de radiación: La radiación es el valor determinante para evaluar la capacidad fotosintética de las hojas. Es importante destacar que la producción de las plantas está determinada por la capacidad de fotosíntesis de sus hojas. Es por esto que la radiación PAR (Photosynthetically Active Radiation – Radiación Fotosintéticamente Activa), es decir el porcentaje de radiación solar que actúa directamente en la fotosíntesis, es un valor a registrar informáticamente para que pueda participar en el conjunto de indicadores que orientan sobre la evolución de la producción de la planta.
 - Pluviómetros: Dispositivos que miden la cantidad de lluvia, es decir, precipitaciones que ha habido en la zona. Estos valores se registran informáticamente, fundamentalmente en agricultura extensiva, para evaluar las dosis de riego necesarias (en función de si ha llovido o no).
 - Sensores de velocidad y dirección del viento: Este tipo de dispositivos orientan sobre qué tipo de operaciones en campo es conveniente realizar y su impacto en la fenología del cultivo.
 - Sensores de planta: Dentro de este tipo de elementos, los más importantes que se pueden encontrar son:
 - Dendrómetros: Este tipo de elementos miden en continuo las fluctuaciones de crecimiento de tronco o tallo de la planta a la largo de un determinado tiempo. Este tipo de elementos ofrece información relativa a como se está desarrollando vegetativamente las plantas. El registro informático de estos datos ofrecerá información a los agricultores sobre cómo se están nutriendo las plantas.
 - Savia: Este tipo de elementos miden en continuo el flujo de savia en el tallo, con lo cual, el registro informático de estos datos ofrecen información sobre nutrición, con lo cual, este dato combinado con el dendrómetro pueden ser un indicador clave de desarrollo de cultivo muy importante a tener en cuenta.
 - Sondas de suelo: Dentro de este tipo de elementos, los más importantes que se pueden encontrar son:
 - Sondas de succión: es instrumental utilizado para extraer la solución del suelo. Este tipo de sondas ofrecen información sobre las características del suelo en el que se encuentra plantado el cultivo, con lo cual, al registrar informáticamente este dato el agricultor puede

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- determinar qué zona de su finca es la que potencialmente puede ofrecer un mejor rendimiento.
- **Sondas de nutrición:** Este tipo de elementos registran los niveles de Nitrato y Potasio en suelo. Si este tipo de sondas se colocan cerca de las raíces, es un valor que puede determinar la disponibilidad de nutrientes que tiene la planta, con lo cual, el registro informático de estos datos es un valor a tener en cuenta en los indicadores de nutrición del cultivo.
 - **Sondas de CE, temperatura y humedad de suelo:** Las sondas de Conductividad Eléctrica mide los niveles de solución salina, cantidad de agua y temperatura que tiene el suelo, en definitiva mide las condiciones para que las raíces puedan tomar la solución nutritiva de la que disponen en suelo.
- En el ámbito de la robotización de actividades de campo, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente son las relacionadas con el telecontrol de sistemas tecnológicos y la automatización de labores, es decir, a través del uso de dispositivos autónomos que realizan automáticamente labores, no solo se realizan los trabajos de forma óptima, sino que de forma adicional se pueden obtener datos de valor que alimenten al sistema de información y permitan gestionar adecuadamente tanto el manejo de los cultivos como los rendimientos de la explotación agrícola.
 - En el ámbito de la teledetección, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente son las que permiten la incorporación de teledetectores que captan información relativa a los índices de variabilidad de los cultivos (Normalized. Difference Vegetation Index – Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), es decir, un indicador que suministra información sobre la diferencia y variabilidad de vegetación en una determinada superficie como puede ser una finca agrícola. Adicionalmente pueden ofrecer información relativa a los porcentajes de radiación de una superficie frente a otra, datos relativos a humedad, etc. En definitiva, el uso de las tecnologías de teledetección a través de los sistemas de información permite definir algoritmos para evaluar el desarrollo del cultivo y su potencial en las fincas agrícolas. Este tipo de información fundamentalmente se puede obtener de:
 - **Drones o UAV (Unmanned Aerial Vehicle – Vehículo aéreo no tripulado).** Dispositivos que pueden volar a suficiente altura y que pueden llevar cámaras con teledetectores que permiten tomar imágenes de este tipo. Normalmente este tipo de imágenes tomadas por drones suelen requerir un post-procesado al objeto de homogeneizar los datos de territorio tomados, ya que el dron no es un elemento estático de toma de imágenes, sino que está sujeto a los movimientos que puede producir el medio aéreo.
 - **Satélite.** Las imágenes tomadas por satélite suelen ser bastante homogéneas ya que estos dispositivos, al estar geoestacionados, permiten que las imágenes en un mismo punto a diferentes momentos temporales sean tomadas siguiendo el mismo criterio espacial. La desventaja que puede tener es que al ser tomadas desde una determinada órbita fuera de la atmosfera terrestre, estas pueden verse afectadas por eventos meteorológicos, como por ejemplo, si está nublado la visibilidad se ve muy reducida.
 - En el ámbito de AGROGIS, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente son herramientas software de gestión geográfica (GIS – Geographic Information System – Sistema de Información Geográfica), es decir, software que permite representar gráficamente mapas que contienen información adicional por cada elemento gráfico representado (metadatos). Esta información adicional permite caracterizar cualquier elemento representado en el mapa (fincas, cultivos, bombas de riego, pozos, canalizaciones, sectores de riego, maquinaria agrícola, etc.). Este tipo de herramientas agilizan mucho la gestión ya que, de forma muy visual, el sistema permite al usuario realizar explotación de datos y registro de información para su posterior tratamiento. Estas herramientas de productividad ofrecen un valor diferencial

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

a la gestión de la explotación agrícola ya que maximizan y optimizan su tiempo de uso, redundando en un ahorro de costes significativo.

- En el ámbito del seguimiento de la maquinaria agrícola, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente son aquellos dispositivos que, de forma remota y automática, permiten telecontrolar todos los mecanismos de operación que tiene la maquinaria agrícola, por ejemplo: dosificadores, palas, aplicadores, etc.), así como monitorizar y georreferenciar su operación (estado del motor, niveles aceite, operación que está realizando, representación en GIS de su labor, etc.). Por ejemplo, cada vez más los tractores incorporan sistemas "OnBoard", es decir, sistemas a bordo del tractor que contienen conexiones con todos los mecanismos de manera que, utilizando protocolos estándares de comunicación como puede ser ISOBUS, los sistemas de información pueden interactuar y realizar este control y monitorización de operaciones. Por ejemplo New Holland [RI6], uno de los grandes fabricantes de tractores, ya incorpora en sus vehículos este tipo de sistemas y protocolos para establecer esta relación. Otro ejemplo es AGCorp [RI7] que es otro de los grandes fabricantes de tractores que también lo incorpora. Este tipo de soluciones de interoperabilidad ofrecen un alto grado de control y de obtención de datos de campo. Otro ejemplo de tractores que incorporan tecnología de este tipo es John Deere. En la revista Agro Técnica, en su número 7 de Julio de 2007 [RP3], se presenta un artículo llamado "¡Esto lo cambia todo!", donde se presenta el sistema GreenStar 2, un sistema TIC instalado en los tractores totalmente compatible con ISOBUS donde, basado en sistemas GIS, se permite llevar un control total de las actividades que el tractor está realizando en campo.
- En el ámbito de los sistemas predictivos, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente son herramientas software que implementan algoritmos de cálculo que simulan el desarrollo vegetativo y productivo de los cultivos. Para llevar a cabo esta labor, por cada especie y variedad de cultivo, se ha de modelar todo su desarrollo (desde semilla hasta su fase productiva). Obteniendo este conocimiento y modelándolo a través de formulaciones matemáticas, los sistemas de información podrá simular escenarios futuros en base a las condiciones fenológicas actuales. Adicionalmente se permitirá evaluar estos escenarios futuros simulando otras situaciones fenológicas, de manera que, conociendo el mejor escenario, el agricultor podrá realizar acciones en el manejo del cultivo que se orienten intentar conseguir estas óptimas condiciones. Los sistemas predictivos permiten estimar cosecha, programar y planificar siembras, con lo cual fomenta un mejor control de la producción y por lo tanto una mejor comercialización de los productos agrícolas.
- En al ámbito de la eficiencia hídrica y energética en los procesos de fertirriego, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente son herramientas software que permiten combinar diferentes fuentes de datos creando un SMART GRID que permita tomar decisiones orientadas a la optimización de los recursos (en particular recursos energéticos e hídricos). Una fuente de datos puede ser por ejemplo el mercado eléctrico, es decir, OMIE [RI8], que es organismo que rige el mercado eléctrico español, en concreto el mercado diario e intradiario, fija los precios indexados a mercado para el día siguiente de forma horaria, con lo cual, en un día en particular se puede conocer el precio de la electricidad para el día siguiente. Adicionalmente, utilizando tecnologías Big Data Analytics (sistemas de análisis de gran cantidad de información distribuida), se podría realizar una estimación futura, por ejemplo a 5 días, empleando el histórico de precios que el organismo pone a disposición. En definitiva, aquellos agricultores que tengan un contrato con comercializadoras de electricidad de tipo indexado a mercado, pueden conocer y estimar los costes por hora de la energía a días futuros. Otra fuente de datos puede ser los modelos de cálculo de dosis de fertirriego (a continuación se identifican) donde se puede calcular las necesidades de fertirriego que el cultivo necesita. Simplemente combinando estas dos fuentes de información en un SMART GRID se podría calcular los tiempos de riego en los momentos horarios en los que la energía es más económica. Esta información de valor

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

ofrece al agricultor una potencial reducción de costes de cultivo muy alta, ya que en determinadas zonas, los costes energéticos pueden suponer hasta el 40% de los costes de cultivo [R19] (ejemplo de noticia en el periódico Heraldo de Aragón, donde se identifica el riesgo que suponen los costes energéticos en la sostenibilidad de las explotaciones agrícolas).

- En el ámbito del fertirriego, las tecnologías que se pueden aplicar fundamentalmente son herramientas software que permiten implementar algoritmos de cálculo de dosis de fertirriego (cálculo en función de las capacidades de campo, necesidades hídricas de las plantas, etc.), es decir:
 - Cantidad, temporalidad y periodicidad de suministro de agua el cultivo.
 - Dosis de nutrientes por unidad de volumen, fundamentalmente Nitrato y Potasio.

CAPÍTULO 3. BENEFICIOS DEL MODELO SMART AGRICULTURE

- 1.- Beneficios a las explotaciones agrícolas**
- 2.- Beneficios medioambientales**
- 3.- Beneficios sociales.**

3. Beneficios del modelo SMART Agriculture

Los beneficios que aporta el modelo se podrían clasificar en varias áreas:

3.1. Beneficios a las explotaciones agrícolas

Los beneficios que una gestión eficiente a través de técnicas de agricultura de precisión pueden ser:

- Reducción de costes en el cultivo: Uno de los principales motivos para el uso de tecnologías de agricultura de precisión es la optimización en el uso de recursos, es decir, el empleo de recursos a menor coste (los adecuados y en el momento adecuado). Esta metodología de uso de los recursos provoca una reducción en los costes de cultivo, haciendo más rentable y sostenible la explotación agrícola.
- Incremento en producciones y calidad: Otro de los objetivos en el uso de las metodologías y tecnologías enmarcadas en la SMART Agriculture es la mejora en el manejo agronómico de los cultivos, a través de alertas, indicadores y recomendaciones de actividades en campo. Estos criterios de decisión están orientadas a mejorar el desarrollo vegetativo y productivo de las plantas, con lo cual se orientan a mejorar la calidad y cantidad de producto recolectado, en definitiva la producción de la explotación agrícola.
- Reducción en el uso de recursos: Como se ha identificado anteriormente, las metodologías y tecnologías empleadas en el marco de la SMART Agriculture fomentan la reducción en el uso de recursos, es decir:
 - o Recursos Humanos: Al optimizar las labores de campo se fomenta el empleo de recursos humanos especializado en los momentos adecuados.
 - o Recursos materiales: Al disponer de criterios de decisión y recomendaciones en las labores de campo se dispone de información fidedigna para emplear los recursos necesarios en el momento necesario (fitosanitarios, fertilizantes, etc.).
- Incrementos en el rendimiento y productividad: Como se ha identificado anteriormente, las metodologías y tecnologías empleadas en el marco de la SMART Agriculture provocan una reducción de costes en el cultivo y un incremento en producción y calidad, con lo cual, si hay reducción de costes e incremento de calidad y producción, hay incremento en el rendimiento y productividad de la explotación agrícola.

En la revista Almería en verde editada por Coexphal, en su número 140 de marzo de 2016 [RP2], la propia portada titula la publicación como “Almería avanza en agrotecnología”. Esto es un signo claro de la sensibilidad que el sector agroalimentario tiene en relación a la aplicación de nuevas tecnologías en los procesos productivos, ya que supone un claro beneficio para la rentabilidad y sostenibilidad de las explotaciones agrícolas.

3.2. Beneficios medioambientales

Los beneficios que una gestión eficiente según el modelo SMART Agriculture pueden ser:

- Certificación y garantías en el correcto uso y optimización de recursos medioambientales: Tal y como se ha identificado anteriormente, el uso de las TICs en el ámbito de la SMART Agriculture permite llevar un registro de los recursos que se van consumiendo en la realización de las actividades de campo. Gran parte de estos recursos conllevan la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo de un bien tan preciado como el agua. A través de la explotación de estos datos, se podría conocer los niveles de consumo de este tipo de recursos, creando una “huella” en relación a su uso, es decir, una identificación cuantitativa de la cantidad de recursos consumidos en este aspecto. Las huellas de carbono e hídricas, son huellas

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

medioambientales que permiten certificar y garantizar el consumo que se está realizando. Dado que se incentiva la reducción de estas huellas, a través de las certificaciones de calidad que garantizan una posición dominante en los mercados, el registro de esta información permite a las explotaciones agrícolas aplicar políticas de reducción en los consumos, fomentando el que la explotación agrícola sea más sostenible medioambientalmente

- Minimización del uso de recursos medioambientales: Tal y como se ha identificado anteriormente, las tecnologías aplicadas a agricultura de precisión permiten optimizar el uso de determinados recursos que potencialmente pueden impactar negativamente en el medio ambiente. En definitiva si se aplica un determinado producto fitosanitario en el momento adecuado, el impacto de los productos químicos que lleva será menor ya que se empleará la dosis adecuada. Si se aplica un determinado fertilizante en el momento y dosis adecuado, los niveles de nitratos en suelo serán menores, minimizando el impacto de la lixiviación de nitratos en suelo, que es muy perjudicial fundamentalmente para los acuíferos. Si se optimiza el uso del agua, ya que se puede determinar el momento adecuado y dosis adecuada de riego, se está salvaguardando un bien tan escaso en ciertas zonas como es el agua.
- Explotaciones agrícolas sostenibles medioambientalmente: Las explotaciones agrícolas trabajan con el medio natural, con lo cual es fundamental que sean medioambientalmente sostenibles. Las tecnologías anteriormente identificadas trabajan por optimizar y hacer más eficiente el uso de recursos, para que las fincas agrícolas no solo sean sostenibles económicamente, sino medioambientalmente.

3.3. Beneficios sociales

Los beneficios que estas tecnologías aportan a la sociedad en general podrían ser:

- Fomentan el trabajo especializado: El uso de las tecnologías en el ámbito de la SMART Agriculture fomentan la especialización y formación continua en el personal que trabaja en este tipo de explotaciones agrícolas. Un trabajo especializado donde se adquiere un Know-how de valor fomenta la estabilidad laboral, con lo cual, se impulsa una sociedad económicamente estable y con capacidad de crecimiento.
- Fomentan la creación de empresas en el sector de las tecnologías auxiliares de la agricultura: El uso de este tipo de tecnologías en explotaciones agrícolas que trabajan con agricultura de precisión impulsa la creación de empresas que trabajan en estas tecnologías auxiliares a la agricultura. La creación de nuevas empresas implica creación de puestos de trabajo, con lo cual, de forma indirecta, la agricultura de precisión genera empleo indirecto en este ámbito y por lo tanto riqueza en la zona.
- Posible reutilización de residuos generados en los núcleos de población como recursos en las explotaciones agrícolas: Aunque actualmente, por lo menos en España, este hecho está poco desarrollado, ya se están desarrollando proyectos I+D en este sentido, es decir, en aprovechar los residuos que se generan en los núcleos de población o los que se generan en las propias explotaciones agrícolas, para generar un valor añadido, bien sea para aprovechamiento energético o para aprovechamiento en la reutilización de los productos como fertilizantes. El uso de tecnologías que valorizan los residuos, como puede ser las calderas de generación de energía y CO₂, o la generación de pelet como fuente de energía, y su control a través de las TICs, permiten la minimización de impactos medioambientales negativos y la reducción de costes en los cultivos (y por lo tanto el incremento de productividad).

**CAPÍTULO 4. SISTEMAS TECNOLÓGICOS EN GENERAL
APLICADOS EN DIVERSOS ÁMBITOS DEL MODELO SMART
AGRICULTURE.**

**1.- Tecnologías de base que la explotación agrícola ha de disponer para afrontar un
modelo SMART Agriculture.**

2.- Ámbitos del modelo SMART Agriculture

4. Sistemas tecnológicos en general aplicados en diversos ámbitos del modelo SMART Agriculture.

A continuación se identifican un conjunto de tecnologías por cada ámbito de actuación en el modelo SMART Agriculture.

En todos los sub-epígrafes de este punto número 4 se introducen e identifican conceptualmente todas las tecnologías que posteriormente en el punto 5 y siguientes se desarrollarán completamente.

4.1. Tecnologías de base que la explotación agrícola ha de disponer para afrontar un modelo SMART Agriculture

Antes de profundizar en el detalle de cada una de las tecnologías anteriormente identificadas es necesario definir la base tecnológica que las explotaciones agrícolas han de tener para poder acometer proyectos de innovación tecnológica aplicada a la SMART Agriculture.

La SMART Agriculture supone un cambio total de paradigma de gestión en las explotaciones agrícolas frente a la gestión tradicional. Esto implica que todos los actores que intervienen en los procesos han de ser proactivos en el aprendizaje y uso de estas nuevas tecnologías. Fundamentalmente, como base tecnológica, tan solo se requiere disponer de: una infraestructura adecuada en las fincas y un sistema de información escalable que permita ir añadiéndole funcionalidades conforme se vayan implantando tecnologías y procesos.

4.2. Ámbitos del modelo SMART Agriculture

Una posible clasificación de los ámbitos de actuación en el modelo SMART Agriculture puede ser:

4.2.1. Monitorización de cultivos para ayuda a la toma de decisiones

El objetivo de este ámbito de actuación es disponer de un sistema de ayuda a la toma de decisiones en el manejo del cultivo orientado a maximizar calidad y producción, es decir, definir un conjunto de variables que, a efectos de indicadores, oriente al usuario en las decisiones de operación sobre las fincas y los cultivos.

La secuencia de procesos que se suele seguir en la puesta en marcha de una solución tecnológica de este tipo es:

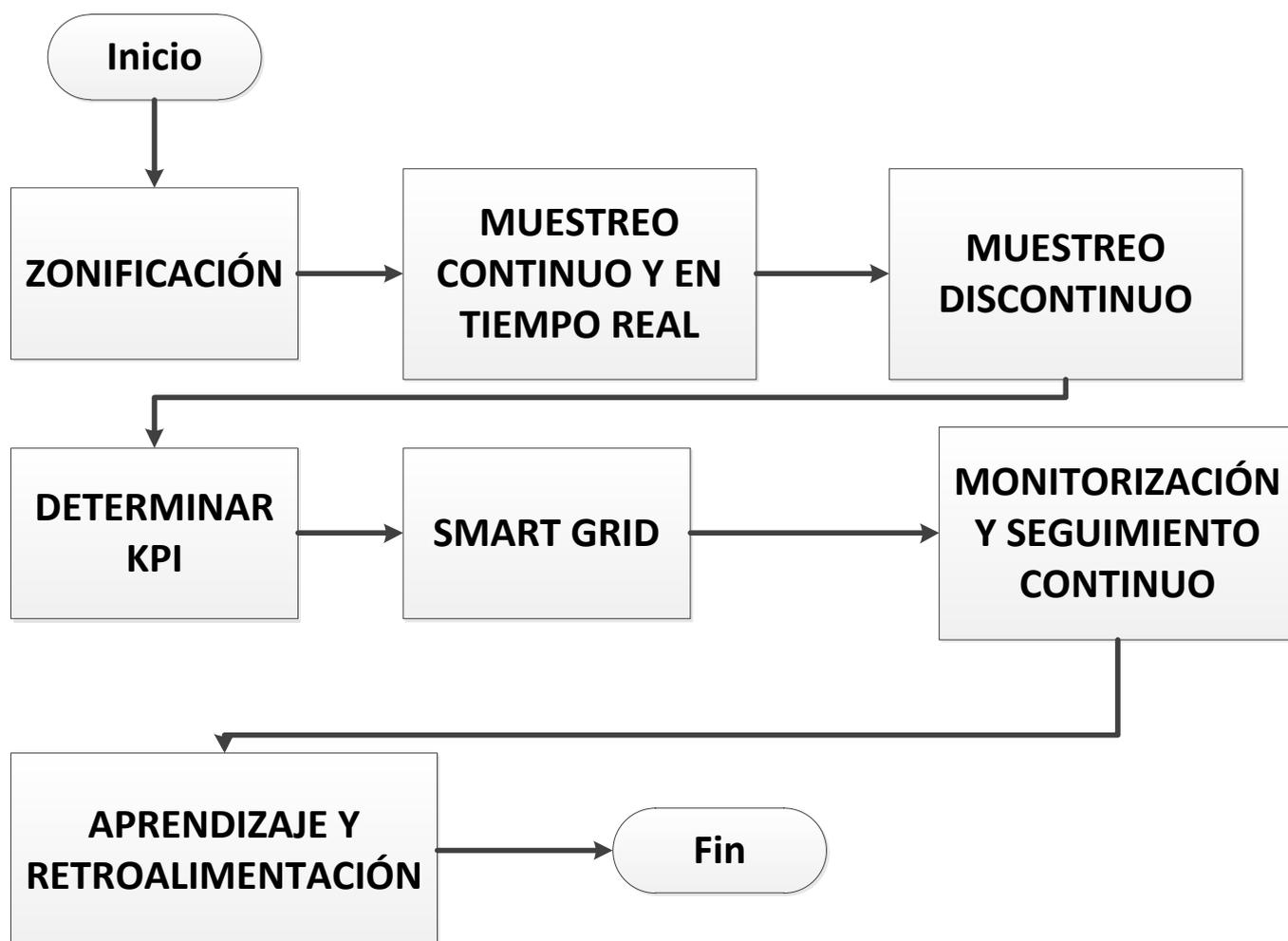


Figura 13 – Flujograma de proceso.

- Proceso de zonificación. Determinación de los puntos de seguimiento detallado o puntos de monitorización: El objetivo de estas tareas es determinar las zonas de muestreo en la finca agrícola, es decir, determinar cuáles son las zonas más representativas de toda la finca agrícola para que los resultados ahí obtenidos puedan ser extrapolados a todo el cultivo. Para ello, el uso de una herramienta GIS (Sistema de Información Geográfico), aporta un valor importante ya que se pueden mostrar múltiples capas geográficas que aportan información necesaria para este proceso de determinación. Algunas de estas capas de información son:
 - o *Litología*: La litología es la parte de la geología que estudia la composición y estructura de las rocas, como su tamaño de grano, características físicas y químicas, estructuras de sedimentos, composición, textura, etc. En definitiva esta capa de información en el GIS aportará los datos de tipo de suelo en el que se plantará el cultivo. El tipo de suelo es una información fundamental para determinar la zona óptima de seguimiento de cultivo, ya que determina las zonas donde las plantas se comportarán de forma homogénea en cuanto a nutrición, estructura de las raíces, dinámica del riego, percolación, etc. Una fuente de información en España para obtener estos datos geográficos es el Instituto Geológico y Minero de España (RI10)

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- *Radiación*: La radiación es la cantidad de energía procedente del sol que incide en las plantas. La radiación, en términos agronómicos, se puede clasificar en Global (cantidad total de energía incidente) y PAR (Photosynthetically Active Radiation – Radiación fotosintéticamente Activa, cantidad de radiación integrada del rango de longitudes de onda que son capaces de producir actividad fotosintética en las plantas). Los mapas de radiación en la herramienta GIS ofrecen información sobre las zonas donde potencialmente las plantas realizarán mejor la fotosíntesis y, por lo tanto, serán más productivas. Una fuente de información en España para obtener estos datos geográficos es la Agencia Estatal de Meteorología [R111].
- *Teledetección*: A través de los sistemas de teledetección se pueden obtener capas de información, que se pueden implantar en sistemas GIS, que ofrecen fundamentalmente información por zonas del índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. Este indicador ofrece de forma zonificada una estimación de la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Existen diferentes formas de obtener imágenes de teledetección como pueden ser: imágenes de satélite, drones o, en general, toma de imágenes a través de sistemas tele detectores.
- *Cotas y orientaciones*: La implantación de la topografía de la zona en el sistema GIS ofrece información sobre la cota y orientación que tiene la finca, ya que esto determina fundamentalmente la zona micro climática en la que se ubica. Esto determinará, por cada zona, los impactos del clima en el desarrollo del cultivo. Una fuente de información en España para obtener estos datos geográficos es el Instituto Geográfico Nacional [R112].
- *Proceso de muestreo de datos continuo y en tiempo real*: Una vez determinadas las zonas de muestreo en el proceso de zonificación, en cada una de ellas, se instala un conjunto de sondas y sensores para registrar, de forma continua y en tiempo real, los datos de fenología y fisiología del cultivo. El sistema informático registra en bases de datos todos ellos para su posterior análisis y visualización en gráficas que comparan las tendencias entre ellos. Aunque depende mucho de la especie y variedad del cultivo, las sondas y sensores más importantes que se suelen instalar son:
 - *Sonda triparamétrica de suelo a varias profundidades*: Sondass que capturan datos relativos a CE (Conductividad Eléctrica), humedad y temperatura, es decir, la cantidad de sales minerales, agua y temperatura que hay en la zona de suelo que se está muestreando. En definitiva ofrece información sobre el potencial sustrato de nutrición del que se dispone en suelo. El que sea a varias profundidades es importante para así tomar datos a nivel de la raíz y de otras zonas más profundas con el objetivo de medir parámetros como la capacidad de campo, percolación de suelo, etc.
 - *Sonda de nutrición*: Sondass que capturan datos relativos a la cantidad de Nitrato y Potasio en la zona de muestreo, ya que estos dos componentes son dos de los elementos nutricionales más importantes en las plantas.
 - *Dendrómetro*: Sensores que capturan datos relativos a las fluctuaciones de grosor que el tronco y/o tallo va teniendo a lo largo del tiempo. Ofrece información sobre el desarrollo de la planta a lo largo del ciclo de cultivo, indicando si se está nutriendo correctamente y creciendo en los parámetros estimados.
 - *Sensor de Humedad relativa y temperatura*: Sensores que capturan datos sobre humedad relativa y temperatura ambiental. Ofrece información sobre las condiciones ambientales en las que se desarrolla la planta en dos de los parámetros fenológicos más importantes a tener en cuenta en el desarrollo

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

vegetativo y productivo de las plantas. Estos influyen en la capacidad para realizar la fotosíntesis, en la evapotranspiración del cultivo y, en general, en las condiciones de desarrollo tanto de la planta en sí como del fruto.

- *Sensor de radiación*: Sensores que capturan datos sobre la radiación tanto global (total radiación solar incidente) como PAR (la radiación que es fotosintéticamente activa). Ofrece información sobre las principales condiciones para que las hojas puedan realizar la fotosíntesis que, en definitiva, es lo que producirá el fruto en la planta.
 - *Pluviómetro*: Sensores que capturan datos sobre la cantidad de lluvia que se produce en la zona de muestreo. Ofrece información sobre la disponibilidad de agua que, de forma natural, el cultivo puede disponer, con lo cual, los procesos de riego se pueden adaptar según este valor. Hay que tener en cuenta que hay estructuras de cultivo donde esta información no es tan importante, como por ejemplo los invernaderos, donde la precipitación no afecta en el interior. No obstante, en este último caso, el disponer de una estación exterior puede ofrecer información sobre los niveles de reserva hídrica de los que se podría disponer.
 - *Sensor de CO₂*: Sensores que capturan datos relativos a la cantidad de CO₂ que hay en la zona de muestreo. Ofrece información sobre la presencia de este elemento, que es muy importante en el proceso de la fotosíntesis.
 - *Sensor de velocidad y dirección del viento*: Sensores que capturan datos relativos a la velocidad y dirección del viento en la zona de muestreo. Ofrece información sobre las condiciones que en este sentido el cultivo va a tener, condiciones que fenológicamente son muy importantes para el correcto desarrollo vegetativo y productivo del cultivo.
- Proceso de muestreo de datos discontinuo: En las zonas de muestreo es interesante tomar otra serie de datos, más cualitativos que cuantitativos, que no es posible o es muy costoso el tomarlos de forma continua, en tiempo real y a través de sondas y sensores. Estos datos pueden ser tomados de forma manual y posteriormente ser introducidos en el sistema de información a través de las interfaces de usuario definidas a tal efecto, o bien se pueden usar otros medios tecnológicos móviles que, a pie de finca, el usuario puede utilizar para tomar estos datos. Algunos de ellos pueden ser:
- *Tablets y/o SMART Phones*: Estos dispositivos permiten ejecutar aplicaciones informáticas de captura de datos, de manera que, se puede diseñar e implementar formularios de captura de información que, o bien puede ser almacenada localmente en el dispositivo y posteriormente sincronizada con los sistemas de gestión de bases de datos centrales, o bien puede ser sincronizada directamente en tiempo real con estos sistemas centrales. La mayoría de aplicaciones de captura de datos en campo suelen disponer de la capacidad de almacenamiento local y posterior sincronización ya que puede ocurrir que el cultivo se sitúe en una zona de escasa cobertura de comunicaciones. Algunos ejemplos de información a capturar por este tipo de dispositivos puede ser: distancias entre nudos, número de frutos en planta, número de ramos, etc. La capacidad de estos dispositivos de obtener imágenes de alta resolución permite también poder realizar análisis hiperespectrales sobre las imágenes capturadas para, por ejemplo, obtener datos relativos índices de área foliar (LAI), estado de los frutos, análisis de enfermedades, etc.
 - *Digital Pen*: Estos dispositivos combinan la manera tradicional de captura de datos, es decir, la escritura, con la capacidad de integración automatizada en los sistemas de información. Este tipo de bolígrafos incorporan pequeñas

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

cámaras de manera que, utilizando formularios diseñados con una trama de base específica, el bolígrafo captura la imagen de la escritura y realiza una interpretación OCR (Optical Character Recognition). El texto, una vez reconocido e interpretado informáticamente, es enviado al sistema de información automáticamente para su registro en el sistema de gestión de bases de datos. Un ejemplo de fabricante de este tipo de soluciones es Anoto [RI13]

- Determinación de KPI: Una vez que se disponen los datos tomados tanto de forma continua como de forma discontinua en el cultivo, a través del correspondiente análisis centrado en la especie y variedad, se determinan los indicadores clave de rendimiento (PKI – Performance Key Indicator), es decir las variables cuyos valores orientan sobre el óptimo desarrollo vegetativo y productivo del cultivo. Algunos ejemplos de indicadores clave de rendimiento para un cultivo de tomate bajo invernadero puede ser: DPV (Déficit de Presión de Vapor, que es un valor calculado en función de la temperatura y la humedad relativa), ETC (Evapotranspiración del Cultivo) o el número de horas donde la humedad relativa está por encima del 60%.
- Implementación de un SMART Grid con alertas sobre los KPI definidos: Una vez definidas las variables PKI, estas se configuran en un cuadrante de datos que permita comparar y establecer seguimiento sobre sus valores. Adicionalmente se definirán las alertas basadas en los umbrales de óptimo rendimiento, es decir, los valores por cada una de las variables PKI definidas que orientan sobre el óptimo desarrollo vegetativo y productivo del cultivo. Se puede establecer un sistema de notificación a través de plataformas de envío de mensajes cortos SMS, correo electrónico y/o mensajería Push en SMART Phones y Tablets para que el usuario pueda actuar por excepción, es decir, actuar sobre aquellas condiciones que, orientadas por los PKI, puedan ocasionar un riesgo en el correcto desarrollo del cultivo. Un ejemplo de SMART Grid de indicadores puede ser:

	DPV Valores recomendados entre X e Y	ETC Valores recomendados entre X e Y	Horas Hr por encima del 60% Valores recomendados entre X e Y
Fecha y Hora 1	Valor Ok	Valor Ok	Valor Ok
Fecha y Hora 2	Valor Ok	Valor en Peligro	Valor Ok
Fecha y Hora N	Valor NO Ok	Valor Ok	Valor Ok

- Monitorización y seguimiento continuo. Decisiones de manejo: Una vez definido el SMART Grid con los indicadores clave de rendimiento y el sistema de alertas para actuar por excepción, el sistema TIC ya está preparado para operar con él a través de las funcionalidades de seguimiento continuo de los datos, de manera que el usuario, aparte de actuar por excepción cuando sea alertado, podrá monitorizar sus cultivos de forma continua a través de la información que el SMART Grid ofrece.
- Registro de manejo para aprendizaje y retroalimentación en próximas campañas: El sistema puede permitir el registro de buenas prácticas de manejo y los valores de indicadores óptimos que han provocado un óptimo rendimiento en el cultivo. Este registro permite, en futuras campañas productivas, poder ser consultado y analizado para así tener una referencia para intentar repetir esta experiencia positiva.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Adicionalmente el sistema se puede diseñar para que se pueda retroalimentar, auto calibrándose en cuanto a los valores de los PKI para que ajustar los rendimientos a la realidad del mercado.

4.2.2. Actuaciones automatizadas

El objetivo de este ámbito de actuación es la integración y automatización con los diferentes elementos electromecánicos que actúan en las explotaciones agrícolas para optimizar los procesos y costes de los RRHH empleados en su operación manual. Es decir, lo tradicional cuando se ha de accionar los mecanismos de riego, de ventilación en invernadero, etc., son los operarios de las explotaciones agrícolas los que se tienen que desplazar a las zonas y activarlos y, posteriormente, desactivarlos cuando pase el tiempo planificado para ello. Esto implica que estos operarios han de emplear un tiempo en el que pueden estar realizando otras acciones que pueden ser más productivas. La operación automatizada en estos mecanismos permite el telecontrol y, por lo tanto, la no presencia de RRHH en la zona donde se ubican con lo que se optimiza el coste de RRHH en estos procesos.

Este tipo de sistemas permiten la conexión remota a través de dispositivos móviles (tablets y SMART phones) y a través de estaciones de trabajo remotas, permitiendo así la ejecución remota de procesos.

Adicionalmente la mayoría de mecanismos que pueden ser telecontrolados permiten la invocación a través de protocolos de comunicaciones e integración estándar, como por ejemplo WEB Services. Esto permite que la tele actuación la pueda realizar otro sistema informático en base a una decisión previamente programada, es decir, si la explotación agrícola ya dispone de un SMART Grid de indicadores para la ayuda a la toma de decisiones, el sistema informático directamente podría realizar la actuación de forma automática, es decir, sin intervención humana.

Algunos ejemplos de elementos que se pueden tele controlar son:

- Sistemas SCADA: son sistemas software que permiten controlar y supervisar procesos industriales a distancia (Supervisory Control And Data Acquisition). Este tipo de sistemas informáticos son muy comunes para el tele control informatizado del riego agrícola. Se suelen instalar para tele controlar bombas hidráulicas que suministran el agua a los diferentes sectores de riego.
- Electroválvulas instaladas en hidrantes: son válvulas hidráulicas cuyo control de apertura y cierre se realiza a través de impulsos eléctricos. Este tipo de mecanismos se suelen instalar en las salidas de agua de los hidrantes que irrigan las fincas. A través de autómatas y relés, el sistema informático podría tele actuar en la apertura y cierre de la electroválvula, permitiendo así la irrigación en las fincas de forma totalmente automatizada y remota.
- Sistemas de inyección de CO₂: Existen mecanismos industriales que permiten la generación e inyección de CO₂ directamente a la masa foliar del cultivo (con el objetivo de facilitar la fotosíntesis). Estos sistemas suelen valorizar los residuos vegetales utilizándolos como materia prima en este proceso de generación. A través de sistemas informáticos se puede tele controlar este tipo de sistemas actuando automáticamente sobre el proceso. Este tipo de sistemas son muy aplicables en estructuras de cultivo de tipo invernadero, ya que de forma natural permite la concentración de CO₂, en cambio, en las estructuras de cultivo no invernadas el CO₂ generado se dispersará teniendo así un rendimiento bajo en los objetivos perseguidos.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Sistemas de ventilación en invernaderos: La mayoría de invernaderos suele disponer de ventanas laterales para realizar los procesos de ventilación. La apertura y cierre de ventanas es susceptible de ser automatizada a través del empleo de autómatas conectados a los motores de apertura y cierre. El tele control de estos autómatas también puede ser realizado a través de los sistemas informáticos que gestionan de forma integral la explotación agrícola.
- Sistemas de control climático: Muy aplicables también en el ámbito de las estructuras de cultivo invernadas. Estos sistemas ofrecen la posibilidad de controlar y estabilizar las condiciones climáticas en las zonas de muestreo. Ofrecen la posibilidad de poder interactuar informáticamente para aplicar las condiciones climáticas que el sistema haya recomendado.

4.2.3. Modelos de cálculo predictivo

El conocimiento del comportamiento en el desarrollo vegetativo y productivo de cada especie y variedad de cultivo posibilita poder modelarlo matemáticamente. El desarrollo de estos modelos matemáticos y estadísticos permite simular escenarios futuros en relación a situaciones previstas de cualquier ámbito. Por ejemplo:

Producción:

Por cada especie y variedad del cultivo, se puede modelar la cantidad y calidad de la producción de fruto en función de parámetros como la nutrición, estructura del cultivo, marco de plantación, impactos fenológicos (temperatura, humedad, radiación, etc.). El sistema informático en base a los parámetros capturados desde el cultivo, bien a través del conjunto de sondas y sensores instalados en campo, bien a través de información tomada manualmente e introducida al sistema informático, realizará la ejecución del algoritmo definido obteniendo como resultado las producciones y calidades estimadas.

Predicción agroclimática de precisión microclimática:

Tomando como base los sistemas de predicción climática estandarizada en cada país, se realiza un proceso de calibración automatizada de los datos para ajustar las predicciones según los datos tomados en real en la zona. Para tomar estos datos necesarios para la calibración se utilizan estaciones climáticas instaladas en local. Estas estaciones climáticas capturan datos relativos a: temperatura, humedad relativa, CO₂, radiación global, radiación PAR, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento y pluviómetro.

Se habla de predicción agroclimática ya que, de forma adicional a las variables básicas climáticas, se calculan otras variables fenológicas que impactan en el desarrollo de los cultivos como pueden ser: DPV (Déficit de Presión de Vapor), ETC (Evapotranspiración del cultivo) y otras variables derivadas, como por ejemplo el número de horas donde la humedad relativa está por encima de cierto valor.

De forma adicional, para estructuras de cultivo invernadas, se puede realizar un cálculo algorítmico para extrapolar las condiciones climáticas exteriores (al invernadero) al interior del invernadero. Para ello se utilizarán como entradas al algoritmo el volumen del invernadero, el tipo de plástico y otros datos tomados por sensores que se encuentran instalados dentro del invernadero como por ejemplo la temperatura y humedad.

En definitiva se pueden definir escenarios futuros de impactos climáticos de alta resolución en los cultivos tanto al aire libre como invernado. Se sabe que los impactos fenológicos son fundamentales para estimar el desarrollo del cultivo, con lo cual, conocer los escenarios

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

futuros del clima es una herramienta fundamental para la toma de decisiones en el manejo agronómico de los cultivos.

Momentos óptimos de recolección:

Para este tipo de modelos de cálculo de los momentos temporales en los que el fruto está en el momento óptimo de maduración y por lo tanto en el momento adecuado de recolección, se pueden combinar diferentes tecnologías que aportan la base para los cálculos. Algunos de ellos son:

Basados en los estudios de desarrollo de cultivo en función de la especie y variedad, donde en función de los impactos fenológicos y demás parámetros como nutrición, estructura de cultivo, etc., se puede establecer una planificación temporal de las fases de desarrollo del cultivo y por lo tanto los momentos en los que el fruto puede ser recolectado.

Basados en el análisis multiespectral o hiperespectral de imágenes tomadas de forma continua en el cultivo. Esta tecnología consiste en el análisis automatizado por parte de los sistemas de información de los múltiples espectros que una imagen de alta resolución puede ofrecer. A través de este análisis automatizado se puede obtener información muy valiosa para este tipo de cálculos como: crecimiento de tallos y tronco, masa foliar a través de cálculo de indicadores como el LAI (Leaf Area Index – Índice de Área Foliar), indicador fundamental en los modelos de desarrollo de los cultivos y/o estado del fruto en cuanto a calidad, calibre y tamaño.

En este tipo de modelos no solo intervienen parámetros fisiológicos, biológicos o fenológicos del cultivo, también pueden intervenir otros parámetros que tienen que ver más con la propia comercialización y rendimiento económico del cultivo, por ejemplo, se puede analizar, en base a históricos o a información de mercado, cuales son los momentos más adecuados para su comercialización, bien porque el precio es el óptimo, bien porque la demanda es la adecuada, y tomar este parámetro como valor a tener en cuenta en el momento de recolección. Es decir, si el fruto aun estando en su momento adecuado de corte admite algunos días más en la planta y podemos adecuarlo al momento óptimo de comercialización, se podrá obtener mayor rendimiento económico.

Previsión de enfermedades:

Algunas de las enfermedades que pueden sufrir los cultivos, como por ejemplo las enfermedades fúngicas, pueden ser debidas a los impactos de las condiciones ambientales y el clima. Es por esto que a través del empleo de modelos que puedan simular condiciones futuras en este aspecto, se pueden determinar potenciales situaciones en los que el cultivo se puede ver afectado por una de estas enfermedades. Por ejemplo, si el cultivo se encuentra en una fase de recolección y los modelos arrojan una situación potencial de riesgo fitosanitario, probablemente el cultivo se pueda ver afectado ya que la planta tendrá las correspondientes yagas de la recolección. Los sistemas de información a través de estos modelos alertan de estas condiciones de manera que se puedan realizar operaciones preventivas para mitigar esta situación de riesgo potencial.

Necesidades hídricas futuras para planificación óptima del riego:

Estos modelos de previsión permiten por cada especie y variedad de cultivo determinar que necesidades nutricionales e hídricas necesita el cultivo para que se desarrolle de forma adecuada. Los sistemas de información al tener los datos de estas necesidades hídricas y nutricionales futuras podrán establecer un sistema de planificación automatizada del proceso de fertirrigación, bien recomendando al productor como y cuando realizarlo, bien integrando automáticamente con los sistemas SCADA que controlan los procesos de fertirriego. Los

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

sistemas SCADA de riego permiten automatizar todo el proceso de riego permitiendo establecer planificaciones de ejecución de riego tanto en cantidad como en tiempo, sectorización, etc. La integración con estos sistemas permite la automatización completa pudiendo llegar a establecer un proceso de riego totalmente desatendido y controlado por el sistema de información.

Predicción de costes energéticos en los consumos de la explotación agrícola:

Uno de los porcentajes mayores de coste en los procesos de movimiento de agua tanto en llenado de balsas como en su distribución a través de los diferentes sectores de riego son los costes energéticos, máxime cuando estos costes están asociados a consumos eléctricos provistos por el mercado eléctrico nacional. Tanto es así que actualmente muchas explotaciones agrícolas están migrando sus fuentes de energía a fuentes de energía renovables para intentar optimizar los costes de operación. Aun así, la mayoría de las explotaciones agrícolas siguen teniendo contratos con las comercializadoras eléctricas.

El mercado eléctrico nacional está gestionado con OMIE y adicionalmente existe un mercado de futuros llamado OMIP. Estos son los mercados que definen los precios de la energía eléctrica que se consume en España. A través de la integración con los sistemas informáticos que almacenan los datos de estos mercados, se pueden diseñar algoritmos para estimar los precios horarios futuros. De entrada, en el mercado diario e intradiario, se puede determinar los precios reales por cada hora para el día siguiente.

4.2.4. Integración con maquinaria agrícola y robotización de labores

Un factor importante a tener en cuenta en las labores agrícolas es lo que se refiere al control de la maquinaria y la automatización de procesos. El objetivo de automatización no es eliminar puestos de trabajo en el sector agroalimentario, sino optimizar costes en las labores creando puestos de trabajo especializado y dedicando a las personas en las labores que aportan más valor y que no pueden ser realizadas empleando este tipo de maquinaria y automatización.

El telecontrol de maquinaria agrícola permite que los sistemas de información realicen autoguiado de las máquinas en la finca, monitorización de parámetros mecánicos, geoposicionamiento de las labores que se están realizando (visualización a través de sistemas GIS), monitorización de consumos (dosificadores de fitosanitarios, fertilizantes, etc.), etc.

La robotización de labores agrícolas permite su automatización y la no intervención directa de las personas en el proceso. Ya existen experiencias en aplicación fitosanitaria y en recolección de fruto, permitiendo hacer más rentable económicamente la explotación agrícola.

4.2.5. Análisis Big Data

Las mejoras en rendimientos de los sistemas de información, el incremento de fuentes informatizadas de datos y la mejora en su accesibilidad han favorecido la cada vez más presencia de tecnologías BIG DATA en todos los sectores. En particular para el sector agroalimentario el uso de este tipo de tecnologías es un valor muy importante a tener en cuenta para diseñar sistemas de ayuda a la toma de decisiones basadas en indicadores resultantes de un análisis inteligente de múltiples fuentes de datos heterogéneas.

Relacionado con la producción y comercialización de productos agroalimentarios, existen multitud de fuentes de datos heterogéneas que son muy interesantes en los procesos de análisis para obtener información clave que ayude a la rentabilidad de la explotación agrícola, por ejemplo: datos históricos de producción y calidad para poder hacer proyecciones

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

estadísticas a futuro, previsiones climáticas en mercados de destino para analizar los impactos del clima en la adquisición de productos por parte del consumidor final, calendarios laborales y de festivos de los mercados de destino para evaluar los impactos del ocio en el consumo de productos agroalimentarios, informes de ventas y de penetración de mercado clasificado por productos que ofrecen los organismos públicos como el MAGRAMA (Ministerio de Agricultura y Medioambiente), datos procedentes de sondas y sensores, previsiones climáticas en las zonas de producción, tendencias de venta publicadas por las asociaciones de productores, etc.

El proceso a seguir en la implantación de este tipo de tecnologías es:

1. Determinar todas las fuentes de información, clasificándolas por aquellas que son Open Data (fuentes de datos abiertas y por lo tanto accesibles de forma pública) y las que se ha de definir un proceso explícito para su adquisición y mantenimiento.
2. Implementar las técnicas de acceso a la información.
3. Definición de los Data lakes (Lagos de datos), es decir, los conjuntos de datos que participarán en el proceso de homogeneización y análisis de la información.
4. Proceso de análisis de la información y construcción de indicadores clave.
5. Explotación de la información a través de herramientas software de reporting (software de generación y tratamiento de informes), BI (Business Intelligence) y/o análisis OLAP (On Line Analytical Processing – Proceso Analítico en Tiempo Real).

En definitiva la explotación agrícola dispone de un conjunto de informes analíticos generados en tiempo real donde se identifican una serie de indicadores para la ayuda a la toma de decisiones sobre las estrategias a seguir.

4.2.6. Certificaciones medioambientales

La sostenibilidad medioambiental es un factor muy importante a tener en cuenta en las explotaciones agrícolas, ya que su actividad tiene un gran impacto en el medioambiente tanto positivo como negativo. Por lo tanto hay que trabajar por conseguir que los impactos negativos sean los mínimos, evitando lixiviación de nitratos que contaminan suelo y acuíferos, contaminación por el uso de productos fitosanitarios y fertilizantes, etc.

Las certificaciones medioambientales garantizan que la explotación agrícola realiza un uso sostenible de los recursos que necesita. Para su gestión, cálculo y control es muy importante disponer de sistemas informáticos que automaticen este proceso, ya que el productor ha de emplear su tiempo en producir de forma óptima y no en gestionar manualmente estos procesos.

El uso de huellas medioambientales, como la huella de carbono o huella hídrica determina los niveles de uso de estos recursos y por tanto actúa como una certificación en relación a su consumo. Estas huellas son algoritmos de cálculo en función de tablas de equivalencia en los consumos, con lo cual son susceptibles de ser automatizadas utilizando un sistema de información.

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS A LAS METODOLOGÍAS Y PROCESOS EMPLEADOS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

- 1.- Monitorización automatizada de cultivos.**
- 2.- Actuaciones automatizadas. Control automatizado del riego agrícola**
 - 3.- Modelos de cálculo predictivo.**
- 4.- Integración con maquinaria agrícola y robotización de labores.**
 - 5.- Análisis BIGDATA**
- 6.- Certificaciones medioambientales**

5. Aplicación de sistemas tecnológicos a las metodologías y procesos empleados en agricultura de precisión

A continuación se detalla cada una de las tecnologías y metodologías que se han identificado y definido en los epígrafes anteriores.

Partiendo de la base de que la explotación agrícola dispone de la tecnología base sobre la cual instalar todo un sistema tecnológico de agricultura de precisión, las tecnologías que puede aplicar en SMART Agriculture son:

5.1. Monitorización automatizada de cultivos

Tal y como se ha identificado anteriormente, la primera parte de la implantación de este sistema es el proceso de zonificación que tiene como objetivo la determinación de los puntos de muestreo en la finca. Estos puntos de muestreo permitirán la extrapolación de los parámetros monitorizados a toda la finca. En esta primera fase se hace uso de una herramienta GIS (Sistema de Información Geográfico) que permite definir la información clave de forma espacial. Hay multitud de herramientas GIS, algunas con coste económico en su licenciamiento y otras de software libre. Por ejemplo, el productor puede hacer uso de la herramienta Quantum GIS, que es software libre y permite definir múltiples capas espaciales con información.

A continuación se muestran diferentes imágenes de la herramienta Quantum GIS con diversas capas de información espacial. Estas imágenes proceden de diferentes estudios que he realizado en diversos proyectos en los que he participado, todos ellos orientados a zonificar las fincas y localizar los adecuados puntos de muestreo.

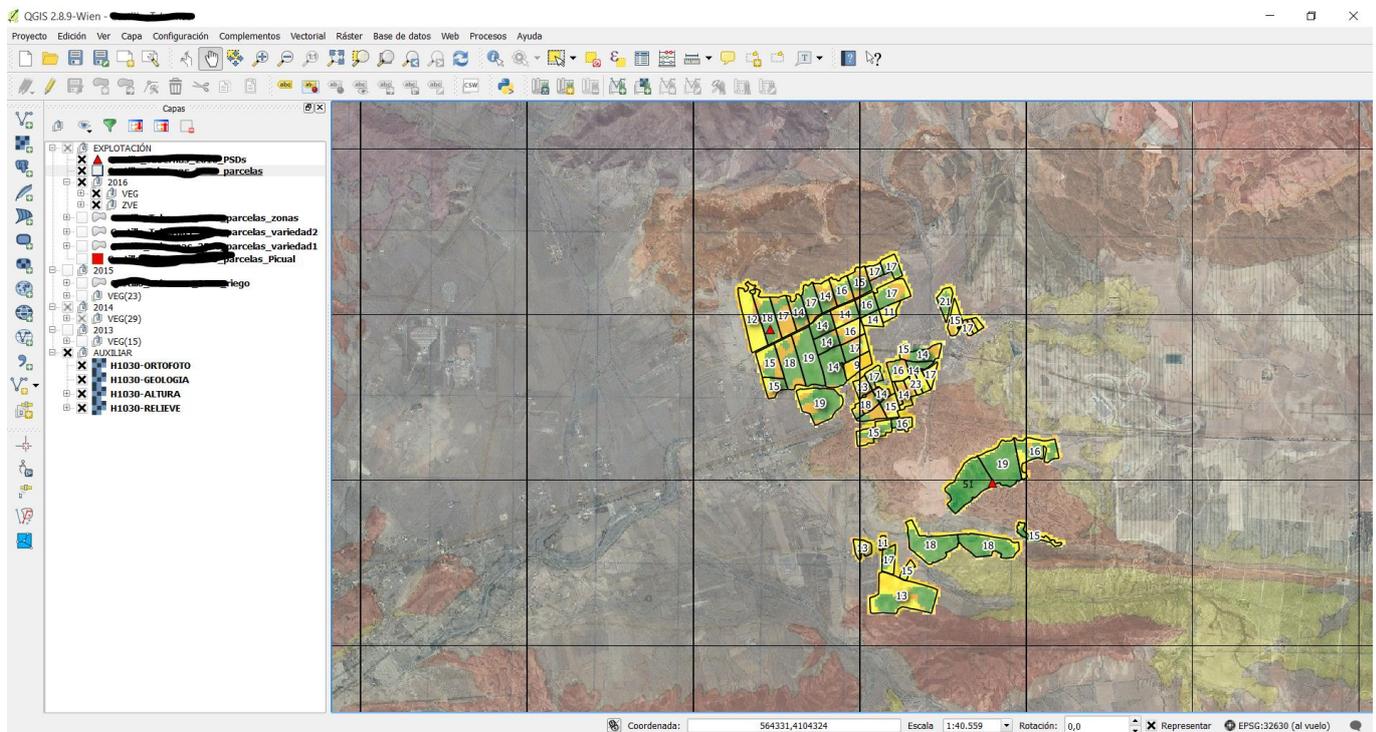


Figura 14 – Sistema de información geográfica para información agronómica.

AGROGIS

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Tal y como se identifica en la anterior imagen se pueden visualizar y gestionar múltiples capas espaciales de información como: Ortofoto, geología, altura, relieve, puntos de seguimiento detallado o puntos de muestreo (PSD), cada foto de satélite (o de vuelos de drones) tomada para seguimiento vegetativo de la finca, zonas cultivadas por variedad y especie, sectores de riego con infraestructura asociada, etc. En cada capa de información, por cada objeto gráfico definido, se puede asociar una base de datos de información extendida (metainformación), con lo cual el sistema GIS permitirá realizar una ágil gestión y seguimiento espacial de la finca y el cultivo.

A continuación se muestra una imagen del sistema de información geográfico con una de las tablas de metainformación asociada. En este caso los datos de especie y variedad de cultivo por cada uno de los sectores de riego de la finca.

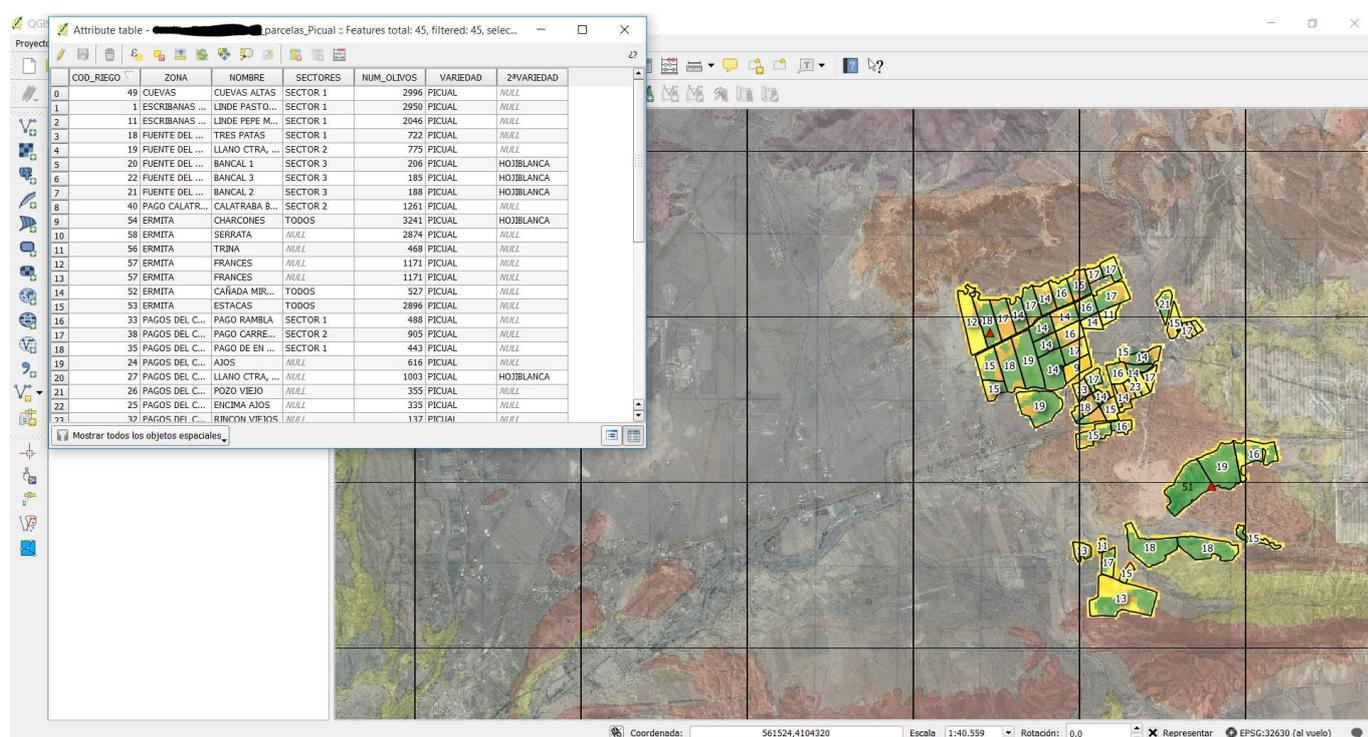


Figura 15 – AGROGIS visualizando una de las tablas con los metadatos de una capa.

De forma adicional, conforme se vaya desarrollando el cultivo se podrá visualizar en GIS como va variando y como se puede ir extrapolando la información capturada en los puntos de muestreo a toda la finca. Por ejemplo:

El seguimiento del desarrollo vegetativo de la explotación agrícola se realiza a partir de imágenes de satélite de 30 metros de resolución espacial. Es decir, el sensor multispectral a bordo del satélite toma valores cada 30 metros. El satélite pasa cada 16 días a la misma hora solar.

Las principales ventajas de esta fase metodológica en el ámbito de la SMART Agriculture van orientadas a mejorar la toma de decisiones agronómicas buscando maximizar producción/calidad con los insumos adecuados, ya que permiten estimar la variabilidad media y la intravariabilidad de las unidades de manejo (zonas homogéneas en el manejo del cultivo).

A partir de la información numérica multitemporal obtenida de las imágenes procedentes del satélite se puede realizar un análisis para determinar la evolución del desarrollo vegetativo por variedades de cultivo o por unidades de manejo.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

A continuación se muestra una secuencia de imágenes que identifica como el índice de variabilidad de vegetación va cambiando (parámetro NDVI).

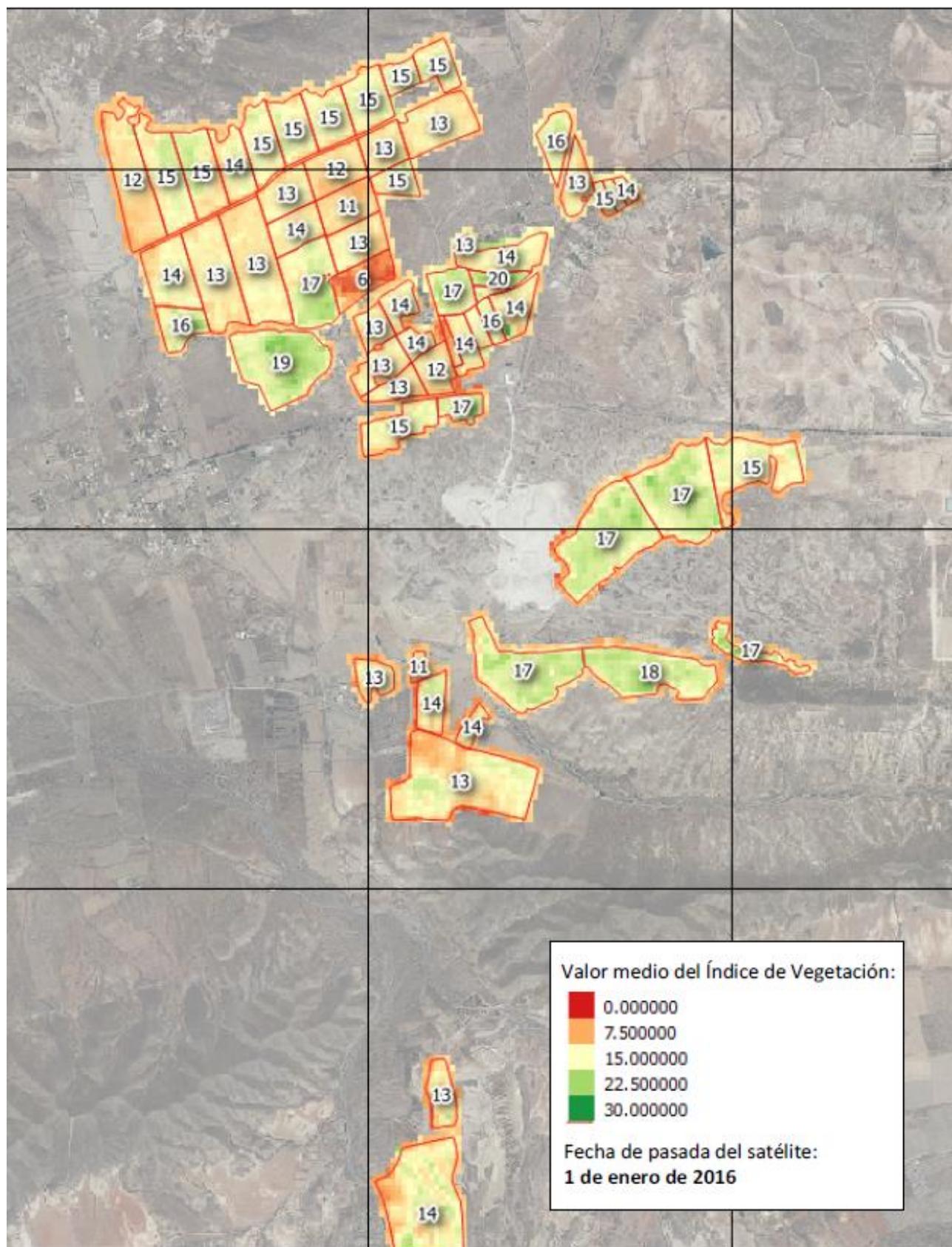


Figura 16 – NDVI a fecha 01 de enero de 2016.

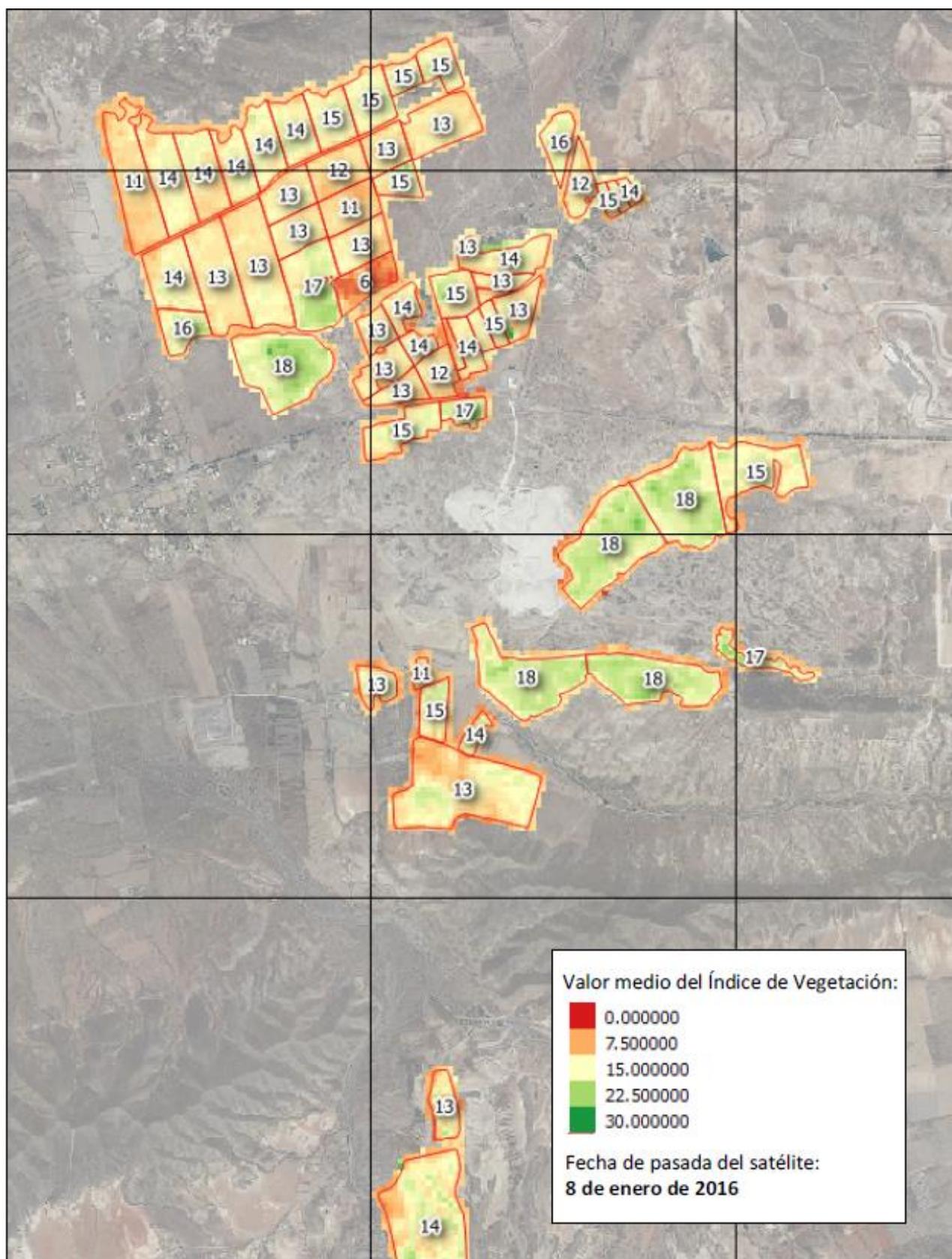


Figura 17 – NDVI a fecha 08 de enero de 2016.

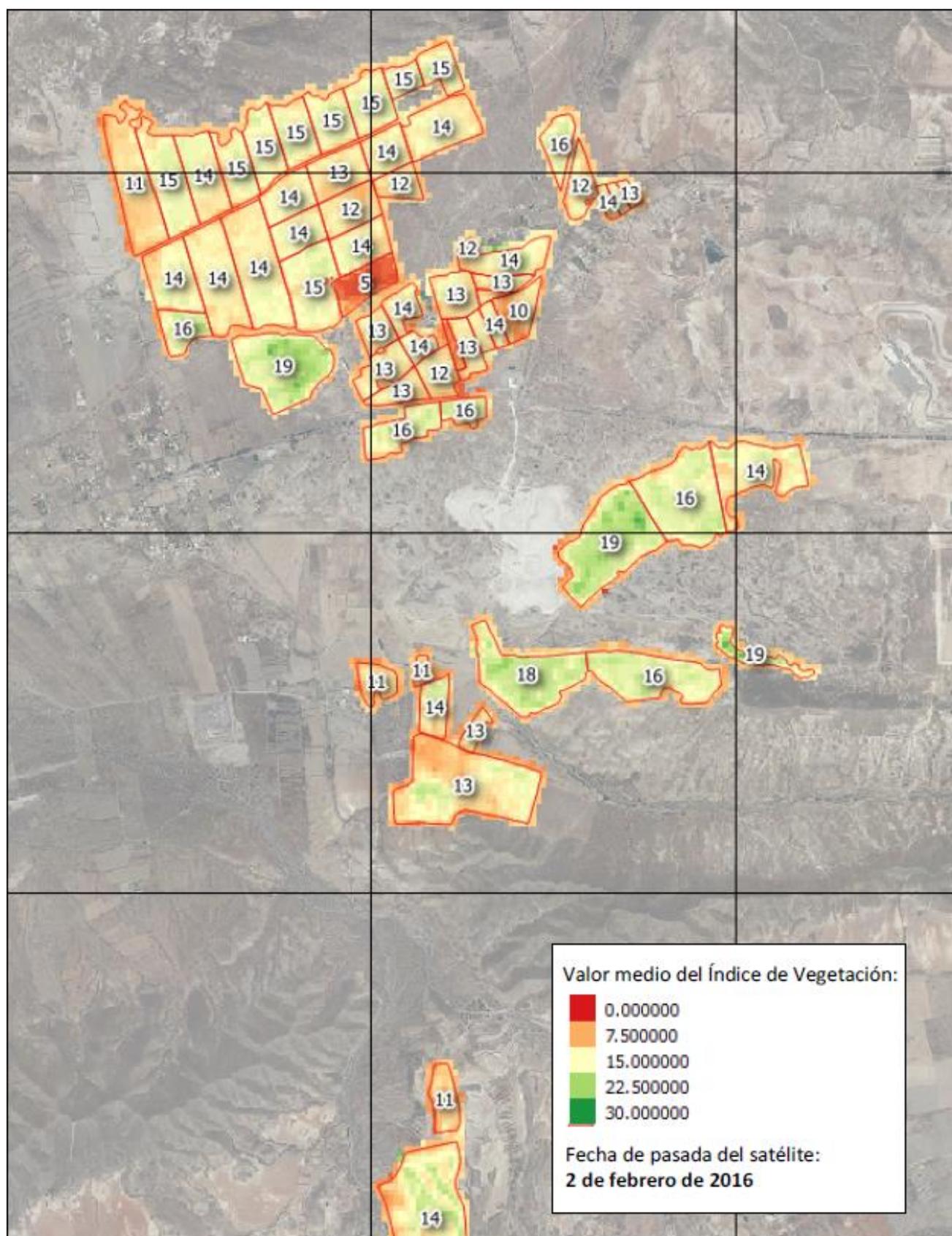


Figura 18 – NDVI a fecha 02 de febrero de 2016.

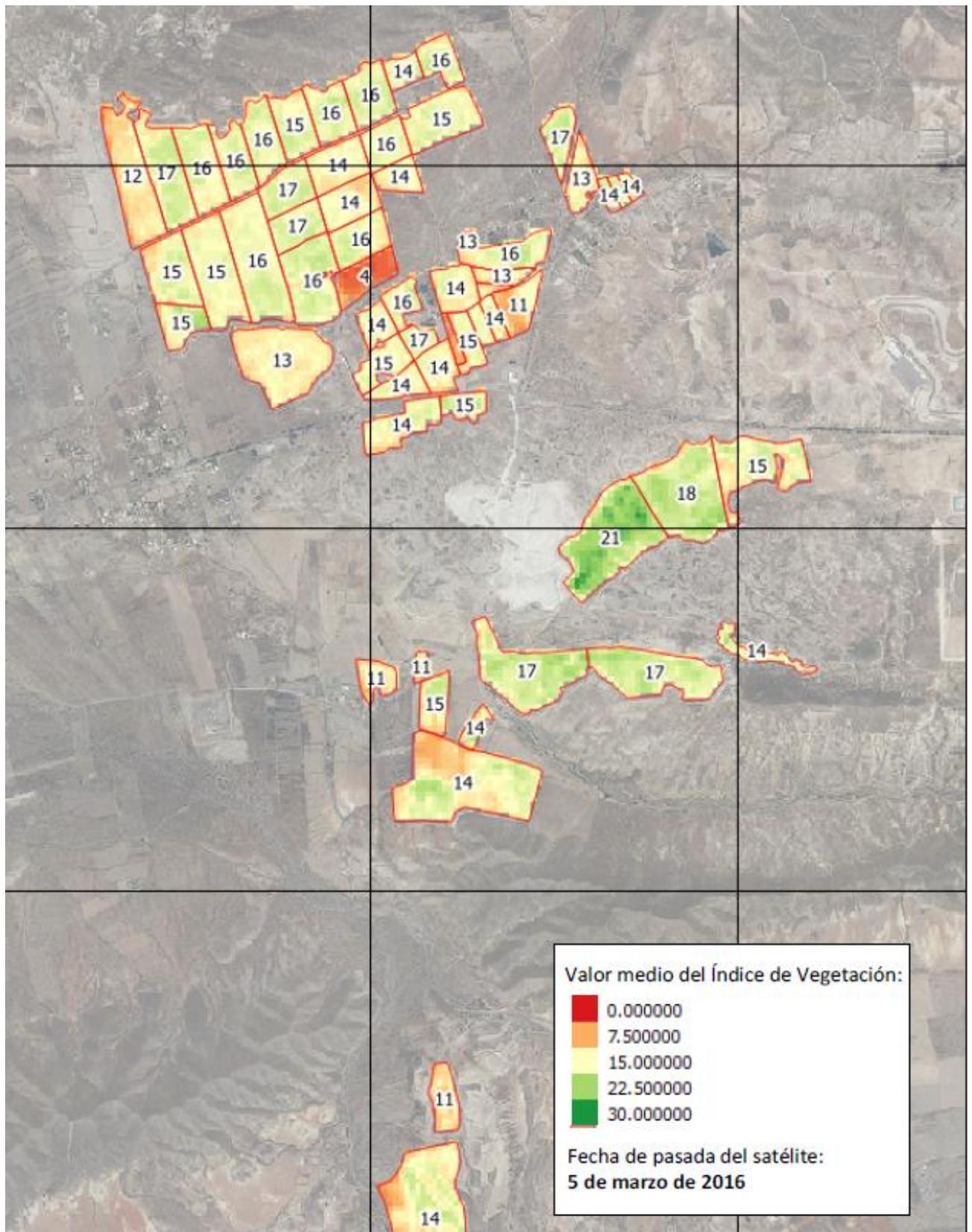


Figura 19 – NDVI a fecha 05 de marzo de 2016.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Utilizando las técnicas de teledetección, donde el dispositivo que toma la imagen utiliza los valores reflectados para hacer los cálculos de los diferentes indicadores de variabilidad de cultivo basados en NDVI, se puede tener una interpretación numérica que ofrezca un criterio matemático para realizar la zonificación. Tal y como se identifica en la sección 2 – UAV aerial and satellite sensing del libro Precision agriculture '15 [RB1], se pueden identificar varios indicadores agronómicos que identifican el potencial de cultivo que puede haber por las diferentes zonas de la finca, con lo cual ayuda a zonificar y establecer los puntos de muestreo. En concreto en el apartado relativo a “Vegetation indices from unmanned aerial vehicles – mounted sensors to monitor the development of maize (Zea mays L.) under different N rates” de esta sección 2, se identifica algunas fórmulas de cálculo de estos indicadores:



Figura 20 – Imagen de finca para cálculo de indicadores de variabilidad de cultivo.

En función de los valores que los teledetectores toman del espectro del infrarrojo cercano (NIR), el sistema de información puede realizar los cálculos correspondientes para el cálculo de estos indicadores.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$$

$$GRVI = \frac{NIR}{Green}$$

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{(NIR + Red + L)} \cdot (1 + L)$$

$$GSAVI = \frac{NIR - Green}{(NIR + Green + L)} \cdot (1 + L)$$

Figura 21 – Fórmulas de cálculo de los indicadores de variabilidad del cultivo basados en NIR.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

De forma adicional al NDVI que ya se ha identificado anteriormente en este documento, se puede identificar:

GNDVI: Green NDVI.

GRVI: Green Ratio Vegetation Index

SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index

GSAVI: Green SAVI.

En las fórmulas anteriormente identificadas, “Green” es lo reflectado del espectro visible de la luz verde, “Red” es lo reflectado del espectro visible de la luz roja, “NIR” es lo reflectado del espectro del infrarrojo cercano y “L” es un factor de corrección con rango de 0 a 1, donde 0 es alta cobertura de vegetación y 1 es baja cobertura de vegetación.

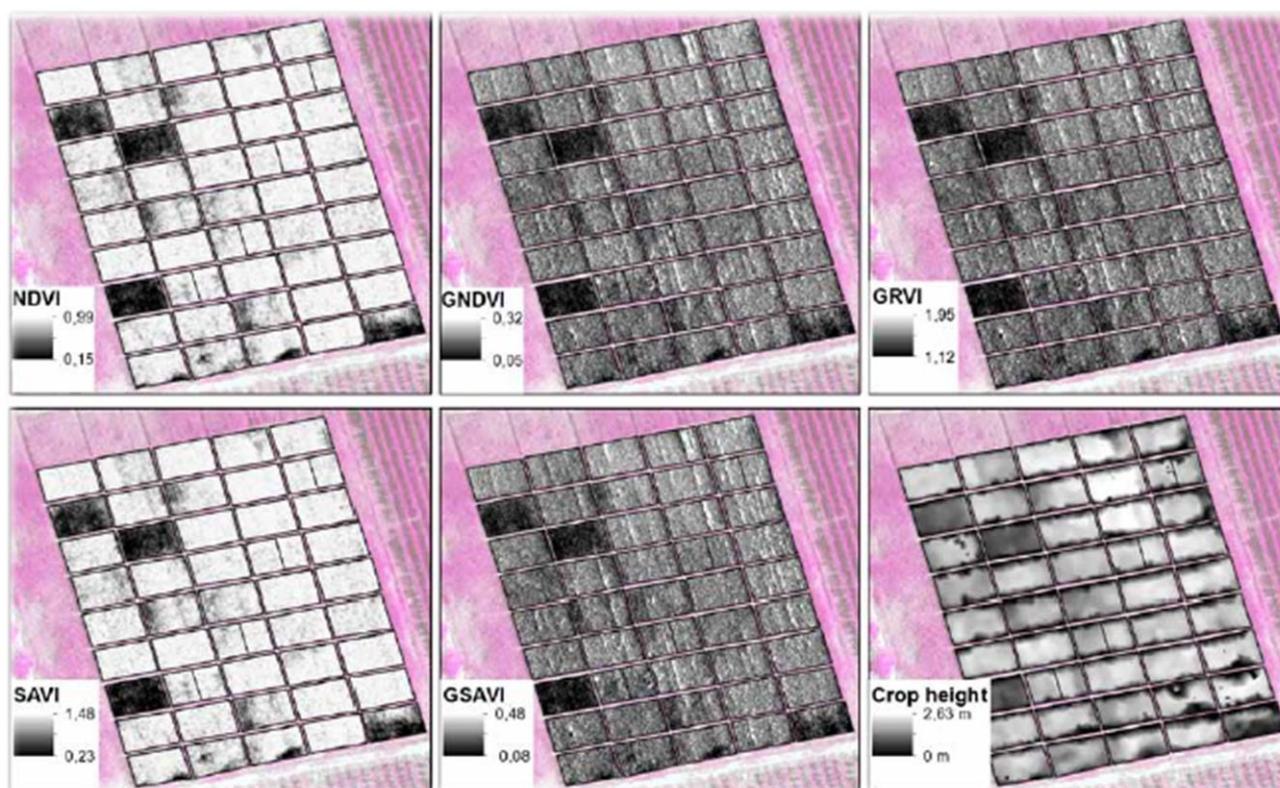


Figura 22 – Diferentes ejemplos de los indicadores de variabilidad de cultivo.

Tal y como se identifica en las anteriores ilustraciones, a través de herramientas software que soportan sistemas GIS, se puede realizar un proceso de zonificación y clasificación de las zonas a monitorizar y realizar una extrapolación de los parámetros monitorizados a toda la finca.

Una vez determinados los puntos de monitorización, en cada uno de ellos se realiza la instalación y puesta en marcha de las estaciones de captura automática de datos. Estas estaciones se configuran como plataformas WSN (Wireless Sensor Network). A continuación se muestra un esquema de configuración de estas plataformas.



Figura 23 – Instalación de una red inalámbrica de sensores (WSN).

Cada estación de monitorización se compone de:

Dataloggers:

Este dispositivo electrónico se encarga de concentrar y guardar los datos capturados por el conjunto de sondas y sensores que tiene instalado. Las sondas y sensores instalados enviarán al datalogger los registros tomados, concentrando esta toda esta información para después enviarla periódicamente cada cierto tiempo o en tiempo real.

A todos los efectos, los dataloggers son sistemas de control en tiempo real que siguen la estructura de un computador de control. Algunas definiciones de este tipo de sistemas sacadas de los contenidos formativos de la asignatura Programación Distribuida y Sistemas en Tiempo Real son:

- 1.- Sistema informático en el que el tiempo en el que se producen sus acciones es significativo. Las acciones del sistema deben ser correctas desde un punto de vista lógico y algorítmico y, además, deben producirse dentro de un intervalo de tiempo determinado.
- 2.- Sistema informático que, al recibir un conjunto de entradas (señales, medidas, etc.) del exterior, reacciona produciendo salidas (acciones, alarmas, etc.) dentro de un plazo determinado.
- 3.- Sistema informático con una interacción constante con su entorno y que responde a eventos o estímulos a los que debe reaccionar en un plazo determinado de tiempo.

Esquema general de un computador de control

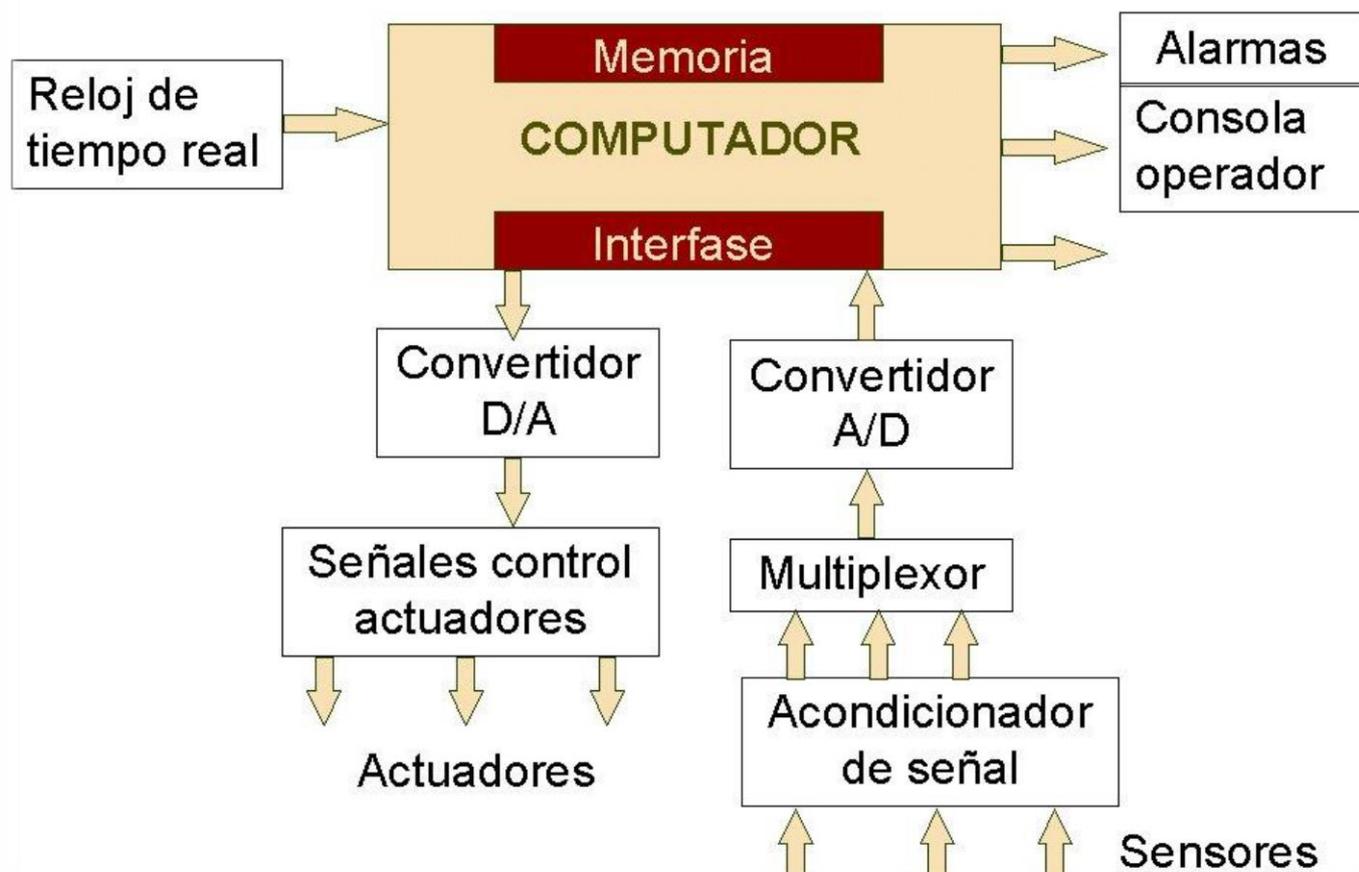


Figura 24 – Estructura de un computador de control. Tomada de la asignatura Programación Distribuida y Sistemas en Tiempo Real.

Un dispositivo de este tipo tiene los siguientes componentes y características.

Sensores y demás elementos de entrada al computador (datalogger):

Estos dispositivos son los encargados de registrar los datos correspondientes según la tipología para la que están diseñada, es decir, son los dispositivos que aportan la entrada de datos al datalogger. Con el objetivo de que los sensores aporten sus señales de forma homogénea y en formato digital, no se conectan directamente como entrada al computador, sino que inicialmente aportan sus señales a un acondicionador de señal, para posteriormente ser multiplexados y, si la señal es analógica, a través de un convertidor Analógico / Digital la señal podrá ser conectada a la interfase de entrada / salida de información.

En particular, en el ámbito agronómico, los sensores más utilizados son:

Sensores instalados en las tomas de riego: sensores de presión y caudal, para poder medir como se está regando, y sensores de conductividad eléctrica (CE), para medir concentración de sales en el proceso de fertirriego.

Sensores de suelo: dispositivos enterrados en suelo que tienen por objeto tomar datos relativos a temperatura, humedad y conductividad eléctrica (CE). Habitualmente se suelen instalar al mismo nivel en el que se encuentran las raíces y otros a más profundidad. El

objetivo es medir la percolación del suelo y ver que humedad que se queda a la altura de las raíces.



Figura 25 – Sensor de presión y caudal en toma de riego del fabricante GRE.

Sensores de planta: dispositivos que son instalados en las plantas para tomar diferentes valores clave para evaluar su desarrollo. Habitualmente se suelen instalar dendrómetros, que miden las fluctuaciones de grosor del tronco y tallo, y sensores de temperatura y turgencia de la hoja.



Figura 26 – Dendrómetro del fabricante Plantsens.



Figura 27 – Sensor de temperatura y turgencia de hoja del fabricante Yara Zimplant.

Sensores de clima y ambientales: dispositivos que son instalados en la finca para medir los parámetros ambientales tales como: humedad relativa, temperatura, radiación, CO₂, precipitación, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento.



Figura 28 – Sensores ambientales para medir parámetros fenológicos del fabricante Ranch System.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Elementos de proceso de datos:

Todas las señales correspondientes a los datos que capturan los sensores son enviados al módulo de interfases, en particular a la correspondiente a las de entrada. Estos datos son almacenados en memoria para posteriormente ser tratados por el computador en base a unas determinadas secuencias y periodicidades temporales o bien en tiempo real.

Una vez las señales procesadas son enviadas de nuevo al módulo de interfases, en particular a la interfaz de salida, para realizar el envío al sistema de información, la ejecución de una acción automatizada o, en general, el propósito para el que se haya diseñado.

En relación a la alimentación eléctrica, los datalogger que se instalan en campo suelen llevar una placa solar fotovoltaica. Esto permite su total autonomía e independencia de instalación de cables.

Para realizar las salidas de información a través de la interfaz de salida, suelen incorporar módulos de comunicaciones WIFI o a través de comunicaciones de telefonía móvil. Estas comunicaciones aparte de ser utilizadas para el envío de datos, también son utilizadas para configurar las redes inalámbricas de dispositivos de este tipo (redes WSN – Wireless Sensor Network), permitiendo la interconexión de todos los sensores en una sola plataforma informática.



Figura 29 – Datalogger del fabricante Ranch System.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Reloj de tiempo real:

Todo el proceso de captura de información, tratamiento, envío al sistema de información e interacción con los diferentes actuadores automáticos está secuenciado y puesto de forma periódica a través de un reloj que temporiza las acciones, bien cada un número determinado de segundos, o bien en tiempo real. La experiencia en este tipo de sistemas indica que en la mayor parte de las ocasiones no se necesita en tiempo real, de manera que el tratamiento y envío de la información para su análisis se puede hacer un número determinado de veces al día (dependiendo del cultivo).

Alarmas:

En los datalogger, como en todos los sistemas en tiempo real, el software embebido que controla el sistema puede gestionar alarmas, es decir, acciones a realizar en función del procesamiento de los datos de entrada que tiene. Por ejemplo, una alarma puede realizarse si el sensor de temperatura supera 35 °C durante 1 hora. Las alarmas pueden ocasionar avisos / envíos por diferentes tipos de mensajería a usuarios, por ejemplo envío de mensajería Push o mensajería SMS a un agricultor y/o técnico agrícola.

En el ámbito de la agricultura de precisión y en el uso de este tipo de sistemas las alarmas son elementos muy importantes, ya que permiten al operador del sistema actuar por excepción, es decir, actuar cuando las condiciones del cultivo aconsejan su actuación. El objetivo es optimizar el tiempo de seguimiento que se realiza sobre el cultivo.

Consola Operador:

Todos los datos gestionados por la red inalámbrica de sensores son monitorizados y gestionados a través de interfaces de usuario. Es decir, el software embebido en el datalogger o bien en la plataforma tecnológica donde se envían los datos, se ofrecen una serie de interfaces de usuario para gestionar el sistema, visualizar la información y, en definitiva, acceder a todas las funcionalidades de análisis y alarmas que el sistema puede ofrecer.

A continuación se muestra un sistema de interfaces de usuario para visualizar datos procedentes de sensores.

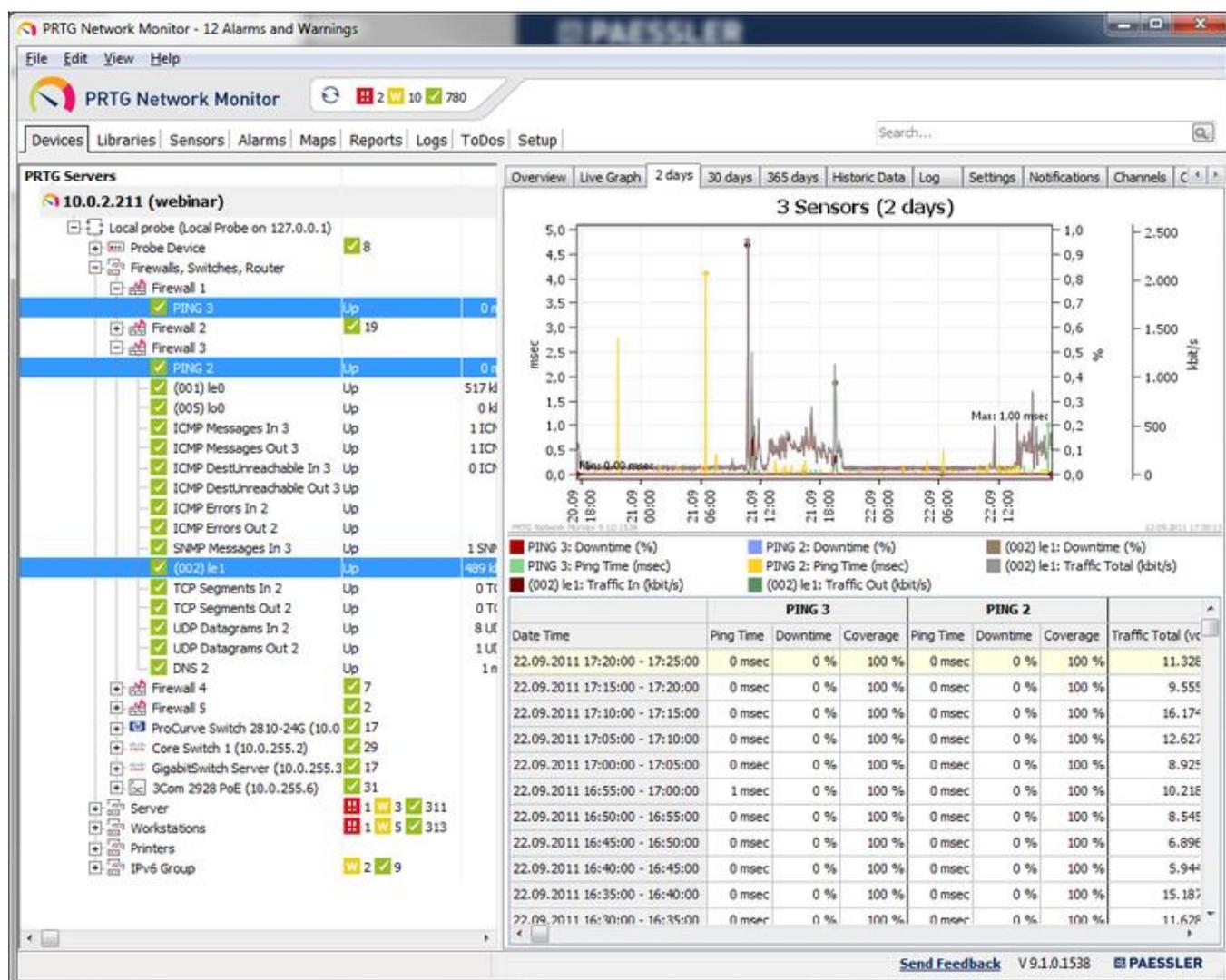


Figura 30 – Interfaz de usuario de un Sistema de monitorización con sensores.

Actuadores y demás elementos de salida

Estos sistemas pueden conectarse a diferentes elementos de actuación automatizada, de manera que su salida no solo sea de información y alarmas a mostrar al usuario, sino que además pueda realizar una determinada actuación automática en cualquier elemento electromecánico o informático.

Por ejemplo, en un tipo de cultivo plantado en estructura de invernadero, el sistema podría conectar con los motores que controlan la apertura y cierre de ventanas, de manera que ante la detección de unos determinados valores de temperatura y humedad, el sistema, aparte de generar una alarma, podrá enviar una señal al motor para que realice automáticamente una apertura o cierre de ventana.

Algunos elementos que se pueden controlar con este tipo de actuadores automáticos son: sistema de apertura y cierre de ventanas en invernaderos, sistemas de control climático en invernaderos, sistemas de calefacción, sistemas de generación de CO2, sistemas SCADA de riego, electroválvulas en hidrantes, etc.

En este tipo de sistemas, si las señales que necesita el actuador son analógicas, desde la salida del datalogger se conectaría un conversor Digital / Analógico y, dependiendo del tipo

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

de elemento al que conectar, un sistema que adecue la señal analógica a la propia señal del elemento a controlar.

A continuación se muestran algunos de los sistemas que pueden ser controlados automáticamente a través de las señales que emiten los sistemas en tiempo real que se pueden implantar en las fincas.

El que a continuación se muestra es un sistema SCADA del fabricante Agrosistemas. Este sistema permite un control informático del riego por sectores definidos en la finca. Es decir, no solo es capaz de monitorizar el riego a través la información que ofrece, sino que puede establecer actuaciones automatizadas planificadas o en tiempo real. Estas actuaciones pueden ser configuradas directamente en la consola del sistema SCADA o bien remotamente a través de otros sistemas, como por ejemplo los actuadores automáticos de sistemas en tiempo real (como por ejemplo los datalogger).



Figura 31 – Sistema SCADA para el control de riego en múltiples sectores del fabricante Agrosistemas.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

El que a continuación se muestra es una electroválvula, es decir, una válvula para controlar el paso de agua donde el mecanismo de apertura y cierre, en vez de ser manual, es automático de manera que puede ser accionado a través de pulsos eléctricos.

Una de las salidas del sistema en tiempo real, si está conectada al mecanismo (dispositivo negro que hay encima de la válvula), podrá accionar una apertura o cierre de la válvula controlando así automáticamente el paso de agua.



Figura 32 – Electroválvulas para control automatizado del paso de agua en un sector de riego o en un hidrante.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

La siguiente fase en el proceso de monitorización automatizada de los cultivos sería la correspondiente al muestreo discontinuo de datos, es decir, la toma de datos cualitativos de forma periódica, como por ejemplo, el vigor del cultivo, distancias entre nudos, estado de los frutos, etc.. Si a través de las plataformas WSN se obtienen datos cuantitativos sobre los impactos fenológicos en el cultivo, en esta parte el objetivo es tomar aquellos datos cualitativos que ofrecen información sobre cómo se está desarrollando el cultivo.

Utilizando tecnología de toma de datos móvil se pueden capturar estos datos y enviar automáticamente al sistema de información para su análisis. Utilizando formularios que pueden ser digitalizados en dispositivos tipo SMART Phones y Tablets, el operador en la finca podrá tomar los datos agronómicos correspondientes. De forma adicional existe la tecnología Digital Pen, que utilizando formularios en papel, permite capturar y digitalizar en tiempo real este tipo de información.

La siguiente fase en el proceso de monitorización automatizada de los cultivos se trabaja combinando los datos tomados por la plataforma WSN y los datos tomados a través de los formularios para el muestreo discontinuo. En este proceso de análisis, se determinan cuáles son los indicadores clave de rendimiento del cultivo (KPI). Estos dependerán de la especie y variedad de cultivo con la que se esté trabajando. Por cada KPI definido, también se definen los umbrales entre los que el indicador muestra que el cultivo se encuentra en condiciones adecuadas. Adicionalmente, por cada umbral definido en cada indicador, se define la alerta a configurar en el caso de que se sobrepase tanto por el nivel inferior como en el nivel superior.

La siguiente fase en el proceso de monitorización automatizada de los cultivos es la construcción en el software de gestión integral de la explotación agrícola del SMART GRID para la ayuda a la toma de decisiones (DSS – Decision Support System).

En la revista Almería en verde editada por Coexphal, en su número 139 de febrero de 2016 [RP1] se puede encontrar un artículo que habla sobre las ventajas que ofrecen este tipo de sistemas. En concreto el artículo “Hortisys, control exacto de un cultivo en tiempo real”, un ingeniero agrícola de una de las cooperativas agrícolas de Almería indica que “Hortisys (nombre comercial con el que la empresa identifica a este tipo de sistemas) te permite conocer la situación real de la planta para alcanzar su máximo potencial de producción”.

En la sección 5 – Management, data analysis and DSS del libro Precision Agriculture '15 [RB1] se pueden localizar diferentes modos de construcción de sistemas de este tipo. En el primer ejemplo de esta sección se muestra en esquema de como se ha de construir:

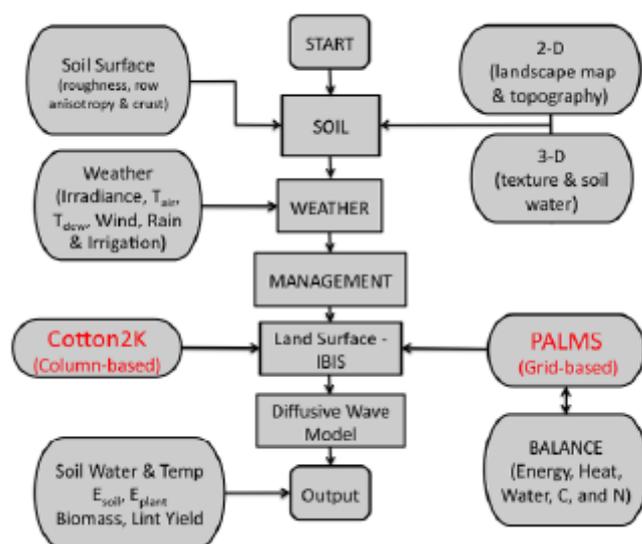


Figura 33 – Esquema de construcción de un DSS.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Utilizando estos sistemas DSS donde se analizan los indicadores en mallas de datos y gráficos el productor y el técnico agrícola obtiene información muy detallada sobre el comportamiento que está teniendo el cultivo y por lo tanto, que acciones puede realizar.

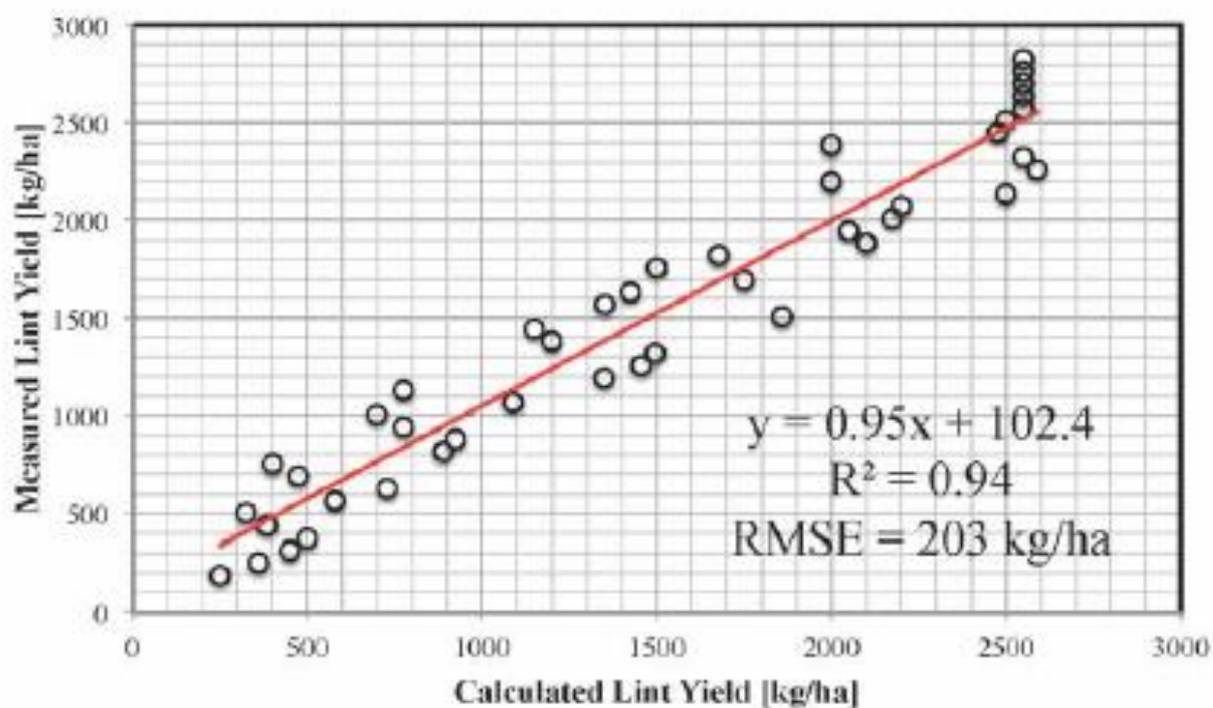


Figura 34 – Gráfica de datos resultante de las tablas de indicadores.

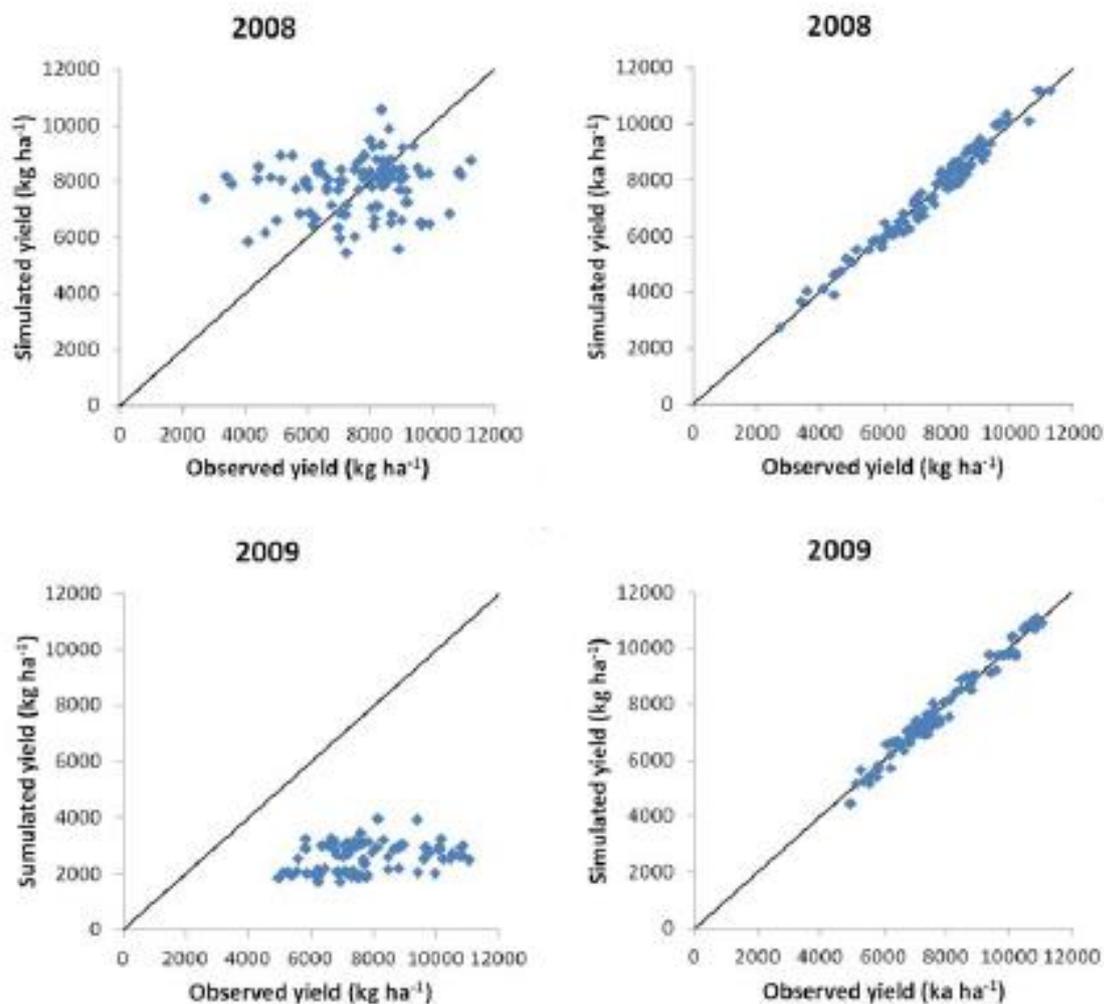


Figura 35 – Gráfica de datos comparativos entre años en un Sistema DSS.

La siguiente fase en el proceso de monitorización automatizada de cultivos, una vez de que ya se dispone del sistema DSS, es la monitorización y el seguimiento continuo de la información ofrecida. El productor y/o el técnico agrícola encargado de la gestión y asesoramiento harán uso del sistema monitorizar todas las fincas en las que opere, de manera que, o bien puede actuar por excepción utilizando las alertas que el sistema de información ofrece, o bien actuar visualizando y analizando la información que el DSS ofrece sobre todas las fincas.

La siguiente fase en el proceso de monitorización automatizada de cultivos es el aprendizaje y retroalimentación del sistema conforme se va analizando y comprobando su funcionamiento. Este tipo de sistemas, conforme se va analizando la información y comprobando los datos en campo, van registrando las situaciones para ir aprendiendo y calibrando los indicadores con respecto a la situación real en la que se va encontrando el cultivo.

El registro de las situaciones y la retroalimentación para calibrar los indicadores permitirá el disponer de un histórico de buenas y malas prácticas. Este histórico permite para próximas campañas productivas tener una base de datos que oriente y asesore en las buenas prácticas de ese cultivo orientado a obtener máxima producción y calidad.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

En definitiva el objetivo de este tipo de sistemas es ofrecer información objetiva y orientativa al productor y al asesor técnico de la explotación agrícola que le ayude a toma decisiones de manejo del cultivo. La SMART Agriculture ofrece esta inteligencia que ayuda en la gestión del cultivo, no solo basada en la experiencia del agricultor, sino también apoyada por datos y procesos en los que se tiene conocimiento de su validez, eficiencia y eficacia.

5.2. Actuaciones automatizadas. Control automatizado del riego agrícola.

Se refiere a los sistemas tecnológicos que permiten controlar y gestionar los diferentes elementos que realizan operaciones en fincas y cultivos, bien como respuesta automática de un sistema de monitorización automatizada de cultivo (identificado en el epígrafe anterior de este documento), o bien como sistema de gestión y control ofrecido por una plataforma tecnológica al agricultor y/o asesor técnico de la explotación agrícola.

Aunque en estructuras de cultivo invernadas es posible encontrar más elementos susceptibles de ser controlados mediante actuadores (control de ventanas para ventilación, control climático, CO₂, etc.), en términos generales para cualquier estructura de cultivo se hace bastante foco en la gestión y control automático del riego agrícola.

Antes de identificar las diferentes tecnologías existentes para controlar y gestionar el riego, se hace necesario tener conocimiento de las condiciones de suelo al objetivo de establecer una buena planificación.

En el libro Ingeniería del Riego [RB4] podemos encontrar metodologías y datos a tener en cuenta para el correcto cálculo de las dosis de riego. En el capítulo 2. Relaciones agua – suelo – planta, en lo que al suelo se refiere, se identifica que el suelo es un sistema complejo con tres fases bien diferenciadas:

Sólida, constituida por la matriz del suelo, compuesta por sustancias minerales y orgánicas.

Líquida, constituida por una solución de agua y sales disueltas.

Gaseosa, constituida por una mezcla de aire y vapor de agua.

Estas dos últimas fases ocupan conjuntamente los poros del suelo. El número y tamaño de éstos varía con cada tipo de suelo. La relación entre el volumen de los poros y el volumen aparente determina la porosidad de un suelo, que suele variar entre el 30% y el 60%.

La parte sólida mineral del suelo está constituida por 3 clases de partículas que se clasifican según su tamaño. A medida que las partículas son menores, disminuye el tamaño de los poros existentes. La proporción de cada una de ellas determina la textura, que sirve para clasificar los suelos, siendo el sistema más empleado el triángulo de texturas.

Dicha textura tiene gran importancia en el movimiento del agua en el suelo. Por ejemplo:

El arenoso, es el suelo más simple, con un contenido superior al 70% de arena. Tiene gran cantidad de poros grandes y, en consecuencia, poca capacidad de retención de agua. Son suelos ligeros que se pueden considerar químicamente inertes.

El arcilloso, es un suelo más complicado, conteniendo más del 35% de arcilla. Son suelos pesados, que tienen abundantes poros de tamaño pequeño, con una gran capacidad de retención de agua. Su complejidad aumenta a medida que lo hace su contenido en arcilla. Cuando esta supera el 60% se suelen presentar problemas para su uso agrícola.

En definitiva, conociendo el tipo de suelo y sus características físicas y químicas se puede determinar cómo retiene el agua, como fluye en él, etc., y por lo tanto, como se tiene que dosificar y planificar el fertirriego por cada especie y variedad de cultivo.

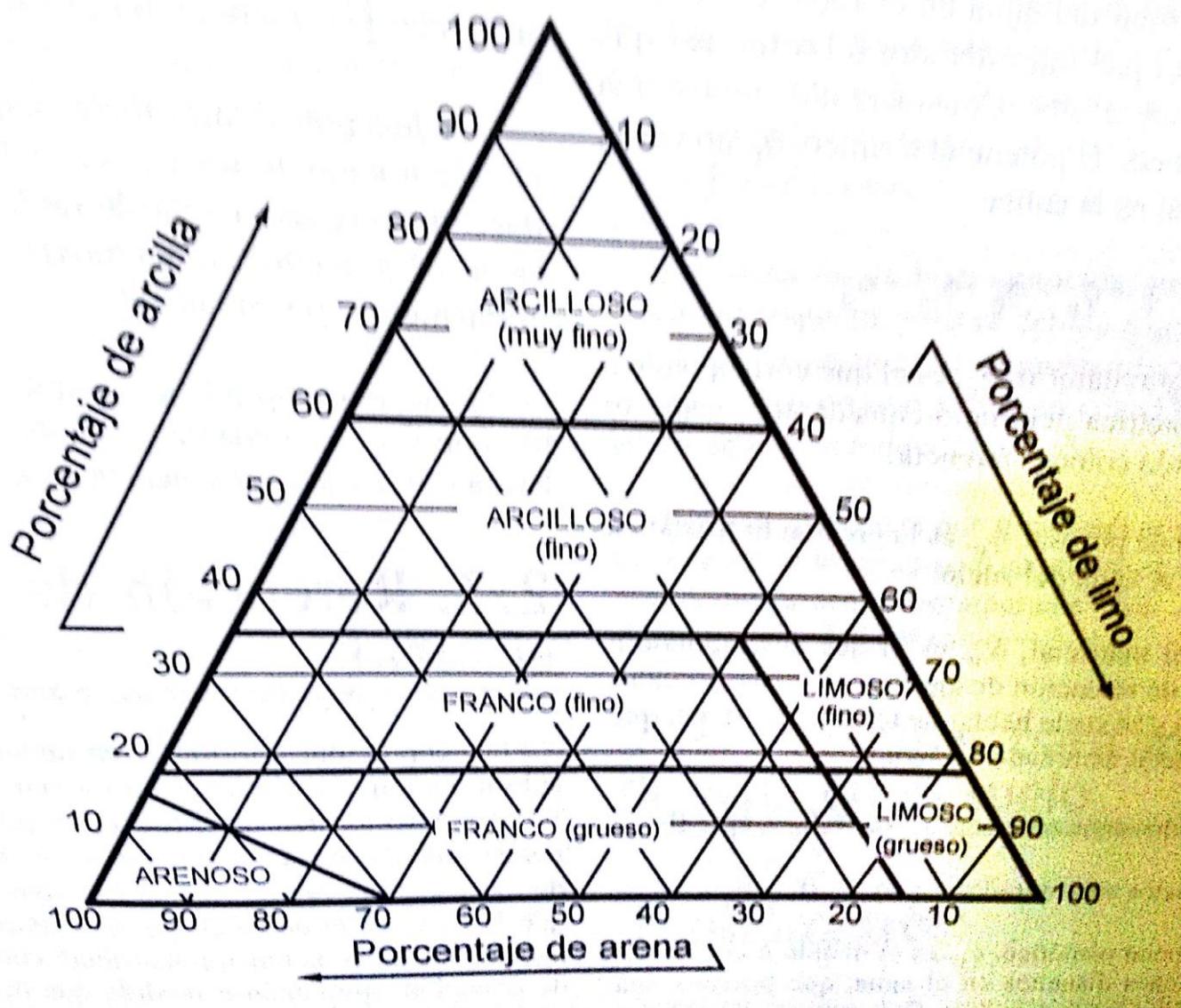


Figura 36 – Triángulo de texturas.

Una vez identificado el tipo de suelo del que se dispone en la finca, se pueden calcular las dosis de fertirriego en función de la especie y variedad de cultivos. La metodología de definición de estos algoritmos de cálculo se identificará a continuación en el siguiente subepígrafe (Modelos de cálculo predictivo).

Una vez determinado el plan de fertirriego basado en las condiciones físico-químicas del suelo y las necesidades de agua y nutrientes de las plantas, se procede a ejecutar este plan interactuando de forma automática con los elementos y dispositivos de control de cada uno de los sectores de riego definidos en la finca. Para ello existen diversas metodologías y tecnologías que a continuación se identifican:

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Sistemas SCADA instalados en los motores de bombeo, bien para el llenado de balsas, bien para suministro de agua a los diferentes hidrantes y/o boquillas de riego a través de los diferentes sectores de riego definidos

Un sistema SCADA es una plataforma tecnológica basada en arquitecturas de sistemas en tiempo real (al igual que los dataloggers que controlan sondas y sensores) donde el software embebido es capaz de: por un lado obtener información sobre los planes de riego registrados y obtener información de estados de aquellas ejecuciones que actualmente se están realizando y, por otro lado, interactuar con las válvulas, relés y demás elementos electromecánicos que controlan las bombas que mueven el agua.

Siguiendo el esquema de los sistemas en tiempo real que muestra la ilustración 23, los elementos correspondientes a un sistema SCADA serían:

Computador: Sistema central, con su correspondiente procesador y memoria, que realiza todo el sistema de cálculo y almacén de datos correspondiente a los procesos de planificación y ejecución del riego.

Reloj de tiempo real: Sistema que secuencia y programa temporalmente las ejecuciones de los planes de riego almacenados en el sistema.

Alarmas: Sistema de notificaciones y avisos al operador del sistema sobre los estados de los componentes, planificaciones y ejecuciones de riego. Estos avisos pueden ser visualizados a través de la consola del operador y/o enviados a través de diversos sistemas de notificación, como correo electrónico, mensajería SMS, mensajería push, etc.

Consola operador: Sistema de interfaces de usuario para la operación del sistema de manera que se pueda operar: utilizando formularios de introducción y visualización de datos a través de teclado y accesibles vía tecnología WEB, aplicación de escritorio y/o aplicación móvil (Tablets y SMART Phones), y utilizando conectores software que automaticen la introducción y visualización de datos a través de terceras aplicaciones. Estos conectores pueden ser propietarios del fabricante o bien utilizando tecnologías estandarizadas como RMI, WEB Services, etc.

Sensores, Acondicionadores de señal, multiplexores y conversores Analógico Digital: Estos elementos que actúan como entrada de información a través de la interfase del computador, son los elementos que tienen instalados las bombas que mueven el agua. A través de ellos suministran la información de operación del sistema, de manera que el sistema SCADA puede informar sobre estados de los elementos y de las planificaciones y actuaciones de riego.

Convertidores digitales / analógico, señales de actuadores y actuadores: Estos elementos que actúan como salida de actuación automática sobre un determinado elemento electromecánico, en este caso los dispositivos que encienden o apagan las bombas, son los elementos que tienen instalados las estaciones de bombeo. A través de ellos ejecutan las operaciones de encendido y apagado de las bombas que mueven el agua.

Estos elementos de actuación sobre dispositivos electromecánicos se denominan PLC (Programmable Logic Controller – Controlador Lógico Programable). Comúnmente conocidos como “autómatas”, es un pequeño ordenador utilizado para automatizar procesos electromecánicos. A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y salida y con índices de protección altos (IP6 mínimo - dispositivos ruggedizados).

A continuación se muestra un esquema de un sistema SCADA.

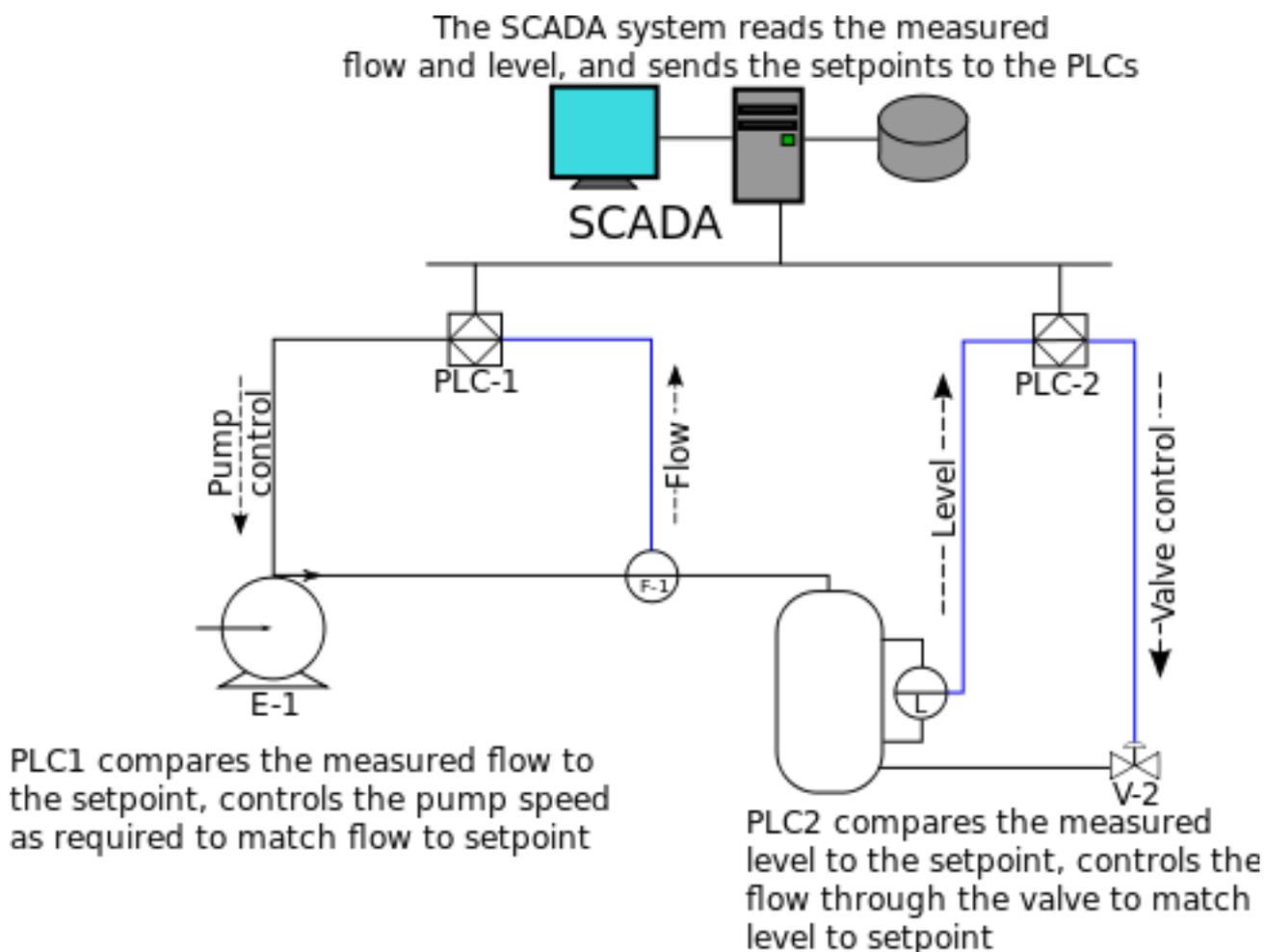


Figura 37 – Esquema de un Sistema SCADA.

Estaciones remotas telecontroladas que conectan directamente con electroválvulas en los hidrantes

Otra modalidad de actuación automatizada sobre los elementos de riego es el uso de estaciones remotas telecontroladas. Estos elementos son dispositivos similares a los PLC pero con una lógica de proceso más reducida y dedicada a los procesos de riego.

En cuanto a las comunicaciones de las que disponen para poder telecontrolarlos, pueden disponer de interfaces GPRS/UMTS/GSM y como sistemas de alimentación eléctrica pueden disponer de placas solares fotovoltaicas o bien conexión directa a punto eléctrico.

Aunque el fabricante suele disponer de un software que permite una mínima gestión de la actuación sobre este tipo de dispositivos, es habitual el desarrollo de software más avanzado que interactúa con el hardware a través de las tramas TCP/IP que implementa el protocolo de comunicaciones implementado para su gestión, así pues, estos dispositivos son muy versátiles cuando se han de instalar lejos de donde se encuentra el bombeo para controlar las electroválvulas de los hidrantes que controlan los sectores de riego de las fincas.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Desarrollando el módulo software integrado en el sistema de gestión integral de la explotación agrícola, o bien el provisto por el propio fabricante, el agricultor podrá enviar órdenes o planificaciones de apertura y cierre de las electroválvulas.



Figura 38 – Estación remota del fabricante Measure Instruments.

Es habitual en fincas que tienen cultivo extensivo y de grandes dimensiones el disponer de ambos sistemas, es decir:

Sistemas SCADA donde tienen los bombeos, bien para el llenado de balsas de agua procedente de pozos o de comunidades de regantes, bien para el movimiento del agua hacia los diferentes sectores de riego controlados por hidrantes dispersados por la finca.

Estaciones remotas tele-controladas instaladas donde se ubican los hidrantes, ya que estos disponen de electroválvulas que son controladas por este tipo de dispositivos.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

A través de un software central ubicado como módulo funcional de un software de gestión integral de la explotación agrícola, que permite la integración con los sistemas SCADA existentes y con la capacidad de enviar órdenes y planificaciones a las estaciones remotas, se puede controlar remotamente, bien desde un ordenador con el software instalado, bien a través de dispositivos móviles (SMART Phones y Tablets) con apps instaladas, todas las operaciones de movimiento de agua, es decir, llenado de balsas, bombeo de agua a finca, dosis de fertilizantes en el proceso de fertirriego, etc.

El capítulo 8 del libro Ingeniería del riego [RB4] está dedicado a los procesos de automatización del riego. En él se identifica las ventajas e inconvenientes de esta automatización, que son:

Facilita un buen manejo del riego, pues permite conocer la situación real en cada momento y detecta anomalías en su funcionamiento.

Reduce la mano de obra necesaria y evita el error humano que, en ciertos casos de cultivos delicados o de situaciones críticas, puede producir importantes pérdidas productivas. En contrapartida, para su correcto funcionamiento, exige una especialización de la misma, con conocimientos específicos sobre el tema.

Cuando utiliza los parámetros de manejo: condiciones climáticas, humedad en suelo o planta, permite una mayor racionalización del riego, aportando el agua cuando la planta la necesita, en las mejores condiciones. Se consigue una mayor eficiencia, lo que repercute en un ahorro de agua, de gran importancia en casi todas las regiones españolas. Para ello necesita unos conocimientos y una tecnología avanzados.

La optimización del uso del agua permite, generalmente, una disminución de costes del riego.

En cuanto a inconvenientes, el principal es el coste de los equipos, que en ciertas zonas o para ciertos cultivos pueden hacer inviable este sistema. Al mismo tiempo, para un correcto funcionamiento de los mismos, es necesario una mejor formación del regante, con el fin de obtener los mayores beneficios que esta técnica puede aportar.

Continuando con los contenidos del libro Ingeniería del riego [RB4], en él se muestra el esquema de una electroválvula de cierre automático que puede ser controlada por un sistema informático, bien sea un SCADA, bien sea una estación remota tele-controlada. El elemento identificado como clavija solenoide es el que se conectaría al PLC para que este pueda enviar las órdenes de apertura y cierre de válvula.

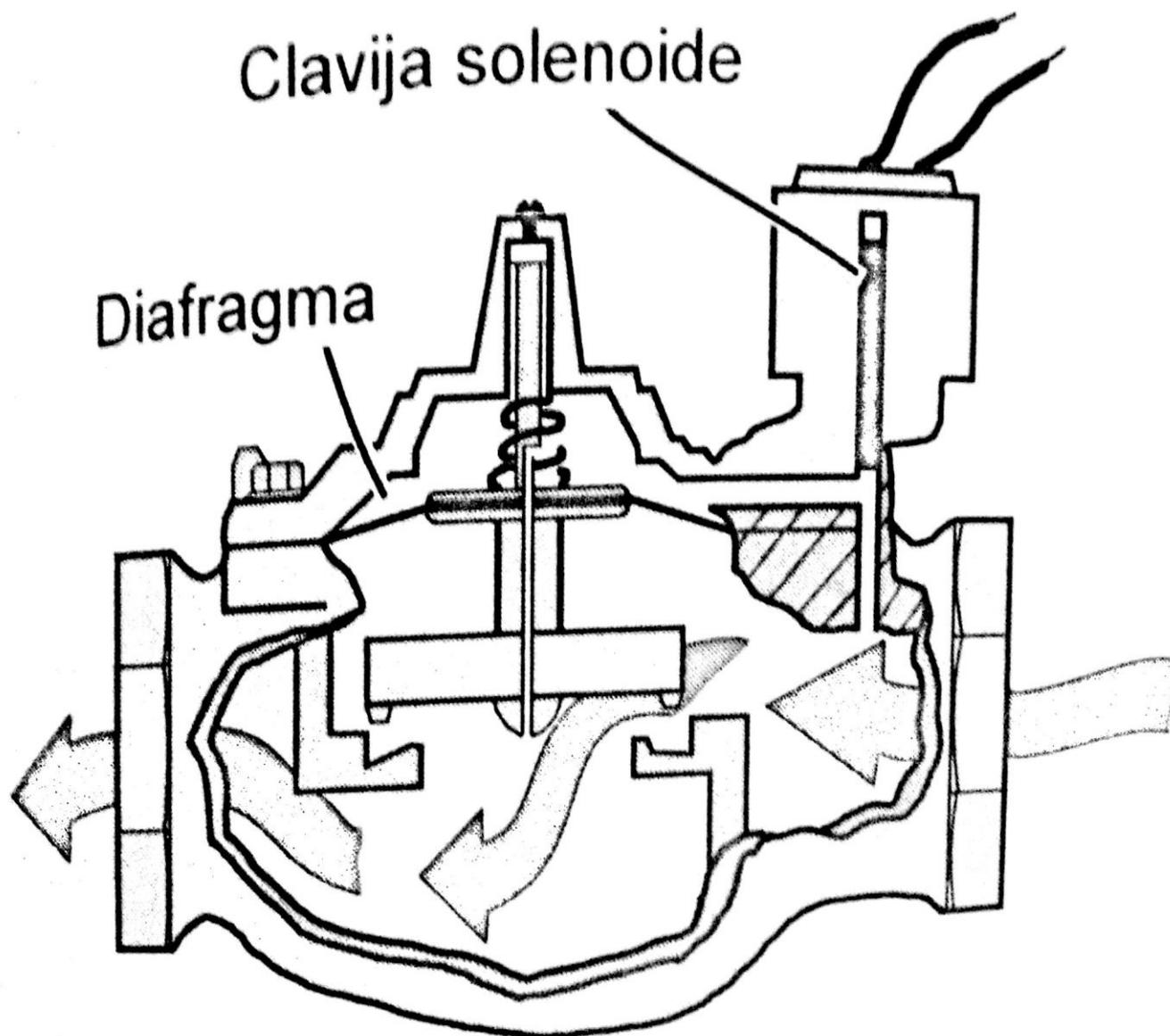


Figura 39 – Electroválvula de cierre automático.

Lo que se pretende con todo este tipo de tecnologías es lograr la gestión integral de los procesos de riego agrícola al objetivo de optimizar sus procesos. En el blog temático de SMART Agriculture “agointeligencia.com” [R18] en el artículo “I+D+i en Sistemas de Riego y Fertirrigación” se identifican las líneas estratégicas de investigación e innovación en las que se está trabajando, donde los sistemas TICs son una de las bases fundamentales para la gestión integral del proceso.

5.3. Modelos de cálculo predictivo

Se refiere a algoritmos matemáticos que modelan el comportamiento, situación o estado de algo en un futuro. Esta predicción puede estar basada en una proyección a futuro basada en un cálculo estadístico sobre datos pasados, o bien estar basada en el conocimiento de los parámetros que impactan en esta situación futura.

Centrando estos cálculos en los comportamientos, situaciones y estados de los cultivos a futuro, los modelos pueden ser:

Modelos relacionados con el clima

Los modelos de predicción agroclimática de precisión tienen una serie de particularidades con respecto a los modelos tradicionales de previsión del clima ya que, aunque utilizan las mismas bases algorítmicas de predicción climática, se añaden una serie de factores que son determinantes para estimar correctamente los impactos fenológicos en el cultivo.

A continuación se identifican cuáles son las bases algorítmicas de previsión del clima y posteriormente se identificarán las particularidades que son necesarias en una predicción agroclimática de precisión, es decir: previsión del clima teniendo en cuenta parámetros de fenología que impactan en los cultivos y de precisión, ya que es importante registrar las condiciones microclimáticas de la zona ya que aportan unas características que pueden hacer diferente el potencial productivo de ese cultivo con respecto a otra zona que tenga otras condiciones microclimáticas (aunque sean zonas cercanas).

Bases algorítmicas de previsión del clima: Existen actualmente varios modelos estandarizados para el cálculo de la previsión climática de propósito general. Por ejemplo en España, AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), entidad oficial en el ámbito meteorológico, utiliza el modelo HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) [RI14] que es un modelo creado en colaboración de los institutos meteorológicos europeos. Existen otros modelos matemáticos como son: GFS, GEM, JMA, UKMO, ENS, ECMWF o ENS.

Parámetros adicionales a tener en cuenta en una previsión agroclimática de precisión: De forma adicional a las variables básicas que ofrece un sistema de previsión climática de propósito general, para que la previsión sea agroclimática se han de contemplar otras variables que carácter fenológico. Estas variables son derivadas de las básicas, es decir, son calculadas en función de ellas y en función de parámetros propios del cultivo y de la finca donde se está realizado el modelo. Algunas de estas variables son: ETc (Evapotranspiración del Cultivo) que se calcula como la ET0 (Evapotranspiración de referencia) multiplicado por un factor ligado al cultivo llamado Kc (Coeficiente de cultivo). La Pef (Precipitación efectiva) que se calcula en función de la precipitación, que sí es un valor básico, y un factor ligado al cultivo. La NRN (Necesidades de Riego Netas) que se calcula como la diferencia entre la ETc y Pef. La DPV (Déficit de Presión de Valor) que se calcula con una función que depende la temperatura y la humedad relativa, que son variables básicas que se tienen en cuenta en las previsiones climáticas de propósito general. Adicionalmente, se pueden calcular otros parámetros que son muy interesantes a tener en cuenta para las condiciones de manejo del cultivo, como pueden ser: la cantidad de tiempo en que la humedad relativa está por encima o por debajo de un valor, cantidad de ocasiones en las que se supera un determinado umbral de una de las variables, etc. En cuanto a la condición de precisión en la zona microclimática, se ha de contemplar las condiciones orográficas de la zona (altitudes, cotas, orientaciones, etc.) y, a través de estaciones climáticas localizadas en la zona en cuestión, el sistema se calibra automáticamente en función de los valores reales que están tomando continuamente.

El objetivo de la previsión agroclimática de precisión es ofrecer los parámetros fenológicos de entrada en los modelos de crecimiento de cultivo que se verán a continuación y ofrecer información prevista sobre uno de los parámetros más importantes (el clima previsto) en la toma de decisiones de manejo del cultivo.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

En el libro *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth* [RB7] se identifica la importancia de este tipo de modelos en el crecimiento de los cultivos en estructuras invernadas. Es decir, en particular para estructuras de cultivo de tipo invernadero, predominantes en Almería, en todos los sistemas de ayuda a la toma de decisiones estratégicas de manejo de cultivo y en todos los cálculos algorítmicos que intentan modelar informáticamente el crecimiento en fase vegetativa y el engorde del fruto en fase productiva, los modelos de previsión climática son esenciales. En particular, en el libro, se identifican como valores fundamentales para los modelos de crecimiento los correspondientes a: temperatura, radiación, humedad relativa y CO₂.

En estructuras de cultivo de tipo invernadero existe un condicionante adicional a tener en cuenta y es que las previsiones climáticas se realizan en base a las condiciones exteriores del invernadero, es decir, a la zona donde se ubica, pero dentro del invernadero existe otro microclima diferente creado por la propia estructura según el volumen del invernadero, tipo de plástico y, en general, tipo de estructura (multitunel, raspa y amagado, etc.). Esto implica que hay que tener en cuenta otro modelo adicional que extrapole la previsión climática exterior al interior del invernadero. En el libro anteriormente mencionado [RB7] se identifica que ya hay estudios al respecto y existe un modelo a tal efecto que tiene en cuenta las condiciones estructurales del invernadero para realizar la previsión agroclimática de precisión dentro del invernadero.

Modelos relacionados con el crecimiento de la planta

Tanto el desarrollo vegetativo como el desarrollo productivo por cada especie y variedad de cultivo se puede modelar teniendo en cuenta: parámetros relativos a la propia estructura del cultivo, parámetros fenológicos y parámetros nutricionales. En definitiva para modelar el desarrollo de un determinado cultivo se han de tener cuenta:

- Parámetros fijos, es decir, parámetros que no cambian durante toda la campaña o ciclo productivo, como por ejemplo: el tipo de suelo, el marco de plantación o, si son estructuras invernadas, el tipo de invernadero, material de la cubierta, etc.
- Parámetros dinámicos, es decir, parámetros que van cambiando a lo largo de toda la campaña o ciclo productivo, como por ejemplo: temperaturas, humedad, fertirriego, etc.

En cuanto al desarrollo informático de estos modelos, se dispone de una estructura normalizada de datos a efectos de bus de comunicaciones. Esta estructura normalizada de datos concentra tanto los datos fijos como los dinámicos, abstrayendo así al sistema de la procedencia y soporte de la información.

Una vez ejecutado el modelo con estos datos, las salidas de información pueden ser para el sistema de ayuda a la toma de decisiones o bien servir de entrada a otros modelos que realizar otros cálculos.

En la siguiente ilustración se muestra un esquema de la arquitectura a gestionar.

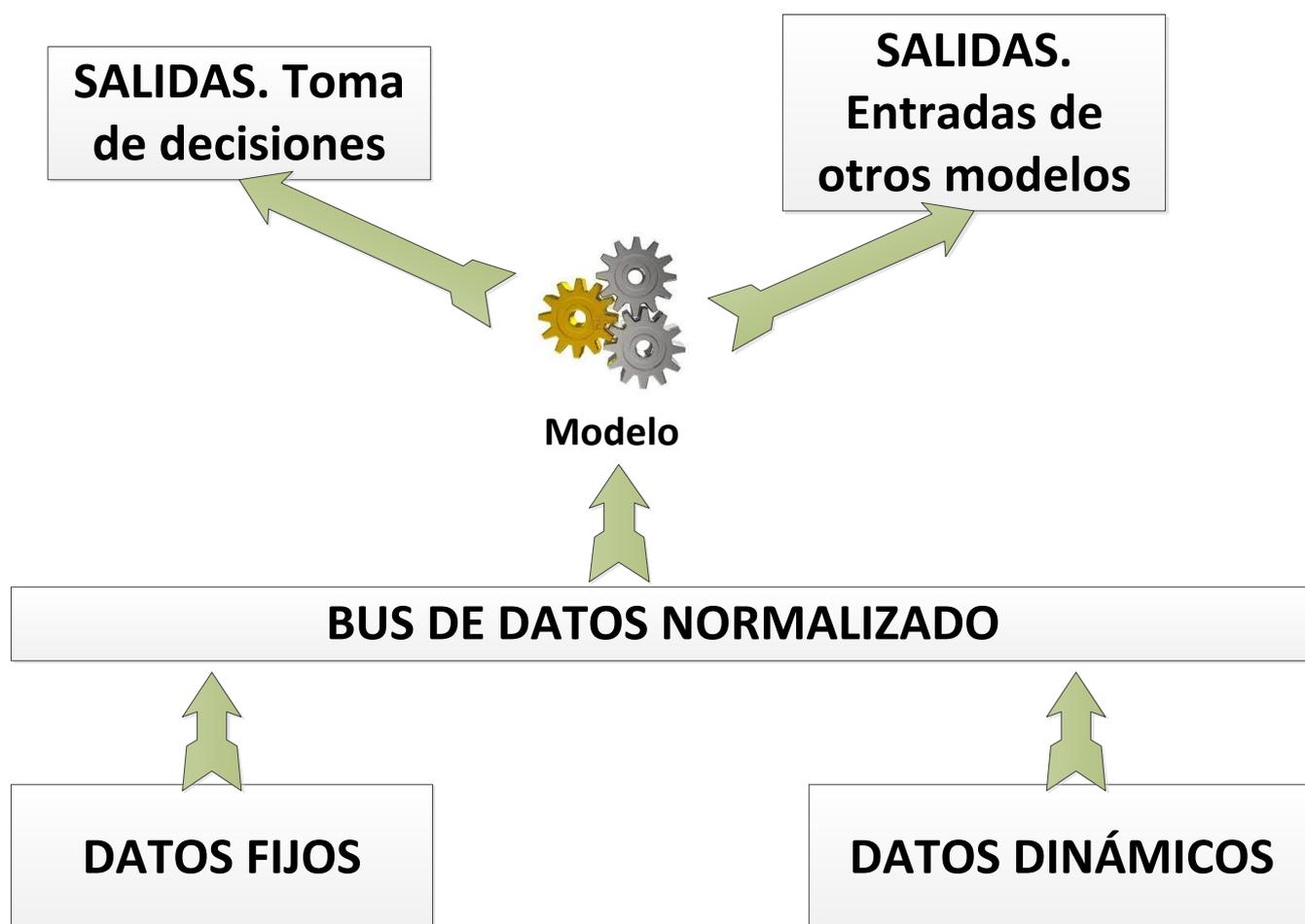


Figura 40 – Esquema de ejecución de los modelos.

Los modelos de crecimiento permiten simular situaciones futuras en relación al estado vegetativo de las plantas y, lo más importante, el potencial productivo, es decir, la cantidad de producto que se podrá cosechar. Centrando los resultados en el potencial productivo, los datos resultantes pueden estar orientados a:

- Sistema de ayuda a la toma de decisiones: Si el sistema puede estimar el potencial productivo del cultivo, se podrá establecer una mejor planificación comercial ya que se podrán realizar ventas en diferentes mercados en función de stock previsto.
- Como entradas a otros modelos: la estimación del potencial productivo de los cultivos puede servir como entrada a sistemas de análisis BIG DATA orientados a simular situaciones futuras de rendimiento de cultivo y de potencialidad de consumo en diferentes mercados.

En definitiva, el conocimiento del potencial productivo del cultivo permite estimar la cantidad de producto a recolectar, información vital para realizar una óptima planificación comercial de los productos.

Continuando con los contenidos del libro En el libro Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth [RB7], en su epígrafe 4. Crop Growth Control, se presenta un esquema de un modelo de crecimiento de cultivo, que en definitiva arroja valores de estimación productiva. En él se puede identificar como el modelo de crecimiento del cultivo en realidad se compone de dos

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

modelos unidos, es decir, las salidas del primero participan como entrada en el segundo. Estos modelos se centran en estructuras de cultivo invernadas. Estos son:

- Modelo de clima: Las salidas del modelo que participan como entrada en el modelo de crecimiento del cultivo son, temperatura, humedad, radiación PAR (radiación fotosintéticamente activa) y CO₂.
- Modelo de crecimiento del cultivo: Tal y como se identifica en el siguiente esquema, las salidas de este modelo también retroalimentan al modelo de clima, con lo cual son modelos que aprenden con la experiencia, es decir, se autocalibran en función de los datos reales existentes en la finca.

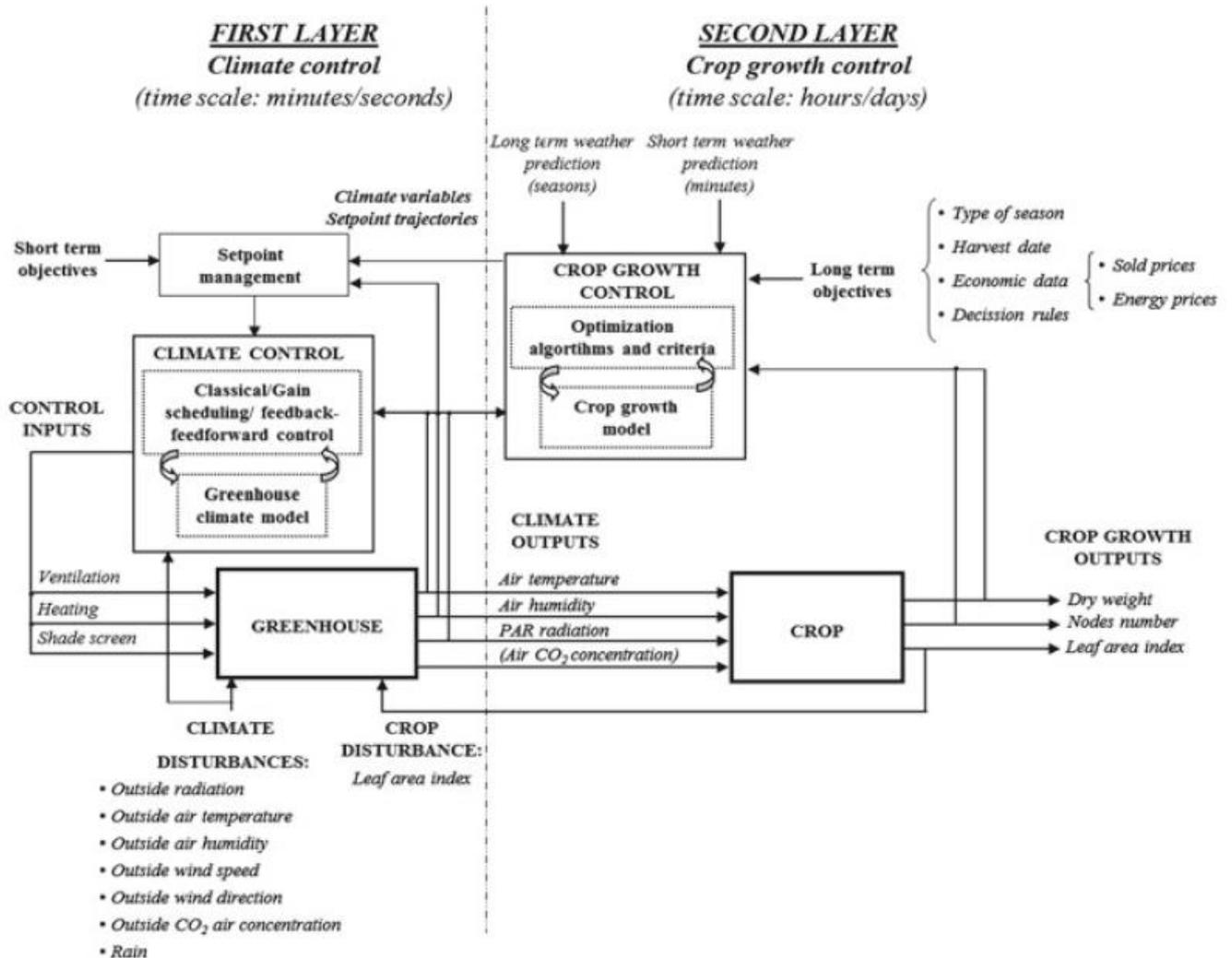


Figura 41 – Esquema del modelo de crecimiento del cultivo.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

En relación a la ejecución adecuada del modelo, este libro [RB7], también indica cómo se ha de ejecutar la simulación para obtener los datos estimados de la forma más fidedigna posible

A continuación se identifica un flujograma de proceso que lo determina.

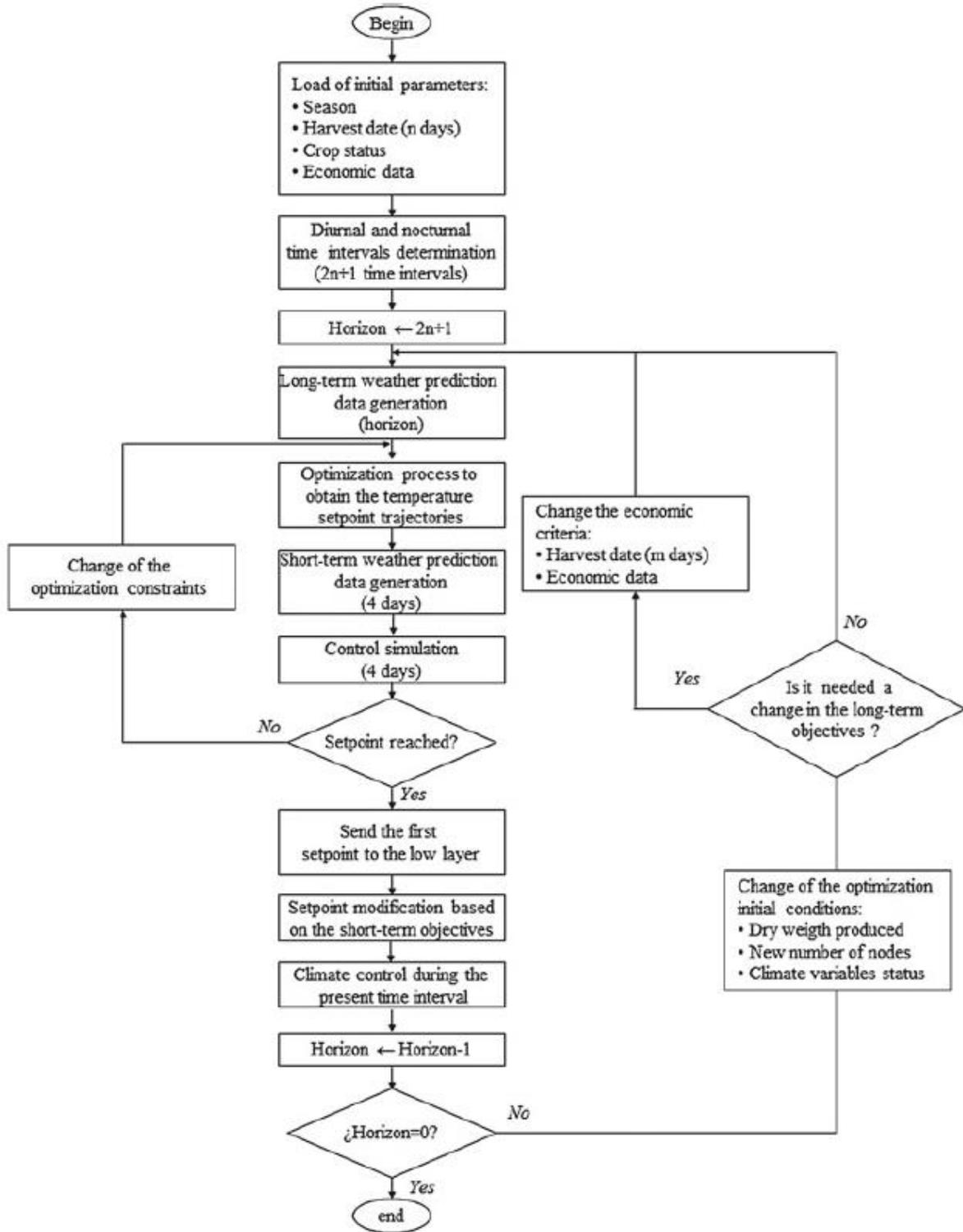


Figura 42 – Flujograma de proceso en la ejecución de la simulación.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Modelos de necesidades hídricas del cultivo

El objetivo de estos modelos es el cálculo de las necesidades nutricionales de las plantas. Como todos los modelos que trabajan sobre estimaciones biológicas de los cultivos, cada especie y variedad de cultivo tendrá su propio modelo.

El modelo, en función de la fase biológica en la que se encuentra el cultivo, determina cual es la necesidad nutricional y por lo tanto la recomendación de riego que se ha de realizar. Este modelo ayuda al usuario en la toma de decisión sobre la planificación de riego y sobre las dosis de fertilizante que se han de aplicar.

El modelo utiliza información sobre:

- El sistema de riego del que se dispone, el cual ofrece información sobre la temporalización que se puede aplicar, es decir, si se dispone de un sistema SCADA, el caudal y presión que puede suministrar por unidad de tiempo, sectorización de la que se dispone, número de hidrantes en finca, si el riego es por goteo, por aspersión, si es riego de pie, etc.
- Los factores fijos del suelo que permiten determinar la capacidad de campo, los factores fijos que determinan la estructura del cultivo, es decir, el marco de plantación, tipo de suelo, etc.
- Los factores dinámicos que determinan la nutrición de la planta como puede ser: conductividad eléctrica, temperatura de suelo, humedad de suelo, nitrato y potasio en suelo, humedad relativa, radiación, etc. Estos factores dinámicos son los que se obtienen de forma automatizada a través de plataformas WSN (sondas y sensores) y a través de la toma de datos cualitativa del cultivo.
- Los objetivos que se persiguen, es decir, se ha de trabajar para incrementar ratios de producción, se ha de trabajar en la mejora de la calidad, se ha de trabajar en potenciar algún factor biosaludable, como por ejemplo en olivicultura la potenciación de polifenoles.

Como información de salida del modelo, se obtiene la planificación de riego que se recomienda y las dosis de fertilizante que se deberían aplicar.

A continuación se muestra un esquema del funcionamiento de este modelo.

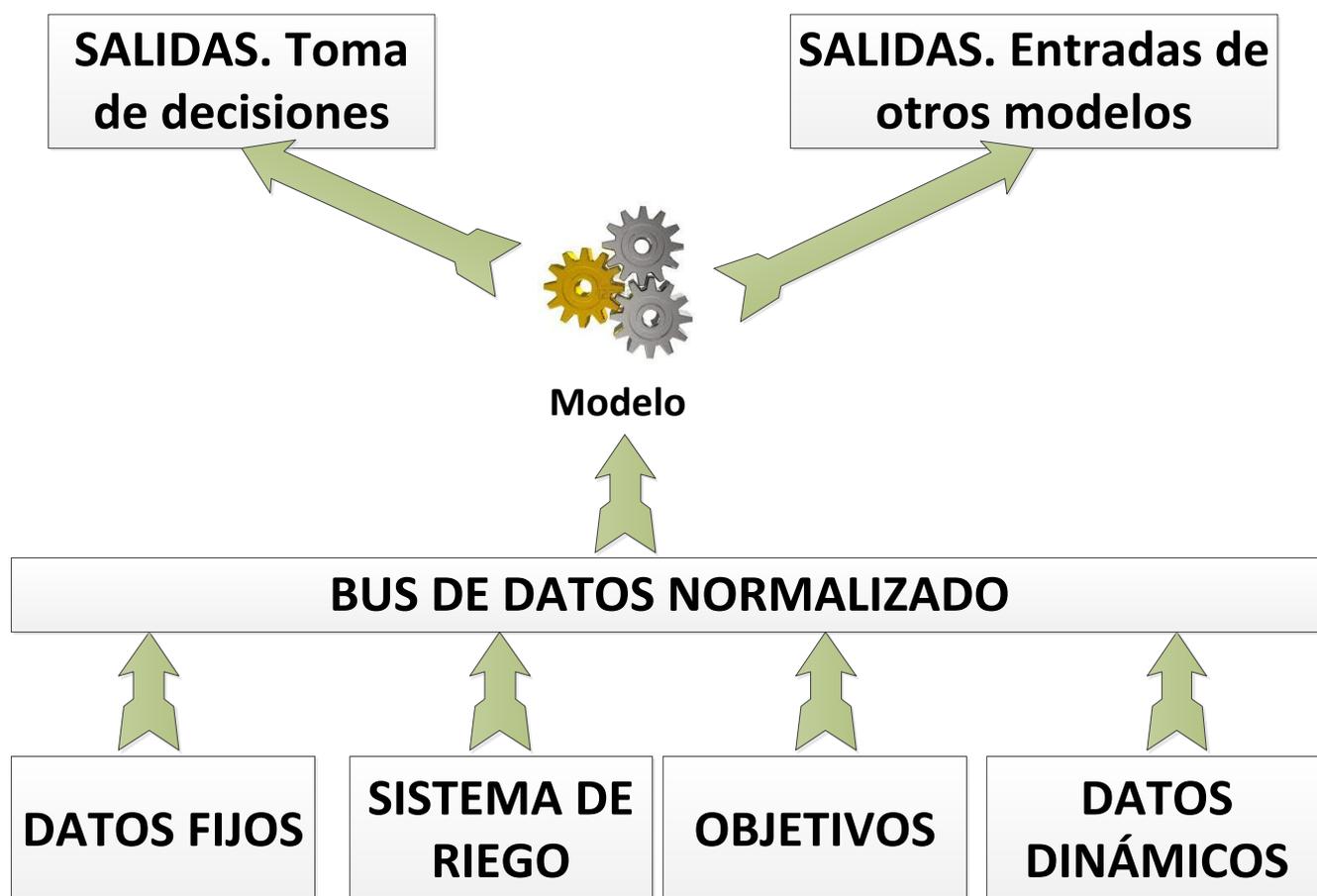


Figura 43 – Esquema de funcionamiento del modelo.

La salida del modelo puede tener dos sentidos

- Como datos que el sistema de información para la ayuda a la toma de decisiones de manejo del cultivo ofrece al usuario en concepto de recomendación de riego.
- Como datos de entrada a otros modelos que utilizan esta información como entrada al cálculo de otras recomendaciones, como por ejemplo, un modelo de optimización de costes energéticos en el ámbito del riego agrícola.

Como todos los modelos que tienen varios ámbitos de entrada de información, informáticamente se hace necesario la definición de una estructura normalizada y homogeneizada de datos. Esta estructura, llamada Bus de Datos, ofrecerá la funcionalidad de abstracción de los parámetros de entrada, de manera que, cuando haya que calibrar el modelo y suponga cambios en las estructuras de entrada de datos, el impacto en el desarrollo informático del modelo será menor.

En el libro *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth* [RB7], en su epígrafe 3.1.3 *Irrigation Control* se identifica los beneficios que se aportan con los modelos de control del riego y los objetivos que persigue, que son:

- Proveer la cantidad justa de cada nutriente para realizar un riego sostenible, es decir, compatible con el medio ambiente y el que la planta necesita.
- Asegurar el correcto balance nutricional para promover el crecimiento de la planta
- Proveer la correcta aireación para permitir la respiración de las raíces

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Mantener los niveles de temperatura en relación a los intervalos óptimos de cada especie.

En él se muestran algunos gráficos sobre las entradas que requiere el algoritmo y que son modeladas en el sistema de información.

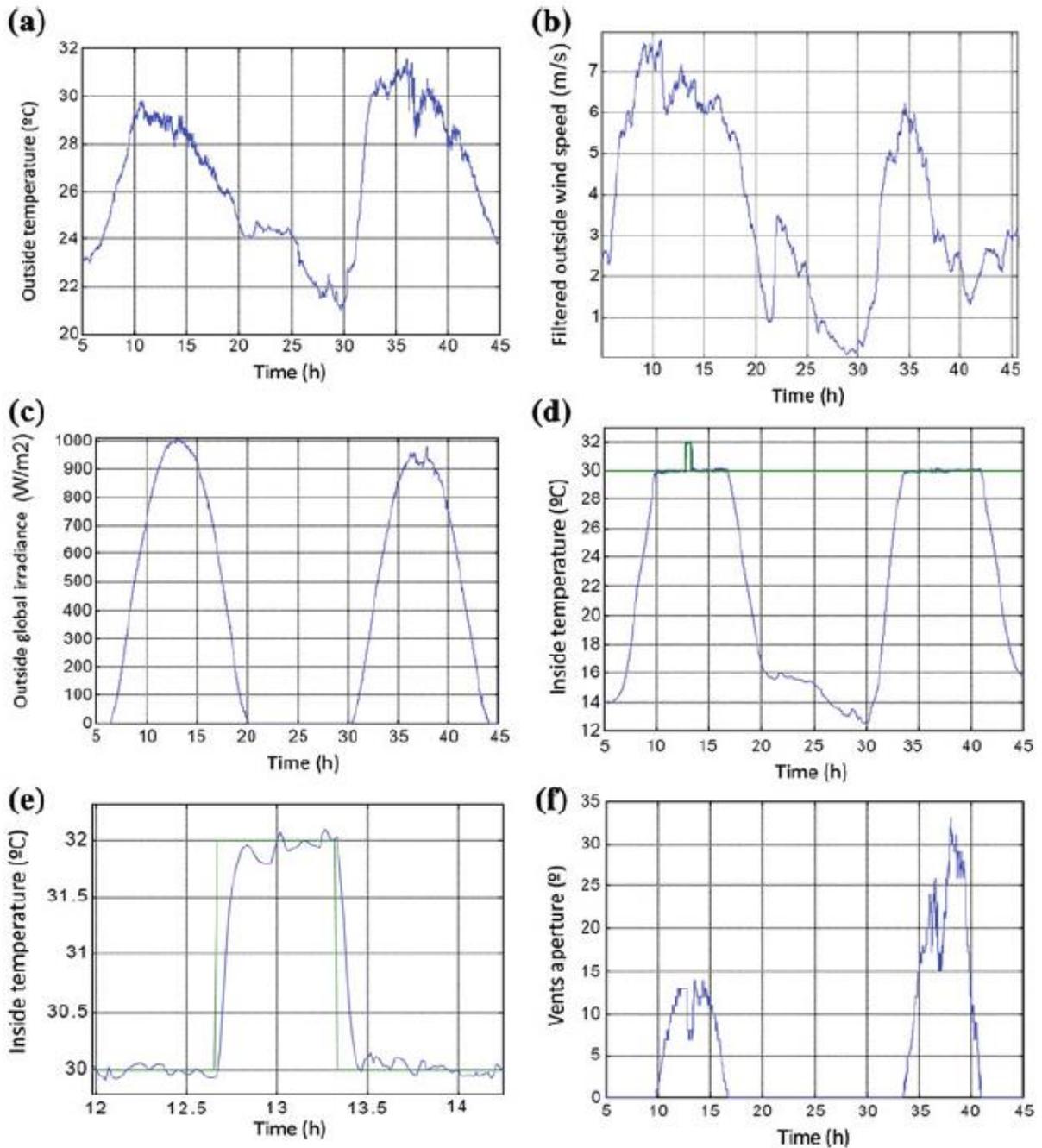


Figura 44 – Gráficos de parámetros que actúan como entrada al modelo.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Continuando con la información que identifica este epígrafe, en él se reflejan diferentes modelos basados en diferentes parámetros, como son:

- Riego basado en cantidad de humedad en suelo y sustrato.

En este modelo, las principales entradas de datos en el sistema de información serán la cantidad de sustrato y la cantidad de humedad que hay en suelo. Estos datos pueden ser capturados automáticamente a través del sistema de sondas y sensores (plataforma WSN)

- Riego basado en evapotranspiración

En este modelo, la principal entrada al sistema de información es un dato calculado a través de las condiciones climáticas. Los datos climáticos son obtenidos a través de los modelos de observación y previsión climática que se han identificado anteriormente en este epígrafe.

- Riego basado en medidas de planta

En este modelo, la principal entrada al sistema de información son los datos medidos directamente en planta, como por ejemplo el grosor del tallo que es medido a través de dendrómetros. Los dendrómetros son sensores que van aportando información sobre el engrosamiento paulatino del tallo, con lo que ofrecen información sobre la nutrición que va teniendo la planta, con lo cual se puede modelar las necesidades de fertirrigación del cultivo.

- Riego basado en radiación solar

En este modelo, la principal entrada al sistema de información son los datos de radiación solar, tanto global como PAR (radiación que es fotosintéticamente activa), la cantidad de radiación es la que define la fotosíntesis de la planta. En función de este proceso se puede definir la nutrición de las plantas, con lo que el riego se puede modelar en función de este elemento. La radiación es otro parámetro que se obtiene del modelo de observación y previsión agroclimática.

- Riego basado en drenaje de suelo

En este modelo, la principal entrada al sistema de información es el drenaje de suelo. El drenaje se puede calcular a través de sondas de humedad en suelo (plataforma WSN) a varias profundidades, con lo que es un dato que se puede obtener automáticamente por parte del sistema de información a través de la plataforma WSN.

- Riego basado en la integración de varios métodos.

En este modelo, se mezclan entradas variopintas como datos de suelo, de fenología, de estructura de cultivo, etc., ya que todas ellas impactan en las necesidades nutricionales del cultivo. Todas las entradas de datos pueden ser automáticas y algunas de ellas son: tipo de suelo, previsión climática, teledetección, etc.

Modelos de momentos óptimos de recolección

Estos modelos pretenden calcular y estimar los momentos óptimos de recolección del fruto, es decir, el tiempo en el que el fruto esté en óptima calidad y pueda ser recolectado.

Hay que tener en cuenta que hay frutos donde el margen temporal para su recolección en óptimas condiciones puede ser bastante amplio e incluso que exista la posibilidad de dejar más tiempo de maduración de manera que se pueda recolectar como otra modalidad para el consumidor final, por ejemplo, el pimiento se puede recolectar cuando está verde, con óptima calidad, o bien, si continua en la planta, en rojo también con óptima calidad.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Esto quiere decir que en estos modelos de cálculo de momentos óptimos de recolección no solo se han de contemplar parámetros fenológicos, de nutrición o de suelo, sino que también se pueden tener en cuenta criterios de planificación comercial.

Adicionalmente este modelo es susceptible también de ser incorporado las nuevas técnicas de análisis hiperespectral de imágenes, es decir, incorporar, como sistema de captura adicional de información, cámaras de alta resolución que permiten capturar imágenes en todo el espectro visible de la luz. Esto permite, por cada especie y variedad de cultivo, definir patrones en cada gama del espectro en relación a óptima calidad de fruto. Más adelante en este documento se desarrollará esta tecnología que, en la actualidad, está siendo objetivo de investigación e innovación continua.

En definitiva el esquema correspondiente a este tipo de modelos podría ser:

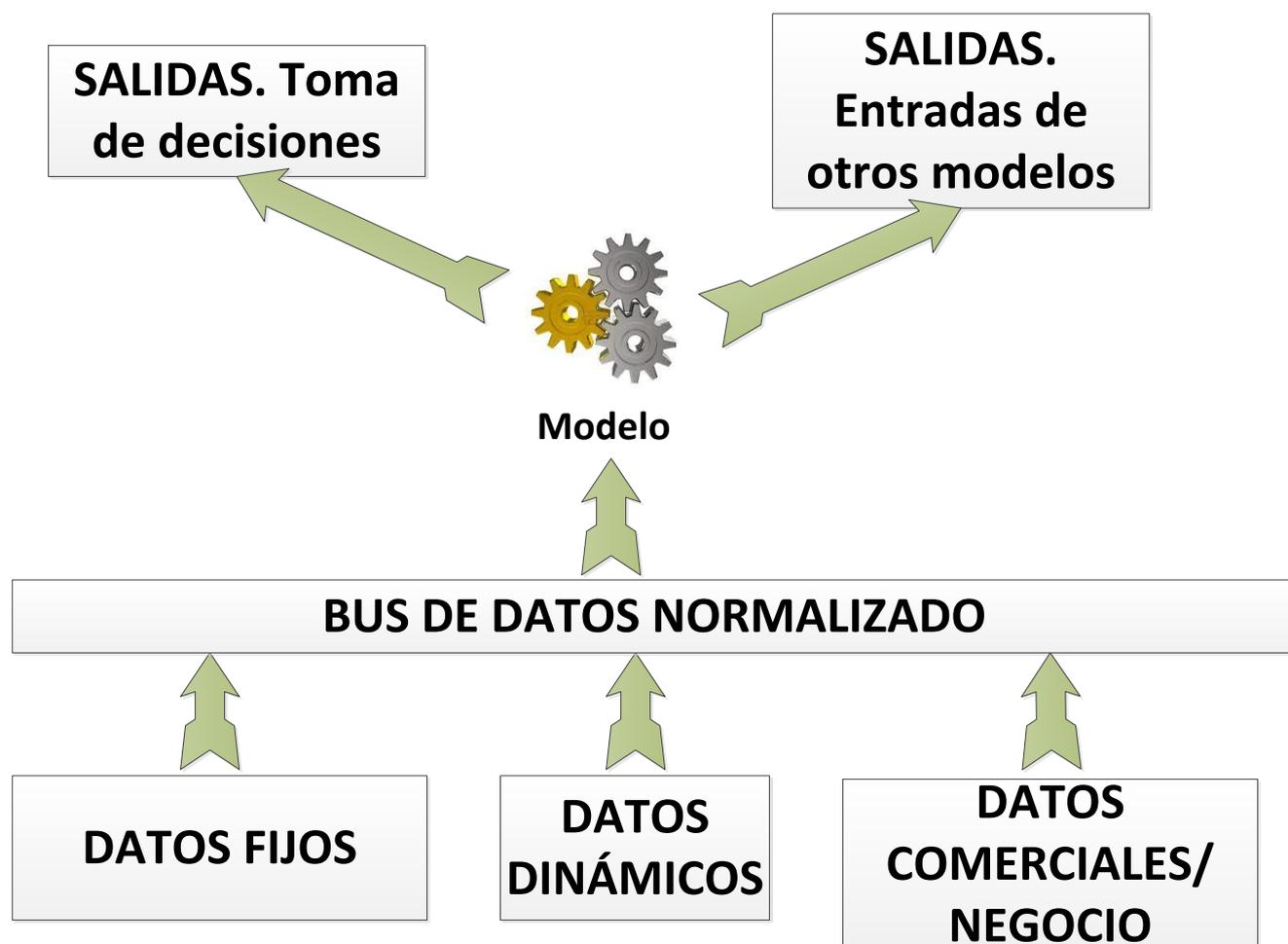


Figura 45 – Esquema modelo cálculo momentos de recolección.

En definitiva este tipo de modelos utilizan la información resultante de los modelos de estimación de producción y desarrollo de cultivo añadiendo otros parámetros como la calidad esperada, criterios comerciales y, en general, criterios de planificación de la comercialización donde también pueden estar sujetos a modelos de análisis de mercado empleando técnicas BIG DATA.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

En cultivos donde prima la calidad, como por ejemplo el sector de la vitivinicultura, o donde su comercialización puede estar influenciada por impactos externos al propio cultivo, como por ejemplo la sandía, donde su comercialización en Centroeuropa está muy influenciada por el clima que allí pueda hacer, este tipo de modelos permiten ir más allá de la estimación de su desarrollo según su propia biología, contemplando otros parámetros adicionales como las condiciones del mercado o la receptividad que el potencial consumidor final pueda tener.

En este tipo de modelos, informáticamente se mezclan los propios algoritmos de desarrollo y el análisis inteligente de información heterogénea según el paradigma de la tecnología BIG DATA, ofreciendo sistemas inteligentes de precisión para obtener el máximo rendimiento al fruto recolectado.

Modelos de estimación de producción. Cantidad y calidad

Este tipo de modelos tienen como objetivo principalmente dos aspectos:

- Predecir cantidad y calidad de producto recolectado: Estos algoritmos ya se han introducido anteriormente y tienen relación con la modelización del desarrollo de la planta y fruto, donde teniendo en cuenta los impactos fenológicos, los tipos de suelo, la nutrición y los factores fijos del cultivo, se puede estimar la cantidad y calidad de fruto que se puede recolectar por cada ciclo productivo de una determinada campaña.
- Predecir cantidad y calidad de producción, es decir, producto ya preparado para su comercialización una vez realizado el proceso de confección o manipulación necesario para su comercialización: En función de la estimación de cantidad y calidad de fruto recolectado, estos modelos permiten estimar la cantidad de producto a comercializar, es decir, cantidad de producto resultante una vez que haya pasado el proceso de confección, manipulación y/o transformación necesario. Cada tipo de cultivo tiene un determinado proceso de este tipo para hacer el producto comercial, por ejemplo, en el modelo de comercialización de tomate que se realiza en Almería, el producto, una vez que entra a la entidad de comercialización, pasa por un proceso de confección, es decir, un proceso de clasificación y calibración, un proceso de manipulación y un proceso de envasado, de manera que el producto final es un envase, con un número determinado de ramos de tomate y con una determinada clasificación y calibre. Otro ejemplo es el sector vitivinícola, donde el producto recolectado es uva, sin embargo, cuando el producto entra en el sistema de comercialización, pasa por un proceso de transformación en vino de una determinada calidad y posteriormente a un proceso de embotellado, donde el producto resultante es totalmente diferente al producto recolectado. En este tipo de modelos se combina no solo los parámetros propios del cultivo, sino que además se combinan parámetros relativos a capacidades industriales que pueden estar basadas en ratios estadísticos y/o rendimientos de la maquinaria que interviene en los procesos, con lo cual se combinan parámetros de fenología y cultivo, análisis estadístico de la información e integración informática con máquinas industriales (sistemas MES – Manufacturing Execution Systems).

En este aspecto se conjugan dos fases de la cadena de valor agroalimentaria, ya que no solo se trabaja en el ámbito de la explotación agrícola, sino que además se trabaja en el ámbito de la comercialización del producto, con lo cual hay que tener en cuenta como se configura esta estructura ya que hay múltiples modelos económicos para la explotación comercial de los productos, como por ejemplo:

- Modelos de comercialización tipo subastas / alhóndigas: En este modelo el productor posiciona su producto en un mercado donde los potenciales compradores pujan por él. Aunque suele ser un mercado donde el producto recolectado es igual al producto comercializado, se puede dar el caso donde se requiera cierta transformación por requerimiento de los clientes. En este caso el modelo de producción será similar al que a continuación se identifica.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Modelos de comercialización tipo cooperativas de productores o entidad de comercialización que centralizan la oferta al mercado. En este modelo, muy típico en la provincia de Almería, los productores llevan el producto recolectado a un almacén industrial donde pueden ser copropietarios (tipo cooperativa agrícola) o no. El producto pasa por una serie de fases de confección, es decir, dependiendo del tipo de producto puede tener fases de manipulación, transformación y/o envasado. Una vez el producto final es confeccionado pasa al proceso de venta. En este modelo, el producto recolectado no es igual al producto comercializado, con lo cual, para los modelos de producción, se han de tener en cuenta los parámetros de la entidad de comercialización que tienen que ver con modelos de proyección estadística, de planificación comercial y de procesos industriales.
- Modelos de comercialización donde el productor directamente vende su producto al mercado. Estos modelos son similares a los anteriormente identificados con la diferencia de que el proceso de recolección es relativo a un solo productor, con lo que los modelos de recolección atañen a una sola entidad, no a un conjunto de ellas. Estos modelos algorítmicos simplifican la capacidad de cálculo del sistema informático ya que solo hay una fuente de información en relación al modelo de recolección.

En general estos modelos algorítmicos reciben como entradas los resultados de otros modelos que ejecuta el sistema de información. A continuación se muestra un esquema a este respecto:

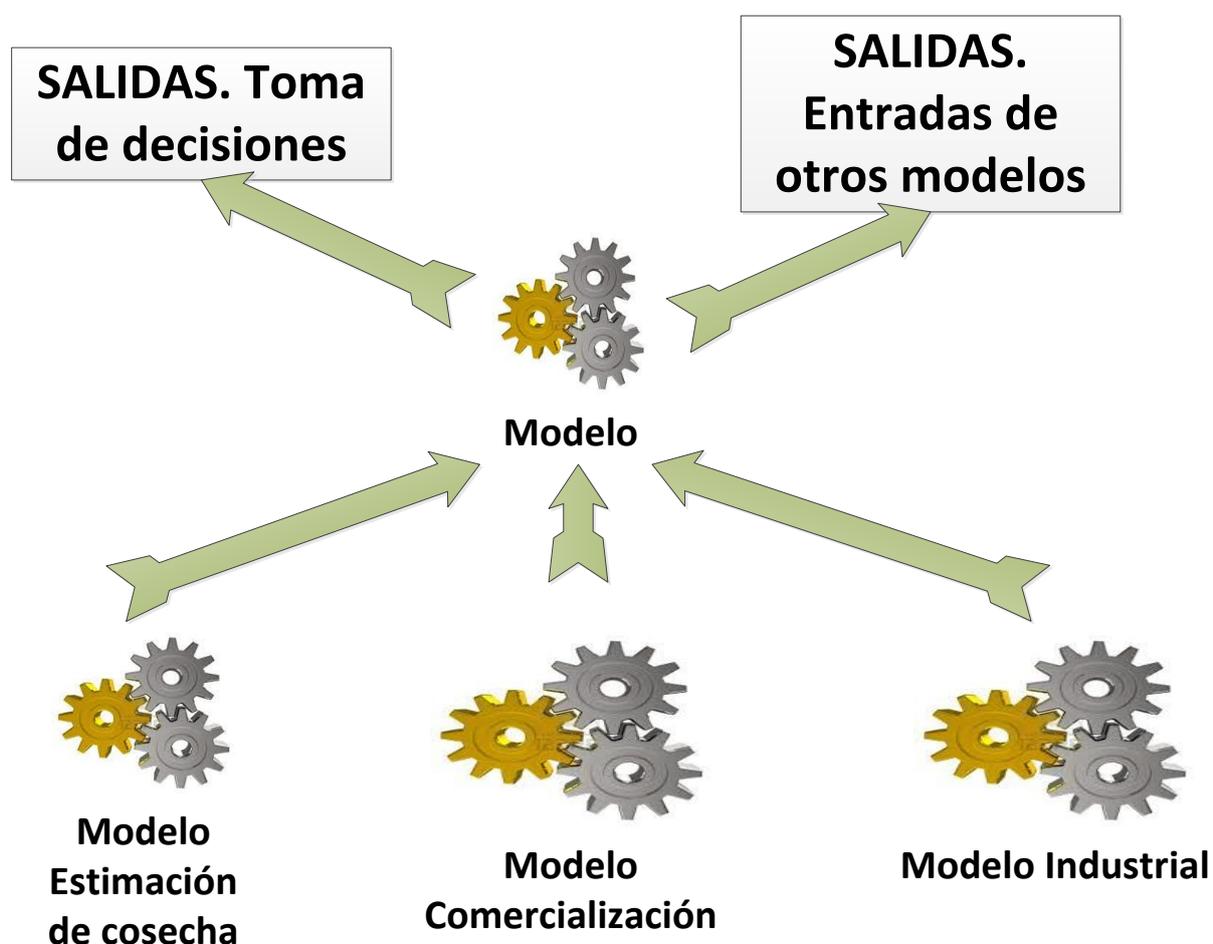


Figura 46 – Esquema modelo estimación de la producción.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

En el libro Tecnologías aplicables a agricultura de precisión [RB6] se identifican las diferentes técnicas que se pueden emplear para realizar modelos de producción empleando diferentes técnicas y herramientas informáticas. Inicialmente, en este libro, se identifican los potenciales problemas productivos que pueden ocurrir. Algunos ejemplos son:

- Problemas asociados a rendimiento. Algunos ejemplos de problemas de este tipo son:
 - o Variedades poco productivas
 - o Incorrecta aplicación de insumos
 - o Variabilidad espacial del suelo
 - o Mal raleo químico
 - o Daño por heladas primaverales
 - o Deficiente vigor de plantas
 - o Bajo calibre
 - o Variabilidad espacial del suelo.
- Calidad. Algunos ejemplos de problemas de este tipo son:
 - o Bajo contenido de proteína
 - o Humedad del grano, en el caso de cultivos de este tipo
 - o Variabilidad genética
 - o Dureza del grano, en el caso de cultivo de este tipo
 - o Bajo nivel de almidón en maíz, en el caso de cultivo de este tipo
 - o Peso hectolitro
 - o Bajo contenido de azúcar
 - o Color
 - o Firmeza
 - o Quemaduras por sol
- Conservación
 - o Pudrición
 - o Blanqueamiento
 - o Desgrane, en caso de cultivos de este tipo
 - o Deshidratación

En este libro [RB6] se establecen una serie de técnicas y herramientas orientadas a implementar los modelos anteriormente indicados con el objetivo de disponer de los indicadores adecuados que orienten hacia las operaciones de manejo de cultivo que permitan la minimización de estos problemas. Según este libro [RB6] estas técnicas y herramientas son:

- Sistemas de Información Geográfica (GIS): Para caracterizar las zonas de cultivo en cuanto a zonas óptimas de radiación, NDVI, etc.
- Monitor y mapas de rendimiento: Para monitorización zonificada de los indicadores de rendimiento de cultivo.
- Monitor de calidad: Para monitorización de los indicadores de calidad de los frutos.
- Evaluación de variabilidad de suelo: para zonificar y caracterizar el cultivo en función de los tipos de suelo.
- En general, técnicas para monitorización de indicadores agronómicos orientados a rendimiento, conservación y calidad.

Modelos de previsión de enfermedades

Estos modelos tienen como objetivo el pronosticar situaciones potencialmente peligrosas en los cultivos que puedan fomentar la aparición de enfermedades y/o darse las condiciones adecuadas para que se desarrolle una plaga.

Por ejemplo: se sabe que en el cultivo de tomate bajo invernadero, en determinadas condiciones de temperatura (entre 17°C y 23°C) y humedad relativa (alrededor del 95%), si la planta tiene alguna llaga, es muy probable que pueda sufrir una botrytis, con lo cual, en los

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

momentos de recolección de fruto donde en la planta se producen llagas, si se tienen estas condiciones, muy probablemente se sufra esta enfermedad haciendo que la planta sea improductiva en los siguientes ciclos de corte de fruto. Para evitarlo se sabe que hay que realizar: un manejo adecuado de la ventilación, eliminación de plantas y frutos afectados, un cuidado especial en la práctica cultural de la poda y deshojado, un abonado equilibrado y solarizar. En este ejemplo, un modelo simple donde se contemplan como parámetros de entrada la temperatura y la humedad relativa, si se realiza una estimación automática de estos parámetros, puede redundar en unas recomendaciones de manejo que minimicen la probabilidad de sufrir esta enfermedad.

Si se conocen los condicionantes fenológicos o de cualquier tipo que redundan en cualquier tipo de enfermedad, y estos condicionantes pueden ser estimados automáticamente por el sistema de información, se pueden construir un modelo tecnológico que estime esta condición y por lo tanto recomiende como minimizar su impacto.

En definitiva este tipo de modelos informáticos contemplan una serie de comprobaciones en umbrales de los parámetros de entrada, de manera que si se sobrepasan, bien por exceso, bien por defecto, se puede dar la casuística para que se produzca la enfermedad. En tal caso, el modelo será una secuencia de comprobaciones y una lista de recomendaciones para que los parámetros se mantengan en los umbrales adecuados.

En el libro Manual de Agricultura de Precisión [RB5], en su epígrafe 1.3 – Monitores de rendimiento y mapeo, se introducen técnicas para definir indicadores agronómicos que orienten sobre la potencialidad de que el cultivo pueda sufrir alguna enfermedad. Para la caracterización y zonificación de estos indicadores se propone el uso de una herramienta GIS como soporte a todo el sistema de información y como interfaz de fácil acceso al usuario, de manera que, de forma gráfica, en un mapa georreferenciado, se puede acceder a visualizar los valores de estos indicadores y sus umbrales. En cultivos extensivos de muchas hectáreas este tipo de herramientas aportan agilidad en la toma de decisiones, ya que de forma rápida se puede determinar las zonas potencialmente en peligro y actuar directamente sobre ellas, por ejemplo, a través del uso de maquinaria que pueda aplicar el correspondiente tratamiento en la zona, donde incluso esta maquinaria puede ser tele-controlada tal y como se identificará en el siguiente epígrafe.

Todos los modelos anteriormente identificados persiguen el poder establecer un conjunto de recomendaciones de manejo de cultivo para que las situaciones futuras sean las óptimas en cuanto al rendimiento del cultivo.

Adicionalmente permite simular situaciones futuras en base a diferentes consignas en los parámetros de entrada, con lo cual permite tener conocimiento sobre el manejo óptimo del cultivo. Esta capacidad de análisis permite establecer una adecuada planificación en cuanto a los procesos de siembra, la recolección y el potencial de comercialización de los productos recolectados. Por ejemplo: poder anticipar stock de producto permite al departamento comercial gestionar mejor las ventas y obtener precios más competitivos. Poder anticipar los procesos de siembra, permite planificar mejor las compras de semillas y por lo tanto tener mejores precios.

Existen diversas herramientas informáticas especializadas en el desarrollo de modelos algorítmicos, como puede ser Simulink de MATLAB, en la cual, utilizando herramientas gráficas, se permite definir los modelos como objetos independientes de proceso con sus propias entradas y salidas. Este tipo de herramientas suelen tener módulos adicionales software para que terceras aplicaciones puedan invocarlos enviándole los parámetros de entrada necesarios y recibiendo los resultados en otros parámetros de salida.

Otra opción es el desarrollo del modelo utilizando librerías matemáticas de uso avanzado, ya que este tipo de modelos matemáticos suelen ser secuencias de fórmulas avanzadas (integrales, derivadas, etc.).

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Los modelos han de ser integrables con el software de gestión integral de la explotación agrícola, ya que por sí solos no aportan todo su potencial. Todo su potencial viene determinado por el análisis conjunto de la información resultante del modelo con la información comercial y de manejo del cultivo. Este análisis es el que aporta un sistema de ayuda a la toma de decisiones que marcará la estrategia adecuada.

A continuación se muestra un esquema de objetivos que se persiguen con los modelos.

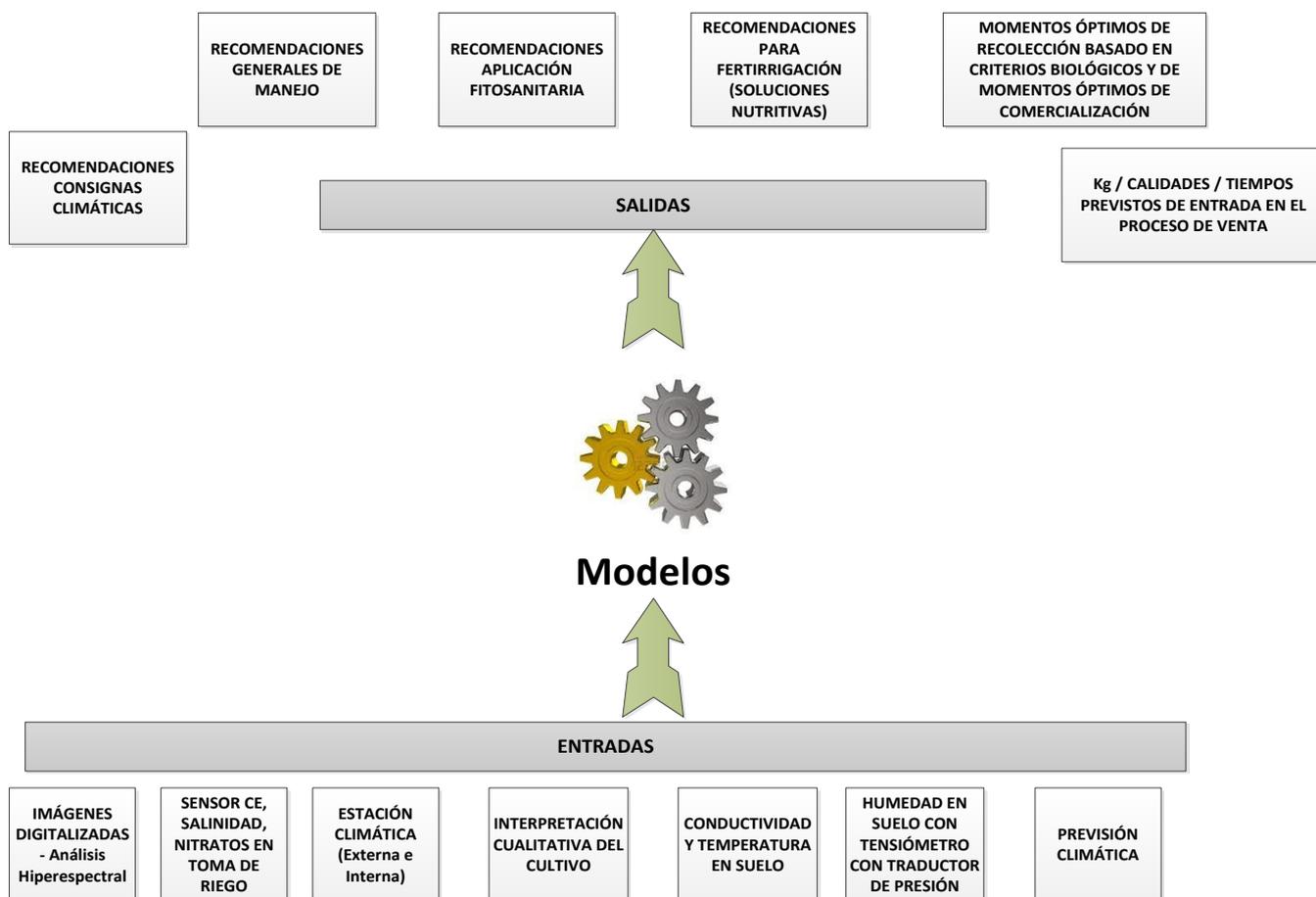


Figura 47 – Esquema de objetivos de los modelos agronómicos.

5.4. Integración con maquinaria agrícola y robotización de labores

Otros de los campos importantes a tener en cuenta en la SMART agriculture es todo lo relativo a la automatización de las labores agrícolas. En este campo, se puede distinguir dos áreas de innovación. Estas son:

Control automatizado de maquinaria agrícola

El uso de maquinaria agrícola en las fincas supuso una revolución tecnológica en el ámbito de las labores agrícolas, optimizando así los costes de cultivo debido a la importante reducción en el uso de recursos humanos y la agilización de la ejecución de la propia labor. Se puede decir que el siglo XX ha sido la época de la “mecanización” de los cultivos.

A principio del siglo XXI (época actual) se está viviendo un nuevo salto tecnológico en el ámbito de la mecanización de los cultivos, este es, la integración de sistemas TIC en la maquinaria agrícola para el control de procesos y monitorización de su funcionamiento.

Un ejemplo de control automatizado de maquinaria agrícola que ilustra la integración de sistemas TIC es todo lo relativo a los nuevos mecanismos OnBoard, es decir, instalados en los tractores que realizan diferentes labores en campo. Estos tractores disponen de una serie de sensores instalados en los sistemas mecánicos de los tractores y en los diferentes aperos (mecanismos para la labor agrícola) que incorporan. Estos sensores conforman una red integrada en un sistema central de control que es gestionado desde la cabina del conductor a través de pantallas táctiles. Adicionalmente estos sistemas incorporan sistemas de comunicaciones para que estos mecanismos puedan ser telegestionados, telemonitorizados y telecontrolados desde un sistema de gestión remoto.

En cuanto a sensores se pueden encontrar:

- Para monitorizar la motorización

En esta zona se pueden encontrar sensores de nivel de aceite, de combustible y, en general, de estado del motor. A través de estos sensores, tanto el conductor del tractor, como el administrador de la explotación agrícola, puede monitorizar el estado de la motorización del tractor para así ir evaluando en continuo su rendimiento. Adicionalmente, se pueden establecer alertas en base a umbrales por cada uno de los sensores, de manera que se pueda actuar por excepción y tomar decisiones en cuanto al rendimiento de la máquina.

- Para monitorizar el funcionamiento de los aperos que lleva instalados, es decir, los elementos empleados en las labores

En esta zona se pueden encontrar sensores según los elementos que lleve el tractor implantados. Por ejemplo, si lleva un dosificador de productos fitosanitarios, habrá sensores para medir el nivel actual de producto, la cantidad de producto que se está aplicando en cada momento, etc.

- Para gestionar y controlar las labores que el tractor realiza

El sistema OnBoard del tractor puede incluir un sistema de geoposicionamiento GPS que permite la localización en todo momento del tractor. Este sistema, combinado con los sistemas para monitorizar los elementos empleados en las labores (descritos anteriormente), permite telegestionar las labores que el tractor realiza incluso controlando remotamente los puntos geográficos donde el tractor ha de realizar su labor. Esto permite, aplicando por ejemplo técnicas de inteligencia artificial, definir caminos óptimos de llegada al punto para optimizar coste de combustible y tiempo de realización de la labor.

Esta información puede ser intercambiada en tiempo real entre el conductor del tractor y/o el administrador de la explotación agrícola. En relación a este intercambio de información entre el sistema TIC OnBoard del tractor y el sistema TIC central de gestión integral de la explotación agrícola, el protocolo de comunicaciones e intercambio de datos más estandarizado es ISOBUS. Las especificaciones técnicas de ISOBUS se pueden encontrar en el documento oficial de la International Organization for Standardization “ISO 11783-11” accesible desde la URL indicada en la bibliografía [RI15].

Robotización de las labores agrícolas

Relacionado con la telegestión, telecontrol y telemonitorización de maquinaria agrícola, están todas las tecnologías relacionadas con la robotización de labores agrícolas, es decir, sistemas automáticos con elementos mecánicos telecontrolados que realizan, o ayudan en la realización, de labores agrícolas. Estos elementos aportan la capacidad de optimizar los costes de las labores y fomentan la especialización de los operarios que trabajan en las explotaciones agrícolas.

En cuanto a robotización de labores, los ejemplos más significativos están en relación a las labores de recolección y aplicación fitosanitaria. A continuación se identifica cada uno de ellos por separado:

- Labores de recolección

En este ámbito existen varias experiencias sobre técnicas automatizadas de recolección de producto en función de la estructura de cultivo. Por ejemplo:

o En invernadero:

En este tipo de estructuras de cultivo la robotización se puede orientar en dos sentidos:

▪ Moviendo el cultivo al robot:

Fundamentalmente aplicado a cultivos hidropónicos. La propia naturaleza de esta estructura permite mover el cultivo ya que la plantación no se realiza en suelo, sino en unas bolsas que pueden estar ubicadas en carruseles móviles que acercan las plantas a las zonas de recolección

▪ Moviendo el robot hacia el cultivo:

La innovación importante de este sistema se encuentra en el sistema de guiado, ya que hay que ir moviendo el robot por los diferentes pasillos donde se ubican las plantas. En el artículo *Navigation Techniques for Mobile Robots in Greenhouses [RP4]* se identifican las técnicas estudiadas para poder realizar el movimiento de un ROBOT por un invernadero. En este artículo se introduce un ROBOT desarrollado por la Universidad de Almería, concretamente por el grupo TEP-197 de automática, electrónica y robótica, llamado Fitorobot donde se han aplicado estos estudios de guiado. Este ROBOT, destinado a labores de aplicación fitosanitaria en invernadero, ha sido desarrollado empleando los dos algoritmos más importantes de movilidad en robot adaptándolos a la casuística especial de invernaderos. A continuación se muestra un esquema de la algoritmia empleada:

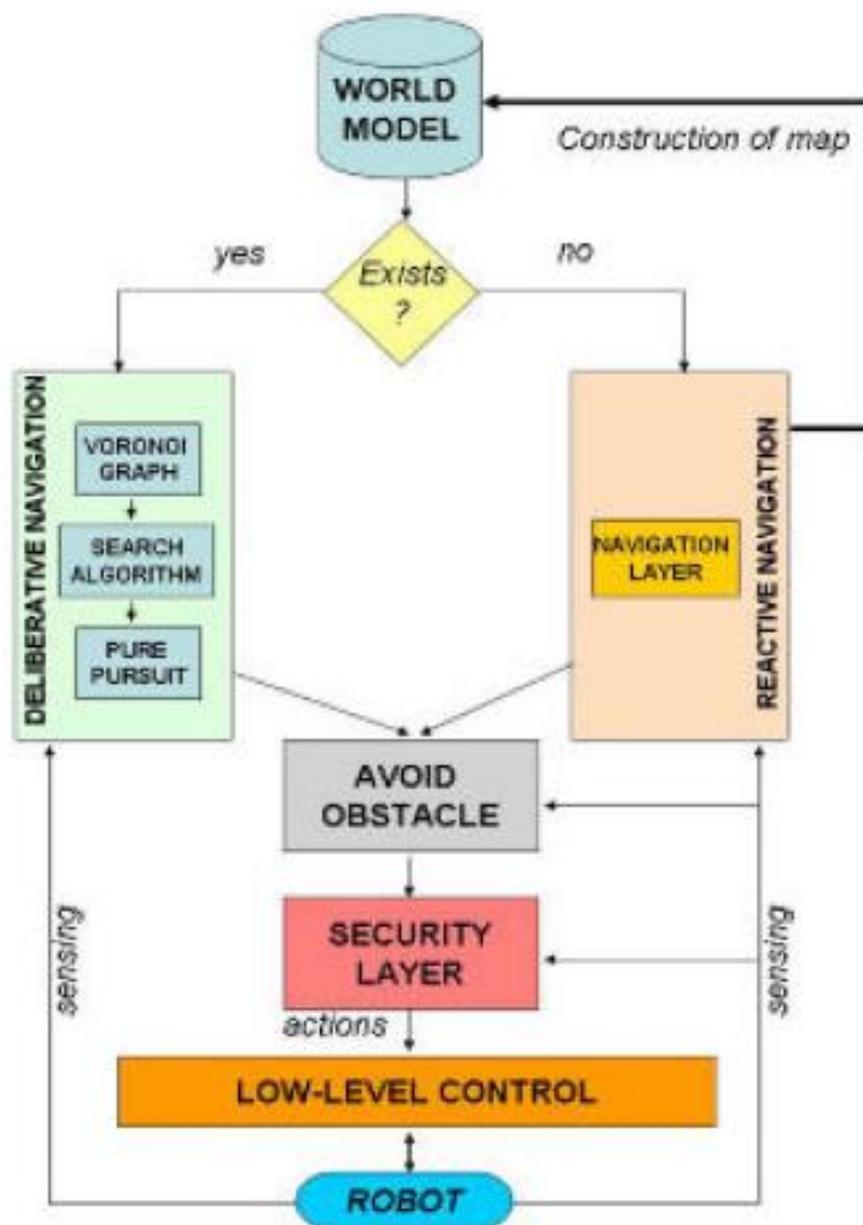


Figura 48 – Propuesta de la estrategia de navegación.

- En cultivos al aire libre:

En este tipo de estructuras de cultivo el mecanismo se han de ir moviendo por los diferentes caminos creados en las fincas agrícolas, de manera que, aplicando técnicas de inteligencia artificial, se pueden definir los caminos óptimos a cada zona donde previamente se ha decidido que se ha de realizar recolección.

En cualquier caso, el robot ha de incorporar otros sistemas innovadores que posibiliten la correcta recolección de los frutos. Estos son:

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Sistemas de visión artificial:

Estos sistemas se requieren para el reconocimiento automático de los frutos que están en el momento óptimo de recolección. El robot realiza un proceso de escaneo continuo de las plantas y va realizando, en tiempo real, un algoritmo de reconocimiento de los frutos que previamente se ha entrenado para cada especie y variedad. Este sistema informático integrado en el robot decidirá que frutos se han de recolectar. El algoritmo de reconocimiento puede estar basado por ejemplo en análisis hiperespectral de imágenes, es decir, el sistema de visión artificial va tomando imágenes digitales en continuo y analizando que es fruto, que es planta, que es suelo, etc., y dentro de las áreas definidas como fruto, cual está en momento óptimo de corte.

- Sistema de corte:

Estos sistemas pueden ser brazos robóticos que atrapan el fruto y lo cortan u otros sistemas como por ejemplo la inyección de agua a presión. Estos dependerán mucho de la estructura de cultivo en concreto.

- Aplicación fitosanitaria

En el ámbito de la aplicación fitosanitaria los sistemas robóticos están orientados a que el robot llegue en un tiempo óptimo a la zona donde ha de realizar la aplicación. En cuanto al sistema de guiado, al igual que en la parte de recolección, está muy condicionada por la estructura de cultivo.

En este tipo de labor es muy importante el geoposicionamiento del robot fundamentalmente en estructuras de cultivo extensivas y al aire libre, ya que en base a esta, el sistema informático central enviará las zonas donde ha de realizar la aplicación.

En estructuras de cultivo invernadas, en base al mapa y marco de plantación del invernadero, el administrador de la finca, a través del sistema informático central, podrá indicar la zona de aplicación de manera que esta se realice de forma automatizada. Una experiencia en este ámbito es el Fitorobot de la Universidad de Almería que se ha comentado anteriormente en este documento [RP4], donde utilizando algoritmos de guiado el ROBOT va navegando por los pasillos del invernadero y localizando las zonas donde ha de realizar la aplicación fitosanitaria.

Para cualquier tipo de robot, el sistema estará compuesto por uno o varios sistemas robóticos que realizarán la función físicamente y un sistema informático que gestiona, controla y monitoriza las labores que los sistemas robóticos están realizando.

Existen varios protocolos estandarizados para la conexión de sistemas informáticos con sistemas robóticos. Algunos ejemplos son:

- OPC

OLE for Process Control es un sistema distribuido de objetos entre los diferentes sistemas robóticos cuyo objetivo es realizar un control de procesos, es decir, cada sistema robótico llevaría instalado un sistema software a efectos de Servidor OPC. Este servidor OPC ofrece un conjunto de objetos que actúan como fuente de datos de manera que cualquier aplicación software basada en OPC puede acceder a dicho servidor a leer y escribir cualquier variables que cada servidor ofrezca. Prácticamente todos los mayores fabricantes de sistemas de control, instrumentación y sistemas robóticos incluyen servicios OPC en sus productos.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

A través de este protocolo, utilizando una programación orientada a objetivos, los sistemas informáticos pueden acceder de forma remota a los sistemas robóticos para leer variables de estado, datos de proceso y, en general, cualquier dato a gestionar. Adicionalmente pueden escribir datos para control de procesos y órdenes de realización de cualquier acción.

- CANopen

Es un protocolo de comunicaciones de alto nivel basado en el bus CAN (ISO 11898), es decir, basado en el estándar de comunicación CAN que normaliza la comunicación entre automatismos y sistemas informáticos, se ha desarrollado este protocolo para la comunicación entre sistemas informáticos y sistemas robóticos de manera que especifica los diferentes servicios y objetos de comunicación y los modos disponibles de mensajería. Soporta transmisión síncrona y asíncrona de mensajes.

5.5. Análisis BIG DATA

Las empresas que trabajan en el sector agroalimentario manejan grandes cantidades de datos y de muy diversa naturaleza. Adicionalmente trabajan con productos cuyo desarrollo, producción y venta está muy impactado por condiciones externas a la propia organización ya que depende mucho de las necesidades de los consumidores, de su predisposición a consumirlos y de los diferentes mercados que pueden llegar a especular con uno o varios productos en detrimento de otros.

Según lo anterior especificado, un buen análisis de toda la información disponible (de cultivo, de producto, de mercado, etc.), tanto procedente de fuentes internas, como procedente de fuentes externas, una vez centralizada y homogeneizada, permitirá establecer sistemas de explotación de datos a través de cuadros de mandos para la ayuda a la toma de decisiones estratégicas que permitirán manejar, no solo el cultivo, sino las estrategias comerciales a seguir para que el rendimiento sea el máximo.

Existen multitud de herramientas informáticas que permiten establecer explotación dinámica de los datos, de manera que, una vez establecidas las fuentes de datos, te permite: presentarla en tablas de datos; en gráficos comparativos de indicadores; establecer múltiples niveles jerárquicos de manera que se pueda hacer Drill Down (ir profundizando en los niveles definidos); definir múltiples dimensiones en los indicadores de manera que se pueda hacer técnicas de análisis de información OLAP (On Line Analytical Processing) definiendo escenarios de análisis, e incluso hacer proyecciones no lineales de datos históricos a futuro, de manera que se puedan definir escenarios predictivos de situaciones futuras en base a la definición de parámetros actuales y de datos históricos. Algunas de estas herramientas son:

- Qlikview

Es una herramienta para hacer cuadros de mando de BI (Business Intelligence – Inteligencia de Negocio) [R116]. Esta herramienta permite la explotación de datos a través de múltiples fuentes de datos y de diferentes formatos (XML, CSV, DB, SQL, etc.) de manera que se puedan relacionar entre ellos y establecer cuadros de mandos a través de la definición de indicadores que se pueden presentar a través de gráficas, tablas de datos, etc. Todos ellos en múltiples niveles y dimensiones de análisis.



Figura 49 – Imagen de Qlikview extraída de su página WEB.

- Power BI

Herramienta de Microsoft [RI17] para el análisis de cuadro de mandos a través de diferentes fuentes de información. También orientada a la inteligencia de Negocio, permite comparar información heterogénea y establecer sistemas de ayuda a la toma de decisiones.

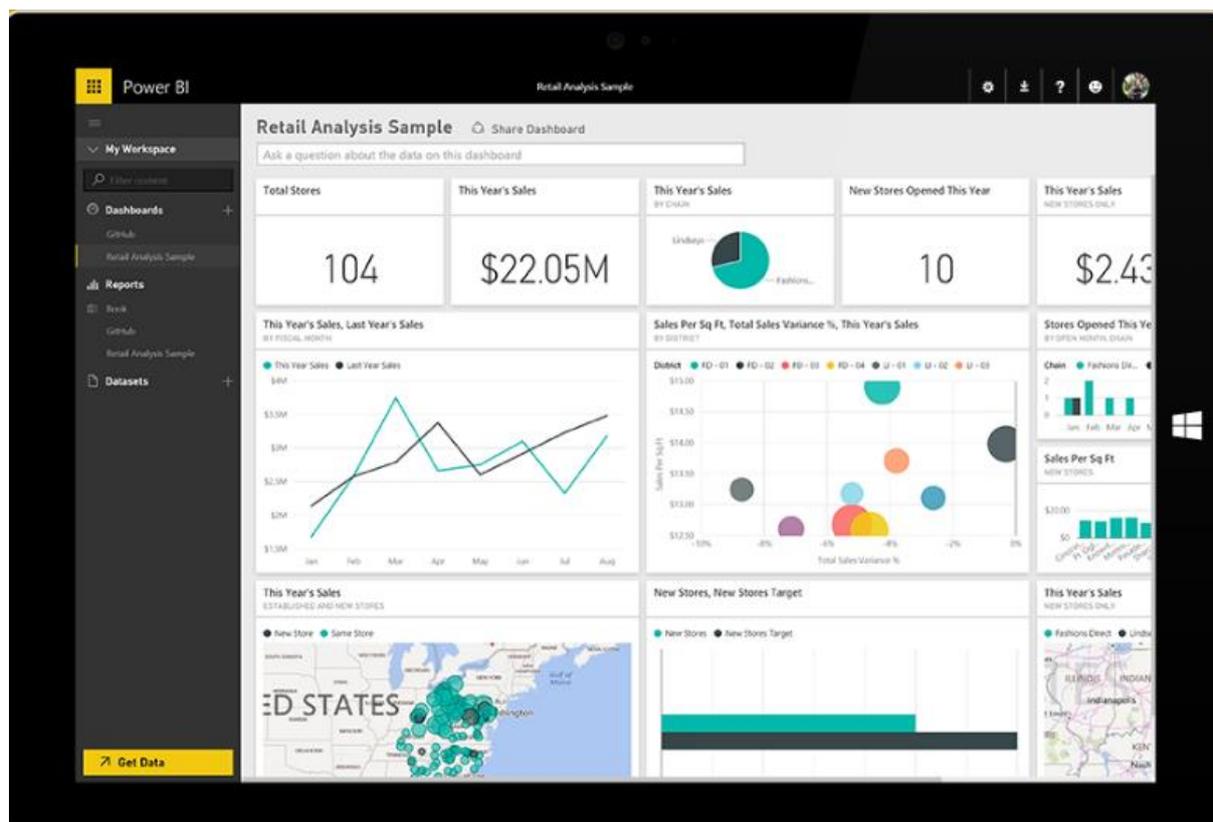


Figura 50 – Imagen de Power BI extraída de su página WEB.

Algunos ejemplos de análisis BIG DATA en el sector agroalimentario pueden ser:

- Cuadro de mandos para establecer potenciales ventas según necesidades de consumidores basadas en climatología

Se sabe que en ciertos mercados, fundamentalmente los centroeuropeos, las condiciones climáticas impactan significativamente en el potencial consumo de ciertos productos, como por ejemplo la sandía que se consume más en esos mercados cuando el clima es más cálido.

Con lo cual, si se dispone como fuentes de datos: previsión climática en el mercado de destino y previsiones de recolección de fruto (según los modelos predictivos de producción anteriormente identificados), un cuadro de mandos puede ayudar en la planificación comercial para establecer los indicadores adecuados para vender el producto en las épocas donde las condiciones climáticas sean las adecuadas.

- Cuadro de mandos para la compra de semillas y su impacto en los costes de cultivo en función de las ventas globales de productos agroalimentarios que se han producido en anteriores campañas.

Se puede tener conocimiento de las ventas globales de productos agroalimentarios en cada uno de los principales mercados. Una fuente de este tipo de datos puede ser FEPEX, MAGRAMA o las diferentes asociaciones sectoriales como puede ser COEXPHAL.

Esto implica que se puede hacer un análisis de las potenciales ventas de determinados productos agroalimentarios combinando con los potenciales costes de semilla, al objetivo de:

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

1.- Poder establecer escenarios predictivos de coste en función del producto y la compra de semillas.

2.- Realizar un análisis de costes para su optimización en relación a la compra de semillas.

Estos dos ejemplos ilustran como se pueden combinar varias fuentes de datos heterogéneas para realizar un análisis para la toma de decisiones.

Los pasos a seguir para establecer un buen sistema de análisis de datos a través de técnicas BIG DATA son:

1.- Definir los objetivos que se persiguen en el análisis de datos. Esto permitirá seleccionar de forma adecuada las fuentes de información que participan en el análisis.

2.- Establecer las fuentes de datos internas en la organización y los formatos en los que se encuentran (XML, CSV, Bases de datos, etc.).

3.- Establecer las fuentes de datos externas a la organización y analizar los formatos en los que se encuentran y las tecnologías por las que se puede acceder (XML, CSV, WEB Services, etc.).

4.- Realizar el proceso de consolidación, estructuración y homogeneización de datos. Para ello se establecen DATA LAKES (Lagos de datos), que son espacios donde se consolidan los datos y se establecen las relaciones entre ellos.

5.- Una vez los datos están en una zona estructurada, utilizando herramientas de análisis BIG DATA como las que se han indicado anteriormente, se pueden establecer las consultas, los niveles jerárquicos, los indicadores, etc, para establecer el análisis definido en el paso 1.

5.6. Certificaciones medioambientales

Las certificaciones medioambientales garantizan que las explotaciones agrícolas realizan una gestión sostenible con el medioambiente, estas certificaciones llamadas Huellas identifican numéricamente la cantidad de recursos de un determinado tipo que se están empleando en la gestión de la explotación agrícola.

Las certificaciones medioambientales más importantes son:

- Huellas hídricas

Identifican la cantidad del recurso de agua que se emplea en la actividad productiva y comercializadora de la organización, bien en un producto en concreto, bien en general para todos los productos.

- Huellas de carbono

Identifican la cantidad del recurso de carbono, como por ejemplo CO₂, que se emplea en la actividad productiva y comercializadora de la organización, bien en un producto en concreto, bien en general para todos los productos.

En general ambas identifican la cantidad del recurso que se emplea en la gestión de la explotación agrícola en dos ámbitos:

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Huella de producto

Identifica, para cada producto agroalimentario con el que se trabaje en la explotación agrícola, la cantidad del recurso que se ha empleado en su plantación, desarrollo, producción y comercialización. Esto implica que en cada fase se ha de contemplar estos datos, es decir, en cada registro de actividad en la explotación y en la entidad de comercialización se ha de indicar la cantidad del recurso empleado. Por ejemplo: cuando se realiza la plantación, cuando en el desarrollo todas las operaciones de fertirriego, en las operaciones de limpieza, en las operaciones de recolección, en las operaciones de manipulación, transformación y envasado y en las operaciones logísticas.

- Huella de organización

Identifica, en general para toda la organización, la cantidad del recurso que se utiliza en su actividad productiva y comercializadora para todos los productos en los que trabaje. Esto significa que en todos los procesos productivos y de comercialización han de registrar la cantidad del recurso que se está empleando.

Utilizando aplicaciones informáticas de gestión integral de la explotación agrícola, todo este uso de recursos se puede ir registrando conforme se vayan realizando las operaciones, de manera que en tiempo real y en cualquier momento, se pueda realizar una consulta de recursos (tipo y cantidad) que se están empleando y, por lo tanto, obtener la huella en dicho recurso.

CAPÍTULO 6. INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN QUE SE ESTÁ LLEVANDO A CABO EN EL CAMPO DE LAS TECNOLOGÍAS APLICADAS A LA SMART AGRICULTURE

6. Investigación, desarrollo e innovación que se está llevando a cabo en el campo de las tecnologías aplicadas a la SMART Agriculture

La tecnificación del sector agroalimentario es un proceso que lleva ocurriendo desde hace ya bastante tiempo, pero en particular, en lo que se refiere a los procesos en campo, la tecnificación se está llevando a cabo de forma relativamente reciente, debido a la sensibilidad del sector en hacer las explotaciones agrícolas más rentables y sostenibles. Por ejemplo, en la revista Almería en verde editada por Coexphal, en su número 140 de marzo de 2016 [RP2] se puede localizar un artículo identificado como “La Agroinnovación marca el futuro de la horticultura en Almería”. En él se habla de cómo el sector almeriense está dando pasos de gigante con proyectos de desarrollo de una agricultura inteligente (SMART Agriculture).

A continuación se identifican ejemplos de I+D+i que se está llevando a cabo en el sector. Para ello se exploran las iniciativas identificadas en los libros [RB2] y [RB3]. A continuación se identifican por cada uno de ellos:

- [RB2]. 10th European Conference on Precision Agriculture. Se identifican 10 ejemplos de los aquí mostrados.

Toma en remoto de imágenes térmicas para evaluación de condiciones hídricas en vitivinicultura para necesidades de riego.

Modelo de movimiento de la mosca del olivo a través de datos satélite.

Gestión de la precisión en la aplicación de nutrientes con el objetivo de optimizar el rendimiento de cultivo en maíz.

Graduación de dosis de fertilizante en fertirriego en relación a la biomasa del cultivo para cultivo de patata.

Evaluación de la intensidad de floración en manzana usando procesamiento digital de imágenes.

Uso de técnicas de reflectancia a través de teledetección para optimizar la gestión de entradas del cultivo y reducir las potenciales causas de plagas.

Plataformas multisensor para caracterización detallada de las plantas a lo largo de toda la campaña productiva.

Medida de diámetro de tallo en maíz para estimar rendimiento

Desarrollo y simulación de un controlador robótico basado en lógica borrosa para movimiento guiado por parcela.

Sistema de ayuda a la toma de decisiones para gestión de riego en cultivo de manzana.

- [RB3]: II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola. “Automatización y TICs en agricultura”. Se identifican 10 ejemplos de los aquí mostrados.

Gestión de energía fotovoltaica para el riego del tomate basado en lógica borrosa.

Supervisión remota de parámetros medioambientales capturados por un vehículo aéreo no tripulado.

Control predictivo para satisfacer la demanda de agua en un invernadero mediante un sistema de desalación solar.

Sistema de visión de bajo coste para clasificación de productos hortícolas.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Desarrollo de un sistema de fenotipado para el estudio cinético de crecimiento en sistemas biológicos.

Utilización de imágenes térmicas de alta resolución para estimar la variabilidad del estado hídrico de un viñedo.

Precisión de los métodos de cálculo del coeficiente de cultivo a partir de datos de fracción de cobertura vegetal y altura del cultivo.

Programación de riego deficitario controlado en cerezo mediante redes de sensores de suelo y planta.

Supervisión y sistema de alerta por medio de fotografías digitales de un cultivo hortícola.

Balance hídrico en lechuga a partir de imágenes de cobertura vegetal

- Proyectos de los que tengo conocimiento que se están desarrollando.

Sistemas de control remoto de producción hortícola bajo invernadero e integración con sistemas de comercialización.

Sistema de gestión avanzada de agua y energía para el riego agrícola.

Modelización del cultivo de tomate bajo invernadero para simulación predictiva de producción.

Sistema de asesoramiento virtual de riego en cultivos leñosos.

Sistema de ayuda a la toma de decisiones de riego en olivar para optimización de la producción y calidad.

Simulación predictiva de los momentos óptimos de recolección en cultivos de pepino y pimiento bajo invernadero.

Sistemas de recolección robotizada en cultivo de tomate bajo invernadero.

Telecontrol, telegestión y telemonitorización de cultivos a través de tecnologías IoT (INTERNET of Things).

CAPÍTULO 7. SISTEMAS INTELIGENTES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

- 1.- Tecnologías de captura de datos**
- 2.- Modelos para la ayuda a la toma de decisiones estratégicas en el manejo de cultivos**
- 3.- Modelos predictivos**
- 4.- Sistemas expertos**
- 5.- Integración con maquinaria agrícola**

7. Sistemas inteligentes en agricultura de precisión

En este epígrafe se identificarán sistemas y tecnologías que, empleando técnicas de inteligencia artificial, permiten realizar una gestión agronómica eficiente aplicando criterios de optimización de recursos y procesos basado en el autoaprendizaje y autocalibración comparando con experiencias exitosas y datos reales.

7.1. Tecnologías de captura de datos

Todos los algoritmos de inteligencia artificial aplicada a la SMART Agriculture requieren de un sistema de entrada de datos adecuado. Este aporta a los diferentes algoritmos la base inicial de datos para el cálculo, es decir, la base de entrenamiento del modelo para que se pueda calibrar y adaptar a las condiciones reales de cultivo (tipos de suelo, zonas, estructuras de cultivo, marcos de plantación, etc.).

Tal y como se ha identificado anteriormente en este documento, las entradas de datos se pueden dividir entre factores fijos del cultivo en la campaña productiva y factores dinámicos, es decir, los datos que van cambiando a lo largo de su desarrollo, tanto vegetativo como productivo.

Los factores fijos en los modelos que utilizan inteligencia artificial suelen participar en las fases iniciales de ejecución del modelo. Posteriormente conforme se va entrenando y auto-calibrando, los factores determinantes son los factores dinámicos. Es decir, inicialmente se han de tener en cuenta los factores fijos, como por ejemplo: estructura de cultivo, tipo de suelo, especie, variedad, marco de plantación, etc. Posteriormente conforme se vaya entrenando en modelo, los factores determinantes son los dinámicos que fundamentalmente suelen contemplarse aquellos relacionados con fenología y nutrición, es decir, temperatura, humedad, radiación, dendrometría, conductividad eléctrica, etc.

Las tecnologías más significativas para captura de datos en campo, que ya se han ido exponiendo a lo largo de este documento, son:

- Plataformas WSN
- Digital PEN
- Toma de imágenes en continuo para análisis hiperespectral
- SMART Phones y/o Tablets.

7.2. Modelos para la ayuda en la toma de decisiones estratégicas en el manejo de cultivos

En los modelos que soportan los sistemas de ayuda a la toma de decisiones en el manejo de cultivos se pueden aplicar técnicas de inteligencia artificial en el ámbito del autoaprendizaje basado en experiencias óptimas de rendimiento, es decir, cualquier tipo de modelo de los que ya se han identificado anteriormente en este documento, conforme se va ejecutando a lo largo de diferentes campañas productivas consecutivas, se puede ir registrando los parámetros de salida y determinar si estos han sido óptimos o no, generando una historia de buenas prácticas que orientan sobre el correcto manejo de cultivo para obtener una producción y calidad óptima. De forma paralela, a lo largo de su ejecución en las diferentes campañas productivas consecutivas, se pueden aplicar técnicas de autoaprendizaje basado en buenas experiencias registradas, de manera que, aplicando algoritmos basados en redes neuronales o probabilísticas, se pueden ir auto-calibrando el algoritmo de manera que cada campaña ofrezca resultados más precisos. Esta fase de entrenamiento será continua a lo largo de todas las campañas, de manera que, conforme haya más información histórica precisa, mejor y más preciso será el modelo en futuras campañas productivas.

A continuación se muestra un gráfico de ejemplo de una red neuronal.

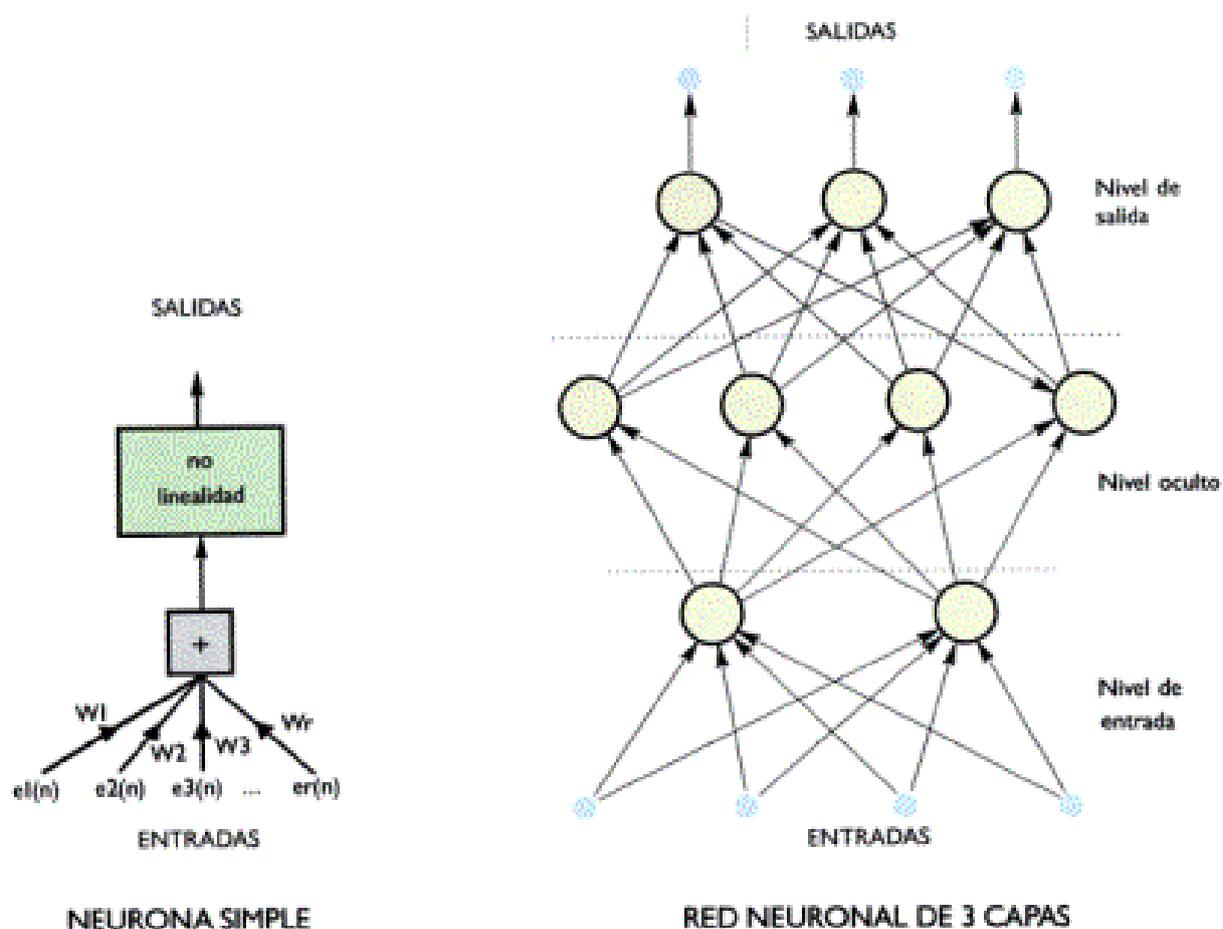


Figura 51 – Ejemplo de redes neuronales simples y múltiples capas.

Una neurona simple tiene múltiples entradas y genera una sola salida. La composición de múltiples neuronas simples crea una red neuronal de múltiples capas, de manera que las salidas de neuronas simples son entradas de otras neuronas simples que a su vez generan otras salidas (y así sucesivamente).

Esta red de entradas y salidas de datos que alimentan otras entradas es la que permite a los sistemas el autoaprendizaje.

7.3. Modelos predictivos

En relación a los modelos predictivos, que también han sido introducidos y definidos anteriormente en este documento, también se pueden aplicar técnicas de inteligencia artificial en relación a la mejora continua de la precisión en la predicción. En este caso, la técnica se basa en la comparación de la predicción realizada con la medición de los datos reales en la fecha prevista.

El modelo realizará un proceso de autoaprendizaje basado en técnicas de inteligencia artificial calibrando el dato previsto con el dato real medido, de manera que conforme vaya pasando el tiempo, la precisión de la predicción será mucho mayor.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Un ejemplo de modelo de predicción al que se puede aplicar técnicas de inteligencia artificial para realizar el entrenamiento adecuado con el objetivo de mejorar la precisión en la predicción es el de impactos fenológicos:

Tal y como se ha identificado anteriormente en este documento, la fenología es la ciencia que estudia los impactos del clima en el crecimiento de los cultivos. Esto implica que si los sistemas de información implementan algoritmos de predicción climática, se puede predecir el comportamiento de las plantas en cuanto a desarrollo vegetativo y productivo se refiere. Si además, aplicando técnicas de inteligencia artificial, se puede hacer que los sistemas mejoren la precisión de la predicción, la predicción del desarrollo de las plantas será mucho mejor y por lo tanto mejorará la calidad de los datos que se pretenden obtener en el cuadro de mandos para la ayuda a la toma de decisiones según escenarios futuros.

7.4. Sistemas expertos

Los sistemas expertos son sistemas informáticos que son llamados así debido a que emulan el razonamiento de un experto en una materia en concreto. Con los sistemas expertos se busca una mejor calidad y rapidez en las respuestas, dando así lugar a una mejora de la productividad del propio experto al usar el sistema informático. Los sistemas expertos se pueden entender como una rama de la inteligencia artificial, donde el poder de resolución de un problema en un sistema informático viene del conocimiento previo de una temática específica. En particular, los sistemas expertos en agricultura de precisión emulan el razonamiento de un ingeniero agrónomo que tiene un gran conocimiento sobre los cultivos específicos en los que trabaja.

Particularizando esta tecnología informática a la agricultura de precisión, la aplicación es capaz de solucionar problemas que exigen gran conocimiento agronómico del cultivo sobre el que se está aplicando.

Los sistemas expertos requieren una base de conocimiento previamente registrada y que servirá de entrenamiento al sistema de información. Esta base de conocimiento puede ser:

- Declarativa: hechos sobre situaciones, es decir, cuál sería el comportamiento de la planta ante una determinada situación. Por ejemplo, si la temperatura supera los 30°C, la humedad relativa supera el 50% y la planta tiene una herida, esta planta tendrá una botrytis.
- De control: información sobre el seguimiento de una acción, es decir, ver que va ocurriendo conforme se va realizando una determinada actividad. Por ejemplo, en las actividades periódicas de fertirriego del cultivo, se van registrando los datos de dendrometría del tallo de las plantas que hay en la zona de muestreo. Estos datos actuarán como información de control en todo el proceso de razonamiento informático.

Una vez identificada la base de conocimiento y de hechos, el otro componente del sistema experto es el motor de inferencia, es decir, el algoritmo que modela el proceso de razonamiento del experto (ingeniero agrónomo) y que genera las salidas de información en base a las entradas, es decir, la base de conocimiento y hechos.

A continuación se identifica un esquema de un sistema experto estándar:

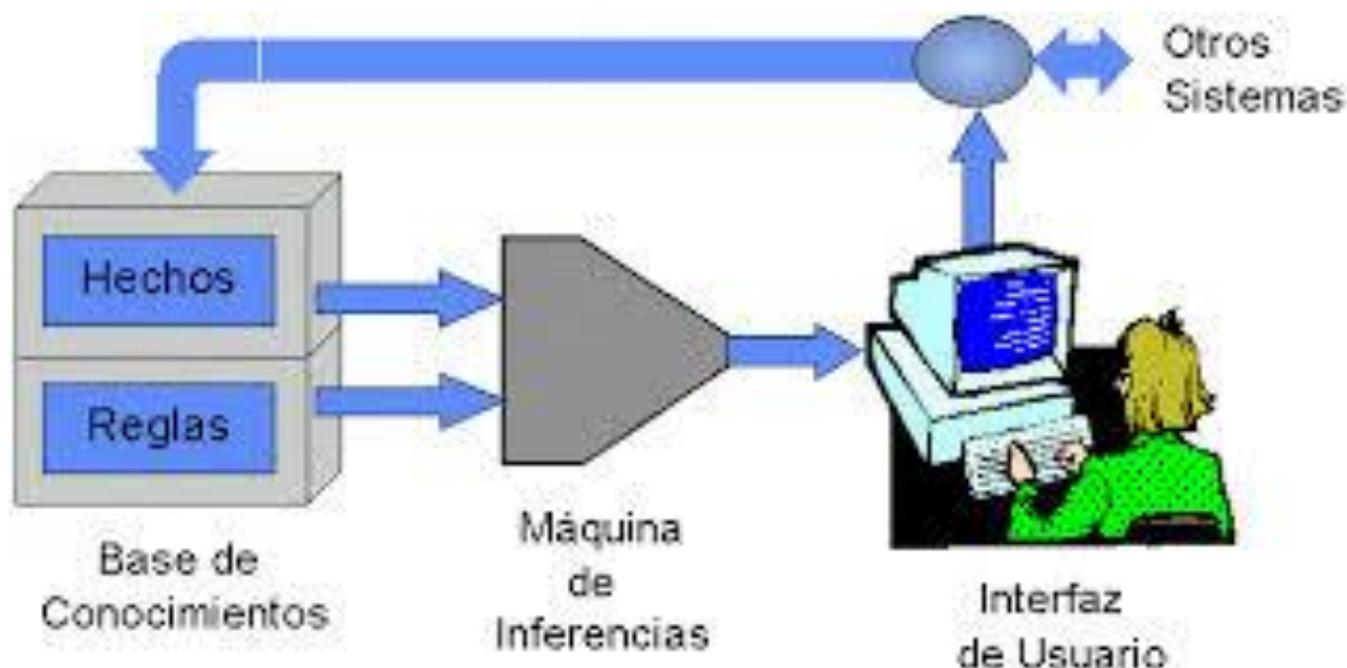


Figura 52 – Esquema de un sistema experto.

Tal y como se identifica en el esquema, la máquina de inferencias (motor de inferencias) recibe como entrada la base de conocimientos, es decir, los hechos (información declarativa) y las reglas (información de control) y genera las salidas para que el usuario pueda tomar las decisiones adecuadas. Adicionalmente estas salidas alimentarán a la base de conocimientos con el objetivo de que el sistema experto cada vez tenga más conocimiento conforme vaya operando. Esta retroalimentación hará que el sistema sea más inteligente conforme más se vaya usando.

Un sistema experto bien entrenado ofrecerá una herramienta de ayuda a la toma de decisiones al ingeniero agrónomo que le permitirá tener modeladas las respuestas ante problemas que se pueda encontrar en sus cultivos.

7.5. Integración con maquinaria agrícola

En apartados anteriores de este documento se han identificado las tecnologías para la integración con maquinaria agrícola, donde se puede tele-controlar las actividades que ella realiza. En particular, las técnicas de inteligencia artificial se pueden aplicar al sistema de guiado de la maquinaria agrícola, donde el sistema inteligente puede recomendar caminos óptimos (de menor coste) a lo largo de la explotación agrícola para optimizar recursos e insumos que utilice la máquina.

Por ejemplo, una finca agrícola en extensivo de un número determinado de Has, que tiene varias zonas de cultivo y por las cuales un tractor ha de ir aplicando dosis de cualquier producto.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

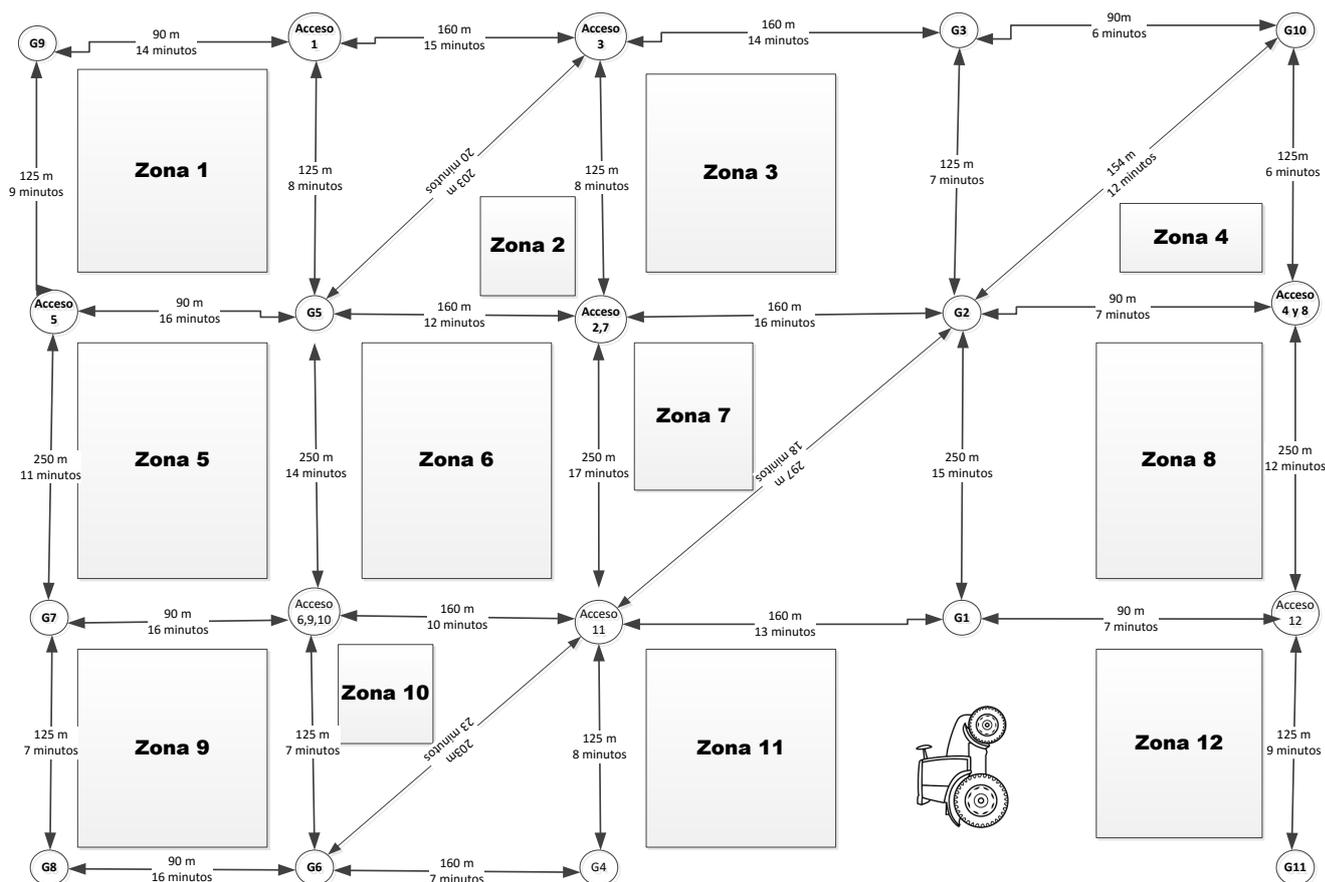


Figura 53 – Finca agrícola donde el tractor ha de ser guiado.

Las características de este ejemplo que ilustra un sistema inteligente aplicado al guiado automático de un tractor (o cualquier otra maquinaria agrícola) son:

- A cada zona se accede mediante los puntos marcados con un círculo que identifica el acceso a la zona, por ejemplo “Acceso 1” identifica el acceso a la “Zona 1”.
- El punto de partida del tractor es donde se encuentra su imagen (entrada a la finca).
- Cada círculo identifica los puntos donde el tractor puede girar o dar la vuelta (G1, G2, etc.).
- Cada flecha identifica el camino entre dos puntos (círculos). En ella se identifica la distancia en metros y el tiempo en minutos que se emplea en ese camino (entre punto y punto).

El sistema inteligente de guiado del tractor ha de resolver la forma más adecuada de cumplir las siguientes acciones:

- Buscar el camino óptimo entre el punto de partida del tractor (entrada a la finca) y una determinada Zona, por ejemplo la Zona 1. Se entiende camino óptimo como el camino a seguir que tenga menos distancia que recorrer y se emplee menos tiempo.
- El tractor, que lleva un depósito de herbicida de 50 litros, ha de ir aplicando una determinada cantidad en cada zona. En el camino a la zona 1 ha de ir aplicando el herbicida en las máximas zonas hasta gastar el depósito. Estas cantidades son:

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Aplicación	10	13	6	7	15	8	18	15	12	9	14	7

En definitiva el algoritmo debe buscar la mejor opción para llegar a la Zona N, gastando el menos combustible posible (recorriendo la menor distancia), empleando el menos tiempo posible y haciendo las aplicaciones de herbicida en las máximas zonas posibles.

Para la resolución de este problema a través de inteligencia artificial se han de aplicar algoritmos de búsqueda, como por ejemplo: búsqueda a ciegas, búsqueda en amplitud, búsqueda de coste uniforme, búsqueda en profundidad.

Las estrategias de búsqueda, sea cual sea el algoritmo a aplicar, contemplan:

- Espacio de estados del problema

Se refiere a los estados que el problema puede tener, es decir, las diferentes posibilidades que el tractor va teniendo conforme va avanzando a lo largo de la finca.

- Árboles de decisión.

Grafos de tipo árbol que conectan todos los estados definidos en el espacio de estados del problema. Cada camino entre los nodos (estados) tendrá un coste, de manera que el algoritmo lo pueda evaluar para tomar la decisión adecuada.

La estrategia adecuada será la que recorra el árbol, hasta la solución buscada, a menor coste.

CAPÍTULO 8. INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN MODELOS INTELIGENTES QUE SE PUEDEN APLICAR EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

- 1.- Análisis hiperespectral de imágenes de cultivo**
- 2.- Toma de datos automática en campo para auto-calibración y entrenamiento de modelos. Sistema de enseñanza continúa.**
- 3.- Toma de decisiones autónoma del sistema inteligente e interacción automatizada con sistemas de actuación en tiempo real**
- 4.- Modelos de análisis y toma de decisiones. Observación / predicción de situaciones deseables en el cultivo. Simulación de escenarios**

8. Investigación, desarrollo e innovación en modelos inteligentes que se pueden aplicar en agricultura de precisión

La investigación e innovación en relación a la aplicación de técnicas de inteligencia artificial a agricultura de precisión está en auge y es un valor muy importante a tener en cuenta para las futuras soluciones tecnológicas aplicadas a la SMART Agriculture, ya que los sistemas informáticos que implementan este tipo de sistemas inteligentes tienen la capacidad de auto-aprender a través del entrenamiento que surge tras el registro informático de las experiencias que van ocurriendo en el cultivo, proceso que agiliza el entrenamiento del sistema ya que minimiza la intervención humana en él.

Algunos ejemplos de iniciativas de este tipo son:

8.1. Análisis hiperespectral de imágenes de cultivo

El análisis hiperespectral de imágenes consiste en procesar y recopilar la información resultante de este proceso a lo largo de todo el espectro de la luz, es decir, el sistema divide las imágenes en muchas bandas que incluso puede extenderse más allá del espectro visible. Esta técnica aplicada a los cultivos permite que, a través de la toma continua de imágenes y su correspondiente análisis, se pueda diferenciar entre lo que es suelo, planta, masa foliar y fruto con lo cual se puede caracterizar:

- Suelo: En función del análisis de las diferentes bandas en el espectro de la zona que identifica el suelo, se puede caracterizar tipos de suelo, radiación incidente, temperatura, humedad, etc. Esta información, una vez correctamente caracterizada, aporta datos de entrada relevantes a los diferentes modelos de decisión (fundamentalmente en el ámbito del riego).
- Planta: En función del análisis de las diferentes bandas en el espectro de la zona que identifica la planta, se puede caracterizar el vigor y el grosor de los tallos. Esta información, una vez correctamente caracterizada, aporta datos relevantes en relación a la nutrición de las plantas, información muy a tener en cuenta en los modelos que orientan sobre el fertirriego en cuanto a las dosis de nutrientes que se han de aplicar.
- Masa foliar: En función del análisis de las diferentes bandas en el espectro de la zona que identifica las hojas, se puede obtener el LAI (Leaf Area Index – Índice de Área Foliar). Este indicador es uno de los parámetros fundamentales para el cálculo del potencial productivo, de los modelos de desarrollo del cultivo y de los modelos predictivos de producción.
- Fruto: En función del análisis de las diferentes bandas en el espectro de la zona que identifica los frutos, en función de la especie y variedad de cultivo, se puede determinar el momento óptimo de recolección en función a su estado de madurez. Adicionalmente estos datos pueden participar en los cálculos de previsión de recolección, ya que en función de su estado de maduración y conocimiento de cómo se desarrolla esa especie y variedad, se puede calcular informáticamente cuando estará en el momento adecuado para ser recolectado.

La toma de imágenes en cultivo se ha de hacer con dispositivos de toma automática de imágenes de alta resolución, ya que estas imágenes han de tener la resolución adecuada para poder realizar el análisis correspondiente. Se pueden realizar a través de cámaras fijas conectadas al sistema de información o bien a través de dispositivos móviles que puedan obtener este tipo de imágenes y posteriormente aportarlas al sistema de información.

La arquitectura típica de este tipo de soluciones está compuesta por: cámaras fijas instaladas en el cultivo que tienen la capacidad de establecer comunicación, bien a través de INTERNET, bien a través de red de área local, con el sistema de información que soporta el software que

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

almacena y analiza las imágenes tomadas; cámaras móviles que llevan los responsables del cultivo y/o los ingenieros agrónomos que asesoran a la explotación agrícola, y que tienen la posibilidad de conectar con el sistema de información anteriormente indicado; y el sistema de información, bien instalado en cloud computing, bien instalado los sistemas corporativos de la organización, que realiza todo el almacenamiento y computación necesaria en el análisis hiperespectral. A continuación se muestra un esquema representativo de este tipo de arquitecturas:

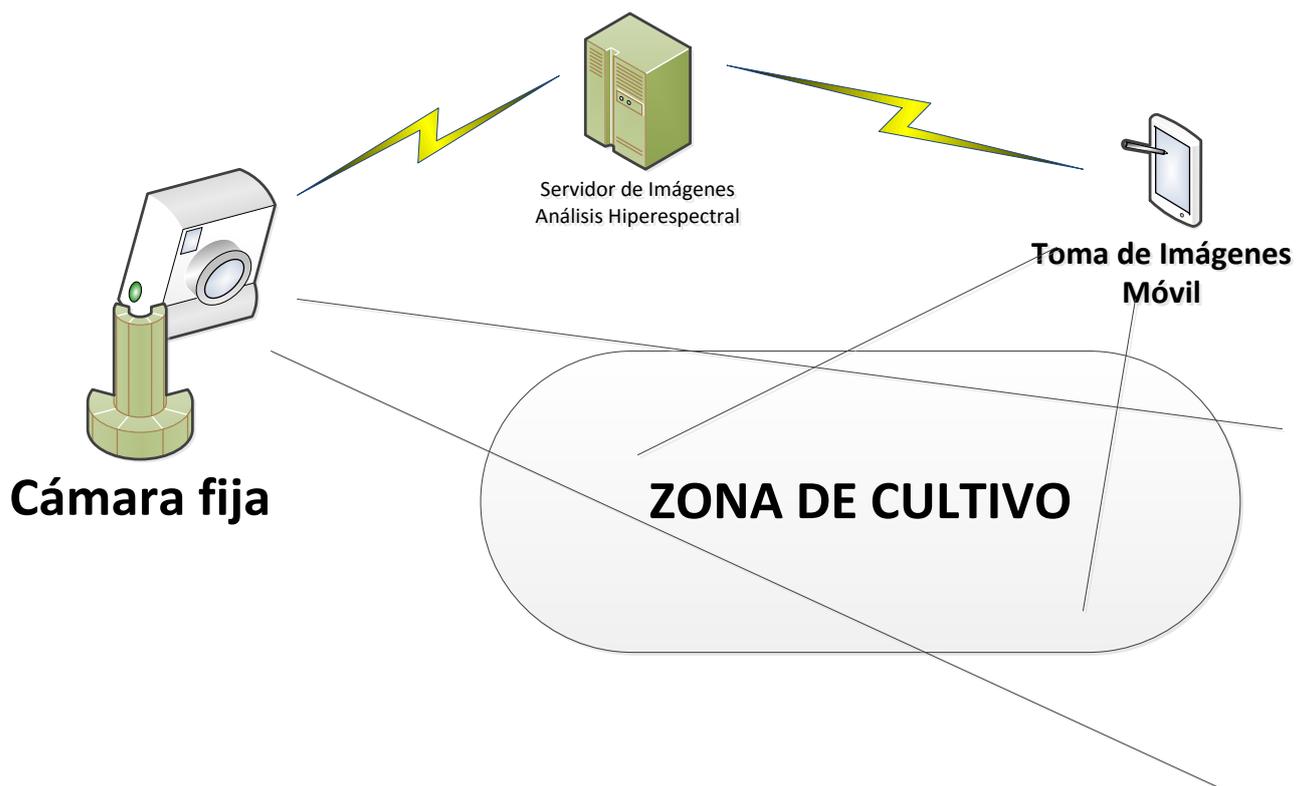


Figura 54 – Esquema representativo de un sistema de toma de imágenes de cultivo.

En el blog “agointeligencia” [R118] en el artículo correspondiente a: “Tecnología Hiperespectral, hacia una agricultura más precisa” se identifican las aportaciones que este tipo de tecnología puede dar a la agricultura de precisión. En él se ofrece la siguiente información:

- Inicialmente se identifica una breve historia del reconocimiento de imágenes aplicado a agricultura, donde en el siglo XIX se comienzan a montar cámaras en los primeros aviones y globos aerostáticos, inicialmente para uso bélico, aunque posteriormente se vio su potencial en el sector agrícola.
- Posteriormente se diferencia entre tecnología multispectral e hiperespectral. La principal diferencia radica en que la tecnología multispectral tan solo trabaja en el espectro visible de la luz, sin embargo la tecnología hiperespectral trabaja en todo el espectro (el visible y el no visible). A continuación se muestran dos gráficos que ilustran las diferencias entre ambas tecnologías.

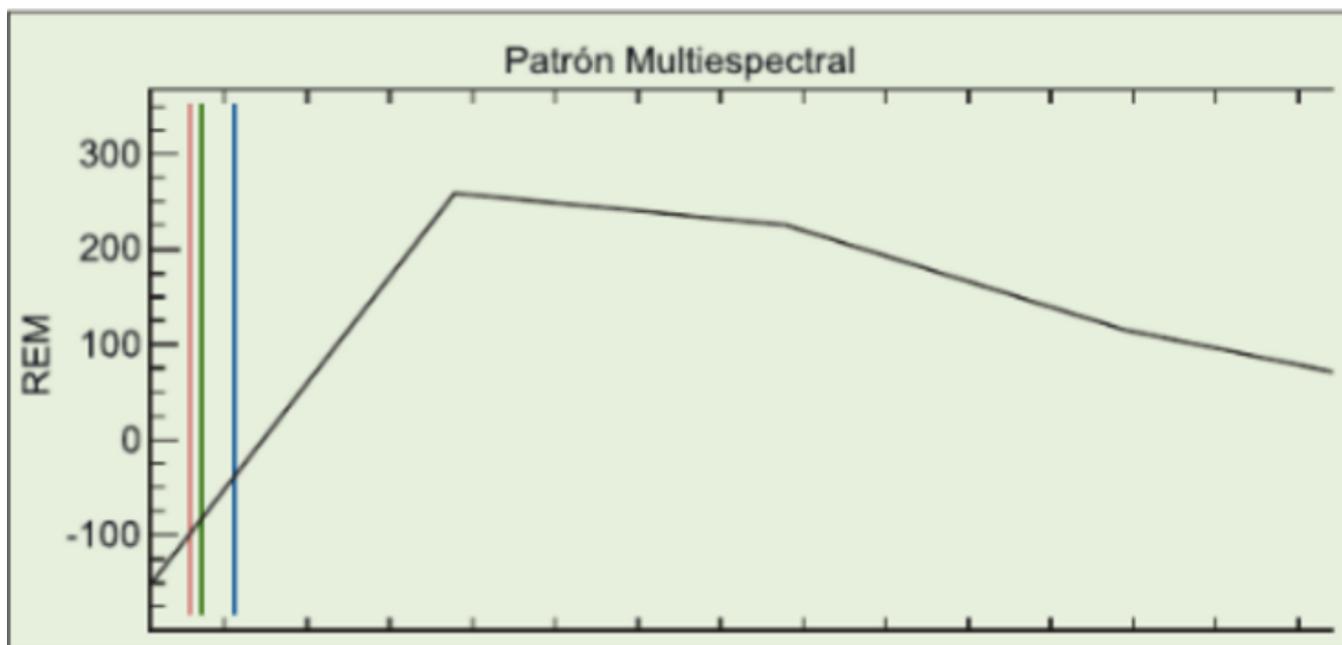


Figura 55 – Patrón multiespectral.

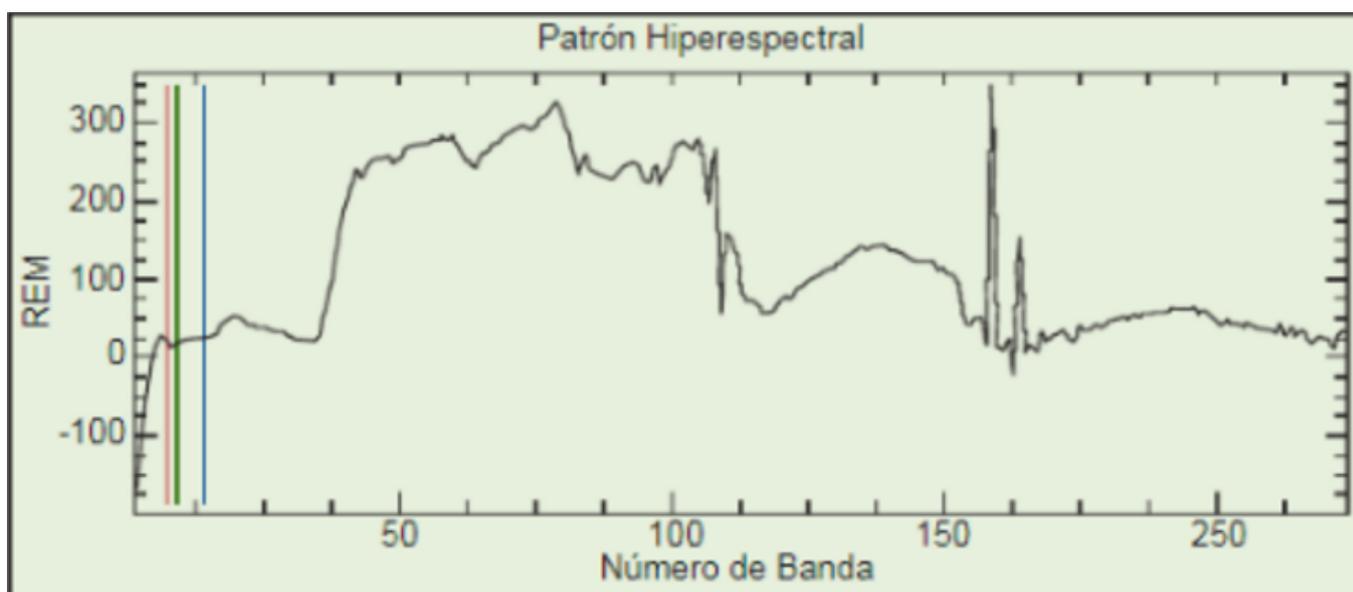


Figura 56 – Patrón hiperespectral

- Por último se desarrolla las aportaciones que la tecnología hiperespectral ofrece en el ámbito de la agricultura de precisión, ya que esta tecnología es capaz de profundizar entre las capas contiguas siendo el nivel de detalle muy alto. En el artículo se identifica un ejemplo de utilidad en el ámbito de la detección de posibles plagas en relación a la detección temprana de virus como el de la "tristeza de los cítricos", ya que esta plaga hace que las hojas del frutal segreguen una sustancia que solo es visible a muy corta distancia, con lo cual requiere que el agricultor inspeccione exhaustivamente y a pie

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

de árbol cada frutal, sin embargo, con esta tecnología, el sistema de información puede alertar de este hecho una vez que haya sido entrenado a través del registro de la imagen que provoca esta sustancia en la hoja. Otro ejemplo es el estudio de la salinidad en las hojas de lechuga realizado por los investigadores de la UPM (Universidad Politécnica de Madrid), donde se ve la aplicación de esta tecnología en toda su potencia.

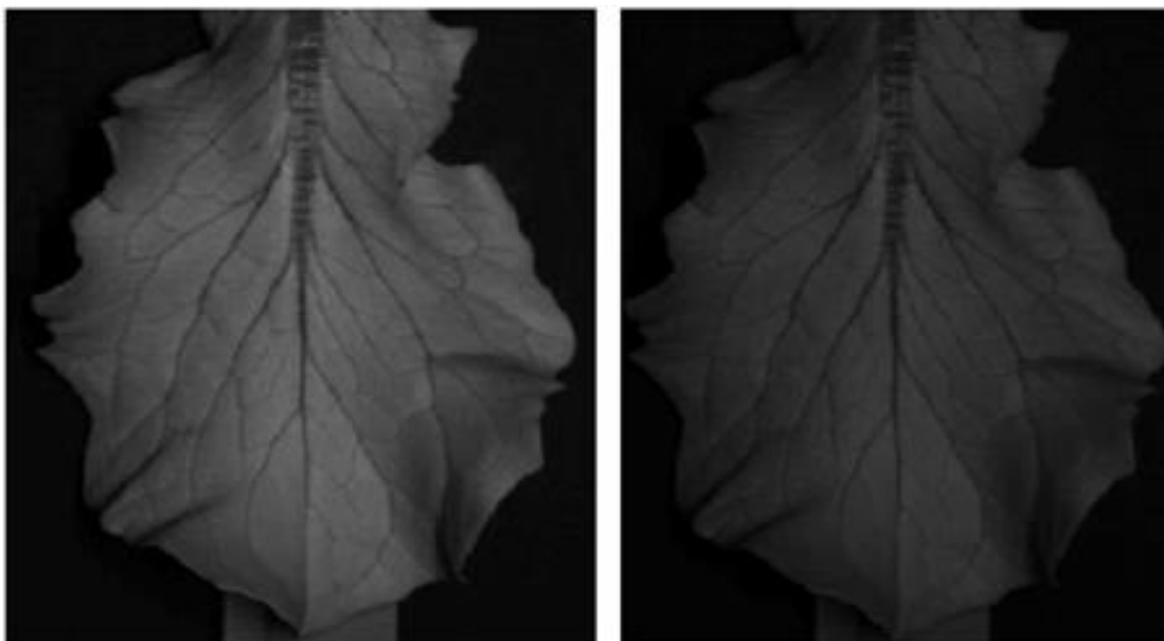


Figura 57 – Imagen tomada de hoja de lechuga para análisis hiperespectral.

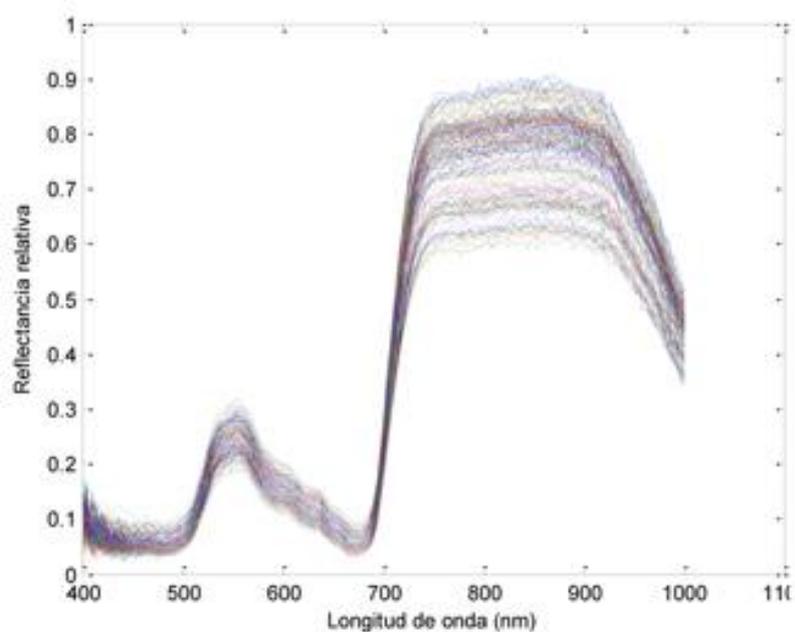


Figura 58 – Gráfica de análisis resultante.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

La tecnología Hiperespectral facilita una profundidad en la calidad de los datos que integrada con soluciones tecnológicas como la gestión de datos obtenidos en campo, aplicaciones instaladas en dispositivos móviles (SMART Phones y Tablets) con herramientas para técnicos agrícolas o software de apoyo a la toma de decisiones aporta una inteligencia a la gestión agroalimentaria nunca antes disponible.

8.2. Toma de datos automática en campo para auto-calibración y entrenamiento de modelos. Sistemas de enseñanza continúa.

Otro de los ámbitos donde se está trabajando en investigación e innovación aplicando técnicas de inteligencia artificial es en lo relacionado a la automatización del entrenamiento de los sistemas de información para que la intervención humana sea mínima o nula. Es decir, las labores habituales que los responsables y operarios han de hacer en las fincas hacen que sus esfuerzos se tengan que centrar en ellas, dejando poco tiempo a labores de toma de datos para alimentar los modelos y sistemas de ayuda a la toma de decisiones. Es por esto que es fundamental implantar sistemas cuyo mecanismo de alimentación de datos y entrenamiento requiera nula intervención humana. En este ámbito, los sistemas que aplican inteligencia artificial pueden aportar gran valor ya que están pensados para que la toma de datos se pueda automatizar y permita retroalimentar a los sistemas de manera que se establezca un sistema de aprendizaje y entrenamiento continuo y automatizado.

Algunos sistemas de captura automatizada de datos son: las sondas y sensores de las plataformas WSN y las cámaras de alta resolución para captura de imágenes y análisis hiperespectral. Un ejemplo de este tipo de sistemas puede ser el entrenamiento, a través de técnicas de inteligencia artificial, de un modelo de cálculo del momento óptimo de recolección de un determinado fruto, por ejemplo el pimiento. A continuación se explica cómo se desarrollaría el modelo, donde a lo largo de su entrenamiento y auto-aprendizaje apenas requiere intervención humana.

- 1.- Una vez el algoritmo desarrollado e implantado en el software de gestión integral de la explotación agrícola, queda preparado para que pueda ser entrenado y calibrado con las condiciones reales del cultivo.
- 2.- En los puntos de muestreo determinados en la finca, donde se va a realizar la monitorización del cultivo, se realiza la instalación de las sondas y sensores que conforman la plataforma WSN y que realizan la captura de datos de planta / clima / suelo. Adicionalmente, en estos puntos de muestreo, se instalan las cámaras que tomarán en continuo las imágenes que posteriormente el algoritmo analizará a través de técnicas de análisis hiperespectral.
- 3.- Una vez montado el hardware en los puntos de muestreo y el sistema de información dispuesto para recibir los datos de forma automática y a procesarlos, el algoritmo comenzará su autoaprendizaje y entrenamiento siguiendo las siguientes pautas.
- 4.- El entrenamiento se realiza a través de la retroalimentación, es decir, los datos de salida del algoritmo también participan como entradas, de manera que se va comparando la información estimada por el algoritmo con la real que se va produciendo. A través de técnicas de inteligencia artificial (redes neuronales por ejemplo) el sistema se irá auto-calibrando y auto-entrenando a través de estas comparaciones de datos.
- 5.- Adicionalmente el sistema registrará todos los datos de fenología, de desarrollo de cultivo y de producción, de manera que servirán para que el sistema continúe su aprendizaje en futuras campañas.

6.- El entrenamiento será continuo a lo largo de las futuras campañas, de manera que la precisión del algoritmo para esa zona de cultivo cada vez será mayor, ya que el entrenamiento y calibrado será cada vez mayor.

A continuación se muestra un esquema de cuál sería la secuencia de fases.

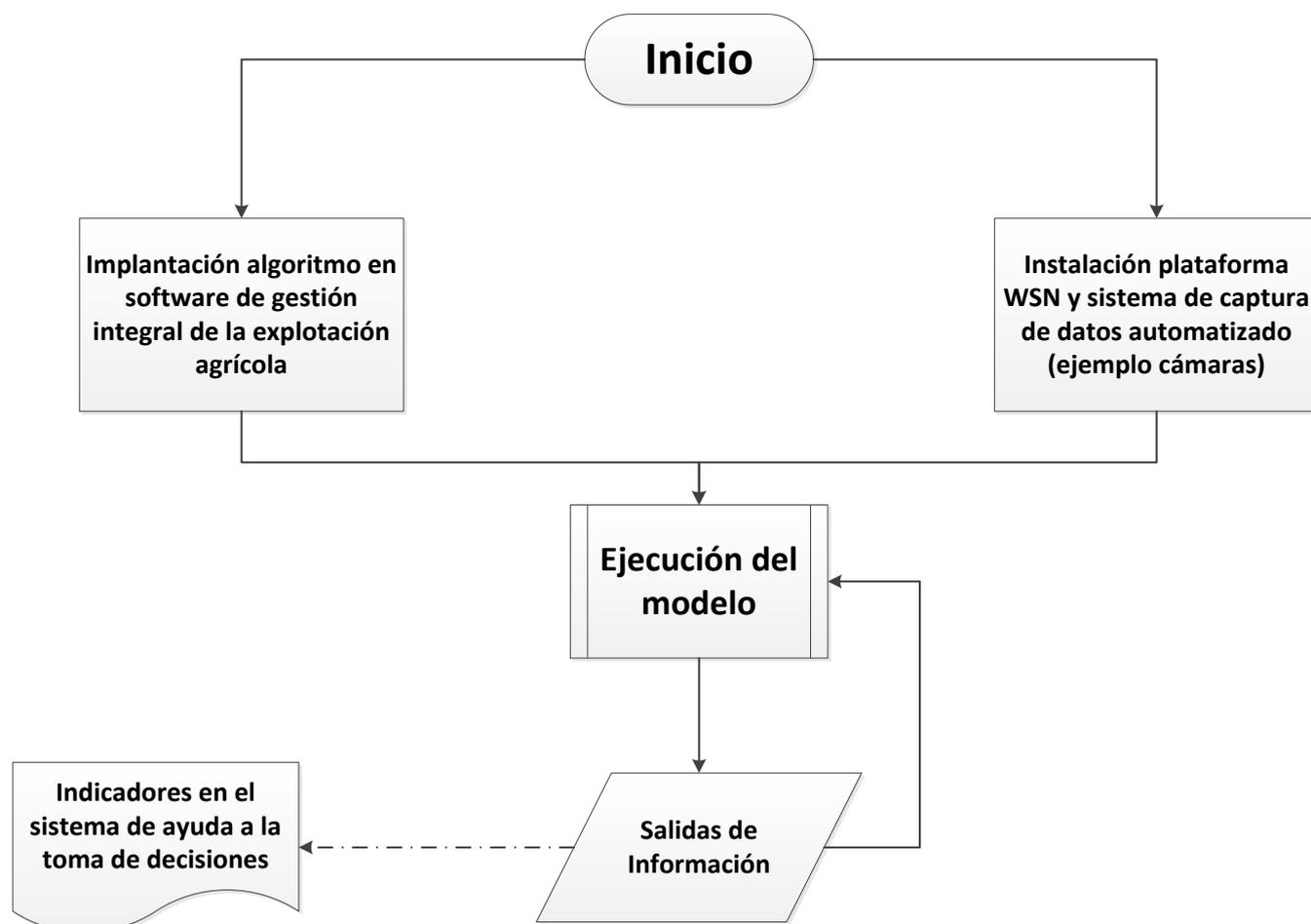


Figura 59 – Flujograma de proceso de un algoritmo que aplica inteligencia artificial.

Tal y como se identifica en el flujograma de proceso, este no tiene un fin determinado, ya que los datos de salida del algoritmo que implementa el modelo retroalimentan al propio algoritmo de forma continua, de manera que las salidas de información cada vez serán más precisas.

Este entrenamiento continuo ofrecerá cada vez más precisión al objetivo que se persigue en este ejemplo, es decir, el cálculo del momento óptimo de recolección del pimiento. A este ejemplo se le puede añadir mayor complejidad, ya que el cultivo del pimiento se puede cortar en verde (en un estado anterior a la maduración biológica del fruto) o en rojo (que es cuando está ya maduro). El algoritmo se puede entrenar para que en sus salidas de información también contemple este hecho, de manera que el auto-entrenamiento será más complicado.

8.3. Toma de decisiones autónoma del sistema inteligente e interacción automatizada con sistemas de actuación en tiempo real

Los modelos que aplican inteligencia artificial y que se han introducido en el anterior sub-epígrafe, generan salidas de datos que, de forma adicional a retroalimentar el algoritmo, actúan como indicadores en el sistema de ayuda a la toma de decisiones que ofrece la plataforma software al usuario del sistema. Un escalón más en la automatización completa de procesos para que sea el sistema de información el que tenga la mayor parte del control posibilitando así a los operarios de las fincas centrar sus esfuerzos en otras labores, sería que estos indicadores que genera el algoritmo autoalimenten a otro sistema de automatización de la decisión de ejecución de procesos, es decir, que sea el sistema inteligente el que decida si se ha de realizar algún proceso en la finca y lo realice, por ejemplo la realización automática de un riego o la apertura automática de una ventana en un invernadero.

Ampliando el flujograma identificado en el anterior sub-epígrafe, este quedaría como se identifica a continuación.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

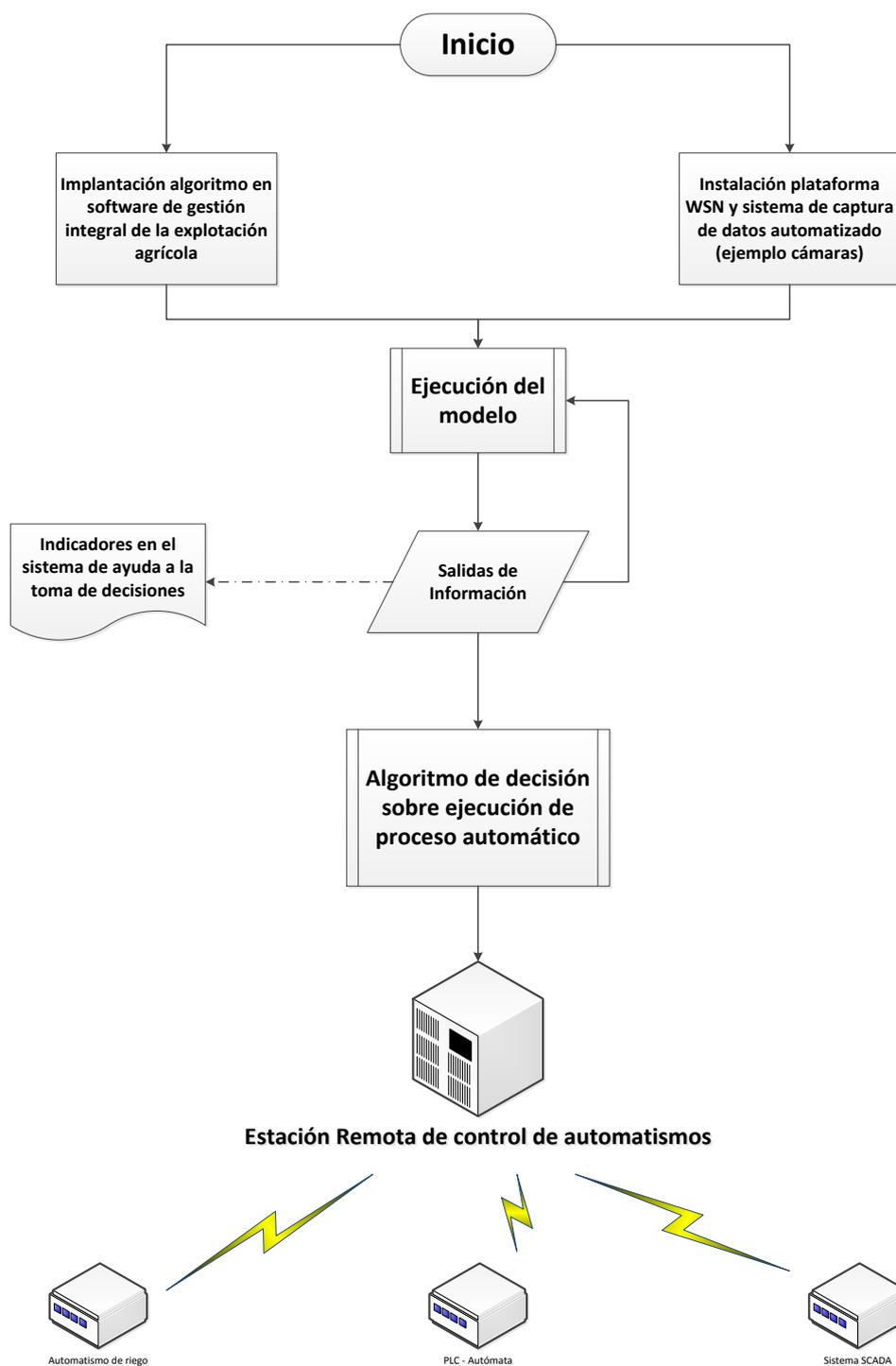


Figura 60 – Flujograma de proceso de un algoritmo que aplica inteligencia artificial y automatización de procesos.

Tal y como se identifica en el anterior esquema, las salidas de información del modelo que aplica inteligencia artificial alimentan otro modelo de decisión para automatizar procesos. Este modelo de decisión actuará en función de umbrales de indicadores, de manera que se puedan automatizar acciones en función de si los valores no están en los rangos adecuados.

Esta combinación de modelos permite automatizar totalmente acciones donde es el software que implementa el sistema inteligente el que toma las decisiones y las ejecuta, minimizando así la intervención humana en el proceso.

8.4. Modelos de análisis y toma de decisiones. Observación / Predicción de situaciones deseables en el cultivo. Simulación de escenarios

Uno de los ámbitos más operativos en los que se puede aplicar las tecnologías que utilizan inteligencia artificial es el correspondiente a los cuadros de mandos para la ayuda a la toma de decisiones. Estos cuadros de mandos se conforman como un conjunto de indicadores que pueden ser evaluados en múltiples dimensiones.

Para estos casos las técnicas de inteligencia artificial se aplican para establecer un sistema de autoaprendizaje y calibración de los valores de los indicadores a efectos de ofrecer mejor resolución, precisión y eficacia en la medición de los parámetros que se pretenden monitorizar. Este proceso se irá desarrollando de forma continua a lo largo de todas las campañas productivas que se vayan gestionando con este tipo de sistemas.

Estos sistemas de aprendizaje se pueden aplicar en agricultura de precisión fundamentalmente en dos ámbitos:

- Observación y toma de decisiones en función de situaciones actuales

Los cuadros de mandos de indicadores se construyen en base a la monitorización de parámetros actuales, es decir, no utilizando ningún modelo predictivo. Estos modelos, aun siendo eficientes en cuanto a la monitorización de la situación actual, no contemplan situaciones futuras y por lo tanto no incluyen la capacidad de anticipación de acciones correctivas y/o preventivas sobre el cultivo para evitar situaciones no deseadas.

- Predicción y toma de decisiones en función de situaciones futuras

Los cuadros de mandos de indicadores se construyen en base a la monitorización de parámetros futuros, es decir, utilizando modelos de simulación de situaciones futuras de cultivo, es decir, modelos predictivos de recolección, de producción, de climatología, etc.

Estos sistemas ofrecen las funcionalidades adicionales de anticipación de acciones correctivas y/o preventivas sobre el cultivo para evitar situaciones no deseadas. En este ámbito las técnicas de inteligencia artificial se complican, ya que de forma adicional al autoaprendizaje y calibración de los indicadores, se han de contemplar técnicas de autoajuste en la predicción en base a la comparación del valor que se estimó en su día, frente al que realmente ocurrió.

Todo ello implica que los modelos tienen que ser construidos y calibrados en varias campañas productivas, con lo cual la inversión económica es mayor y su disponibilidad total para ser utilizados al 100% es a más largo plazo. Como contrapunto ofrecen funcionalidades añadidas que pueden hacer que el cultivo sea más rentable, ya que permite acciones preventivas y por lo tanto las mermas en los cultivos siempre serán menores, mejorando así la eficiencia tanto en calidad como en producción.

En cualquiera de los dos casos, estos modelos inteligentes (modelos que aplican técnicas de inteligencia artificial), la principal funcionalidad que ofrecen, a través de estos sistemas de indicadores que pueden ser analizados en múltiples dimensiones, es la simulación de escenarios, es decir:

“¿Qué pasaría si las condiciones del cultivo fueran X, Y, Z, etc (valores de los parámetros que impactan en los indicadores de rendimiento del cultivo)?”

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Las respuestas a esta pregunta que ofrece el sistema inteligente permitirán a los usuarios:

- Analizar el mejor manejo para obtener el mejor rendimiento.
- Usar de manera eficiente los recursos para incrementar productividad y compatibilidad medioambiental.
- Diseñar la estrategia a seguir para incrementar la producción, calidad y sostenibilidad.
- Programar y planificar la producción de cada cultivo para optimizar la comercialización de los productos. La temporalización de la producción según los tiempos más adecuados de cada mercado objetivo, permite posicionar el productivo en cada mercado en los momentos más rentables.
- En definitiva, intentar controlar los parámetros que impactan en los indicadores para que la tendencia productiva del cultivo sea la deseada por el productor.

**CAPÍTULO 9. TRAZABILIDAD INTEGRAL DEL PRODUCTO
CONSUMIBLE PARA SEGURIDAD ALIMENTARIA.**

9. Trazabilidad integral del producto consumible para seguridad alimentaria

Un sistema de trazabilidad integral aplicado a un producto agroalimentario es aquel que ofrece toda la información sobre las operaciones realizadas sobre él desde que el producto era semilla hasta que es dispuesto al consumidor final en el mercado correspondiente, con lo cual los sistemas de información que lo soportan han de tener la capacidad de registrar, en base de datos, todos los datos involucrados en el proceso y que a continuación se identificarán. Adicionalmente han de tener la capacidad de consulta en múltiples dimensiones para que la explotación de datos sea la adecuada según los requerimientos del mercado objetivo de los productos.

El motivo y objetivo fundamental de los sistemas de trazabilidad integral es garantizar seguridad alimentaria al consumidor final y, por lo tanto, la mayoría de los principales mercados exigen a las entidades que comercializan los productos este tipo de información.

A continuación se muestra una ilustración que identifica las fases en las que se registran los datos que conforman el sistema de trazabilidad integral.

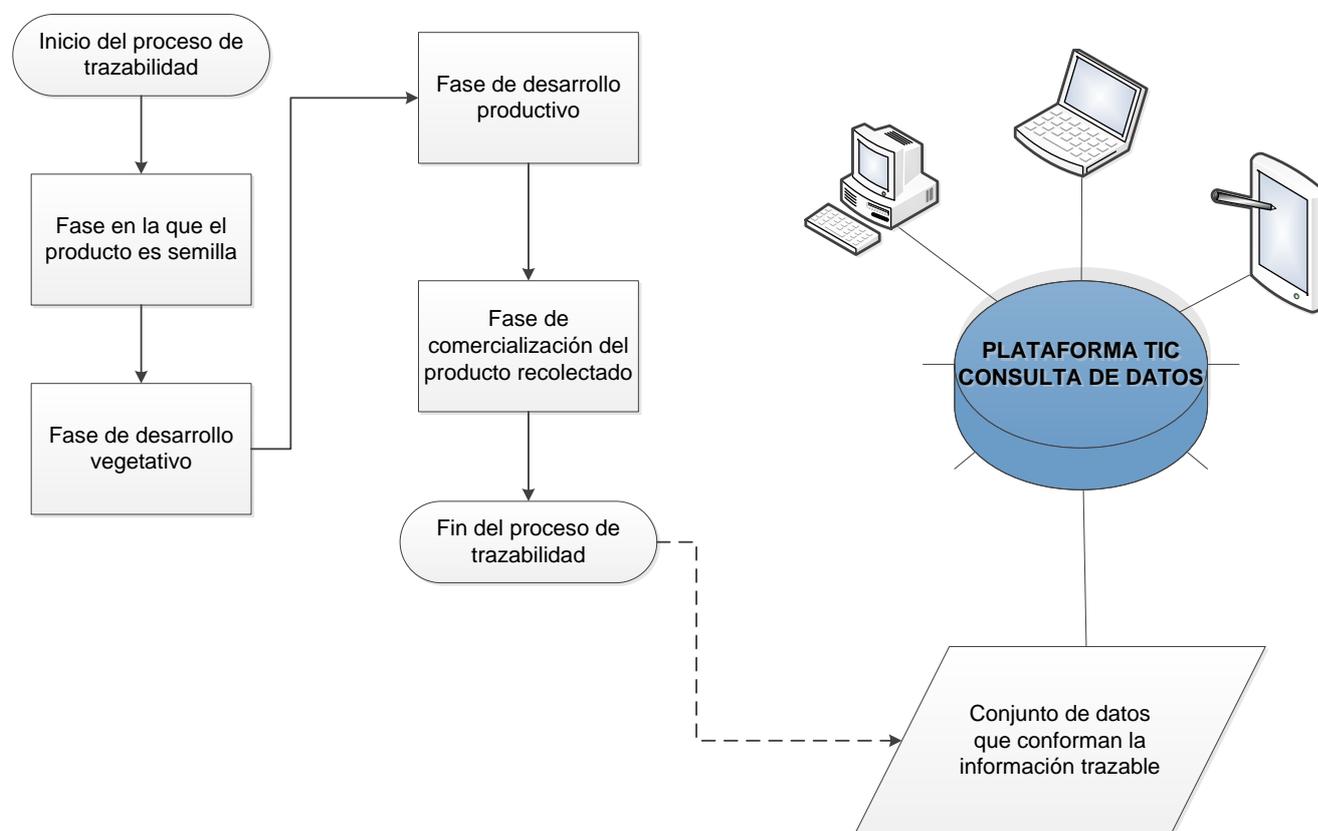


Figura 61 – Flujograma de proceso del Sistema de trazabilidad integral.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

Los principales datos, por cada fase de desarrollo del cultivo, que se han de gestionar, monitorizar y controlar en el ámbito de la trazabilidad para seguridad alimentaria son:

- Fase en la que el producto es semilla

En esta fase depende de cómo se gestiona el tratamiento y plantación de la semilla. Según esto, se pueden encontrar los siguientes casos:

- Semilla que se siembra directamente una vez adquirida: En este caso la semilla puede adquirirse comprándola directamente a semilleros o viveros, es decir empresas especializadas en el desarrollo y venta de semillas, o bien emplear directamente las que producen los frutos recolectados de anteriores campañas. En este caso la trazabilidad comienza en las operaciones que realizan los semilleros o viveros o bien en la información de trazabilidad gestionada en la campaña productiva que generó la semilla. En el caso de adquirir la semilla a un semillero o vivero, los datos más importantes que han de registrar estas organizaciones son:
 - Datos sobre experimentación genética (productos naturales, transgénicos, o cualquier otra característica a este respecto).
 - Datos sobre elementos químicos utilizados en su desarrollo.
 - Metodologías de tratamiento de plagas y otras enfermedades.
 - Identificación de las zonas de desarrollo con la capacidad de georreferenciación a través de un sistema AGROGIS.
 - Identificación de los manipuladores que han intervenido en su desarrollo.
 - Fechas de siembra
- Semilla que es plantada y tratada hasta que es plántula en un vivero de forma previa a su venta al productor: El productor no realiza una siembra de semilla sino que realiza un trasplante de una plántula adquirida a un vivero. En este caso el vivero comienza el desarrollo del cultivo y por lo tanto el tratamiento del mismo en fases tempranas del desarrollo vegetativo. El vivero ha de registrar en los sistemas de información los siguientes datos y posteriormente suministrarlos a los productores. Estos son:
 - Los datos que se han indicado anteriormente.
 - Datos sobre injertos realizados entre variedades y especies.
 - Datos sobre fitosanitarios empleados en el control del crecimiento de la plántula.
 - Datos sobre el tratamiento de plagas y enfermedades durante el desarrollo de la plántula.
 - Datos sobre abonos empleados en el proceso de fertirrigación durante el desarrollo de la plántula.
 - Datos sobre el manejo del cultivo según el protocolo de calidad establecido para el cultivo.
 - Fechas de trasplante.

- Fase de desarrollo vegetativo del cultivo

En esta fase se han de registrar los datos relativos al manejo que se va realizando conforme se va desarrollando el cultivo. Estos son:

- Datos sobre fitosanitarios empleados en el procedimiento de tratamiento de plagas y enfermedades.
- Datos sobre el tratamiento de plagas y enfermedades durante el desarrollo.
- Datos sobre abonos empleados en el proceso de fertirrigación.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Datos sobre el manejo del cultivo según el protocolo de calidad establecido para el cultivo.
- Datos fenológicos que se van obteniendo a través de la monitorización automatizada que se realiza con las plataformas WSN.
- Datos sobre los tipos de suelo y sustrato que se utiliza en el cultivo.
- Datos sobre la zona de cultivo con la capacidad de georreferenciación a través de un sistema AGROGIS.
- Datos sobre los análisis que se realizan tanto en cultivo como en suelo.
- Datos sobre los muestreos que se realizan tanto en cultivo como en suelo.
- Datos sobre las operaciones culturales que se realizan (Podas, despuntes, aclareos, etc.)
- Identificación de los actores que operan sobre el cultivo (propietario, asesores técnicos, operarios, responsables de fincas, operadores fitosanitarios, etc.).
- Fechas en las que se realiza cada operación.

- Fase de desarrollo productivo del cultivo

En esta fase se han de registrar los datos relativos al manejo que se va realizando desde que el cultivo finaliza la floración y comienza el desarrollo de los frutos hasta que finaliza la recolección. Estos son:

- Los datos identificados en la fase de desarrollo vegetativo.
- Datos de muestreos que se van realizando en los frutos que se van produciendo.
- Datos de análisis que se van realizando en los frutos que se van muestreando con el objetivo de demostrar que no se superan los Límites máximos de residuos permitidos (LMR).
- Datos sobre los tratamientos fitosanitarios, tratamiento fitofortificantes y cualquier otro tratamiento que se realice directamente sobre el fruto.
- Datos sobre recolección de fruto (identificación de los actores que intervienen, metodología de recolección y elementos adicionales que intervienen).
- Datos de identificación de maquinaria y elementos robotizados que intervienen en el tratamiento y recolección del fruto.
- Fechas en las que se realiza cada operación.

- Fase de comercialización del producto recolectado

En esta fase se han de registrar los datos relativos a la manipulación, clasificación, calibrado, transformación, envasado y logística del producto a comercializar. Estos datos son:

- Fechas de entrada del producto recolectado en la entidad de comercialización.
- Datos de conexión con la partida de producto recolectado para conexión con los datos identificados en las anteriores fases.
- Kilogramos de la partida de producto recolectado y suministrado a la entidad de comercialización.
- Clasificación de todos los frutos de la partida de producto.
- Calibrado de todos los frutos de la partida de producto.
- Datos de identificación de las personas que intervienen en la manipulación del producto.
- En caso de transformación del producto recolectado en otro producto, por ejemplo en vitivinicultura, datos de relación del producto resultante (por ejemplo botella de vino) con la partida de fruto del que procede. El objetivo es relacionar

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

el producto resultante con el producto recolectado para así no perder en enlace de la cadena de trazabilidad.

- Datos sobre los envases empleados en el producto resultante.
- Tratamiento con productos químicos, en el caso de que así sea, en los envases empleados en el producto resultante.
- Fechas de almacenaje de los productos resultantes.
- Datos de los productos conservantes empleados en el almacenaje del producto.
- Fechas de expedición del producto al mercado de destino.
- Datos del transporte y transportista que interviene en el proceso logístico.
- Datos de seguimiento, temperatura e intrusión en la mercancía durante el transporte. Por ejemplo, la empresa ANSERLOG [R119] está especializada en el suministro de unos dispositivos que, una vez introducidos en la carga, miden en continuo la posición GPS, la temperatura y la luz. Estos datos son enviados en tiempo real a un sistema de información en Cloud Computing para que puedan ser consultados en tiempo real y participen en el conjunto de datos que conforman el sistema de trazabilidad integral. Esto significa que la carga se puede seguir de forma georreferenciada en un sistema GIS, se pueden monitorizar los umbrales de temperatura a efectos de conservación del producto y se puede monitorizar la intrusión en la carga a través de la detección de luz consecuencia de apertura de puertas del cajón donde se ubica.

Todas las fases anteriormente identificadas conforman una cadena de datos enlazados y registrados en el sistema de información que permiten establecer una traza de operaciones y elementos empleados desde que el producto era semilla hasta que es dispuesto al consumidor final en el mercado correspondiente.

En definitiva cuando el consumidor final consulta la traza de un determinado producto a través de su código identificativo (código de barras, código QR, etc.) en el sistema de información, por ejemplo a través de un sistema WEB, este sistema de información reportará todos los datos que se han identificado en cada fase combinando tablas de datos, gráficos, información georreferenciada en GIS, etc. Todos estos datos conformarán el conjunto de información que asegura al consumidor final que las operaciones realizadas hacen que el producto sea saludable y consumible.

CAPÍTULO 10. IMPACTOS DEL CONOCIMIENTO AGRONÓMICO A TRAVÉS DE LAS TECNOLOGÍAS EN LOS RENDIMIENTOS ECONÓMICOS DE LOS CULTIVOS Y EN LOS SISTEMAS DE COMERCIALIZACIÓN.

10. Impactos del conocimiento agronómico a través de las tecnologías en los rendimientos económicos de los cultivos y en los sistemas de comercialización

A lo largo de todo este trabajo se han identificado diferentes tecnologías y metodologías orientadas al manejo agronómico de los cultivos siguiendo el paradigma de una agricultura inteligente o agricultura de precisión. Todo ello se orienta fundamentalmente para mejorar los rendimientos económicos de los cultivos, tener productos de más calidad y saludables y la sostenibilidad medioambiental.

Centrando este epígrafe en la mejora de los rendimientos económicos, tema muy importante a tener en cuenta por parte de los productores ya que esto significará que podrá mantener la explotación agrícola en el tiempo y crear puestos de trabajo que redunden en una mejora social del entorno, los principales impactos de este conocimiento agronómico, que se obtiene siguiendo el modelo SMART Agriculture, se pueden dividir en dos áreas:

- Rendimientos económicos de los cultivos

Esta área atañe estrictamente al ámbito de la explotación agrícola, es decir, a los procesos que se realizan en el ámbito del manejo del cultivo y su correspondiente recolección.

Los impactos en esta área son:

- o Mejora en el uso de los recursos: Las técnicas y metodologías de agricultura inteligente ofrecen la posibilidad al productor de consumir los recursos necesarios en las dosis y momentos adecuados, con lo cual, comparando con un manejo tradicional, el uso de recursos es menor y por lo tanto hay un menor coste económico a imputar en la cuenta de resultados del cultivo.
- o Incremento en producción de fruto en el proceso de recolección: Las técnicas y metodologías de agricultura inteligente ofrecen al productor información y recomendaciones de manejo de cultivo orientado a incrementar la cantidad de fruto que las plantas producen. Esto implica que, frente a un manejo tradicional de cultivo, el manejo inteligente redundará en más cantidad de fruto recolectado y por lo tanto más beneficio económico bruto por cantidad de fruto vendido.
- o Incremento en calidad de fruto en el proceso de recolección: Las técnicas y metodologías de agricultura inteligente ofrecen al productor información y recomendaciones de manejo de cultivo orientado a incrementar la calidad de fruto que las plantas producen. Esto implica que, frente a un manejo tradicional de cultivo, el manejo inteligente redundará en más calidad de fruto recolectado y por lo tanto más beneficio económico bruto por mejor precio en el fruto vendido.

Según lo anterior, si aplicando estas tecnologías y metodologías se obtiene: menor coste, más producto a vender y mejor precio, el rendimiento económico neto del cultivo será mejor que aplicando técnicas y metodologías tradicionales de manejo de cultivo.

Incrementando el beneficio económico neto de los cultivos al utilizar técnicas y metodologías de agricultura de precisión, el productor podrá contratar más personal para dar cobertura a las nuevas tareas que se han de realizar. Estas nuevas contrataciones son de personal cualificado y especializado y, adicionalmente, a las personas ya contratadas les permite actualizar sus conocimientos y formarse en nuevas tecnologías con lo que incrementa su cualificación laboral.

En definitiva la mejora en los rendimientos económicos de los cultivos fomenta una mejora social en el entorno donde se ubica.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Comercialización de la producción agrícola

Esta área atañe a la comercialización del producto una vez recolectado y dispuesto para su venta, es decir, a los procesos que se realizan para la venta y logística necesaria para llevar el producto al consumidor final.

Los impactos en esta área son:

- Riqueza de datos que conforman la información del sistema de trazabilidad integral: Uno de los valores añadidos más importantes que los productores pueden ofrecer a los mercados en relación a sus productos agroalimentarios es la información correspondiente a la trazabilidad, ya que esta garantiza seguridad alimentaria y por lo tanto garantía de que se puede consumir el producto con seguridad.
- Cantidad de producción a comercializar: Debido al óptimo manejo de cultivo que fomenta el uso de tecnologías IT aplicadas en agricultura de precisión, la producción de las explotaciones agrícolas se verá incrementada y por lo tanto habrá más producción a comercializar. Esto ofrece la ventaja de los potenciales incrementos de beneficios por las ventas y la desventaja de que se ha de planificar mejor la comercialización, aunque para esto se pueden aplicar modelos de programación y planificación de las ventas en los mercados objetivo según potencial demanda (aplicando por ejemplo tecnologías BIG DATA).
- Incremento en la calidad de los productos a comercializar: Debido al óptimo manejo de cultivo que fomenta el uso de tecnologías IT (Information Technologies) aplicadas en agricultura de precisión, la calidad en los productos recolectados en las explotaciones agrícolas se verá incrementada y por lo tanto se podrán obtener mejores precios en la comercialización. Esto ofrece la ventaja de los potenciales incrementos de beneficios por incremento de precios ya que la calidad de los productos es mayor. Adicionalmente se ofrecerá la imagen en mercado de empresa suministradora de productos de alta calidad.
- Mejora en la comercialización de productos debido a una mejor planificación de las ventas: Utilizando las tecnologías BIG DATA y demás modelos de decisión sobre programación de las ventas, modelos y tecnologías que son computadas por los sistemas de información de las entidades de comercialización, la entidad de comercialización podrá optimizar los procesos de venta colocando los productos en los momentos y mercados más adecuados.

En definitiva el uso de tecnologías y metodologías IT aplicadas a agricultura de precisión redundan en una mejora en los beneficios económicos de toda la cadena de suministro de productos agroalimentarios, a parte de todos los beneficios sociales y medioambientales que se han identificado anteriormente.

CAPÍTULO 11. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

11. Resultados, discusión y conclusiones

A lo largo de este documento se han identificado tecnologías y metodologías que usando las TIC y en el marco de actuaciones SMART Agriculture asesoran y ofrecen una serie de beneficios a todos los actores del sector. Hay que tener en cuenta que la “agricultura inteligente” (posible traducción del término) no implica que el manejo tradicional no lo sea, sino que ofrece datos de valor añadido para ayuda en la toma de decisiones a través de sistemas de información que ofrecen capacidades adicionales en las decisiones.

Tal y como se identifica al inicio de este documento, en el significado de la palabra “inteligencia” se encuentran cuatro posibles acepciones. Estos son:

- Capacidad de entender o comprender: Los agricultores que manejan los cultivos de una forma tradicional encajan perfectamente en esta definición.
- Capacidad de resolver problemas: Los agricultores, independientemente de si usan o no estas tecnologías, siempre han tenido la capacidad de resolver los problemas que le van surgiendo.
- Conocimiento, comprensión, acto de entender: Si alguien entiende, tiene conocimiento y comprende el sector es el agricultor, independientemente de las metodologías que utiliza en el manejo de cultivo.
- Habilidad, destreza y experiencia: Esta capacidad también es totalmente aplicable a los agricultores independientemente de las metodologías que empleen.

Focalizando el concepto en un sentido agronómico y según lo anterior, la inteligencia en un agricultor le viene de su experiencia en la profesión y, en el ámbito de la gestión tradicional de las explotaciones agrícolas, ha realizado una gestión basada en procedimientos aprendidos de generación en generación.

Si la gestión tradicional se completa con otras herramientas tecnológicas que ofrecen datos precisos e información de valor sobre el estado de los cultivos y sus potenciales necesidades; si se usan técnicas de anticipación basada en modelos de computación que predicen situaciones futuras de cultivo y, en general, se aplican técnicas de agricultura de precisión, el agricultor podrá tomar mejores decisiones estratégicas de manejo orientadas a incrementar los rendimientos de cultivo.

La combinación entre la “inteligencia del agricultor” y el uso de nuevas tecnologías aplicadas a la gestión agronómica de los cultivos es lo que se puede denominar como “SMART Agriculture”. El término SMART no tiene nada que ver con capacidades cognitivas, sino con el uso de herramientas TICs que ofrecen información adicional de valor totalmente complementaria a la que el agricultor ya tiene.

A continuación se identifican los resultados que este trabajo pretende reflejar, un ámbito de discusión sobre el uso o no de este tipo de tecnologías y las conclusiones que se pueden extraer a este respecto.

Los resultados de este trabajo se pueden clasificar en tres grandes áreas:

- Por un lado la identificación de los niveles en los que se pueden clasificar las explotaciones agrícolas en función de sus capacidades e implantación de TICs orientadas a agricultura de precisión. Estos niveles también definen una secuencia de los pasos a seguir para que una explotación agrícola realice un proceso de actualización tecnológica y metodología en la gestión de sus cultivos. La característica principal es que esta actualización es continua, ya que este tipo de tecnologías y metodologías requieren el ir aumentando su precisión a través de un proceso de mejora constante.

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

- Por otro lado la identificación de las tecnologías y metodologías que, usando las TICs, ofrecen:
 - o Mejoras e información adicional en la toma de decisiones sobre la gestión de los cultivos en las explotaciones agrícolas.
 - o Mejoras en el uso de recursos.
 - o Incremento en producción de frutos.
 - o Mejoras en la calidad de los frutos.
 - o Mejora en los procesos de comercialización y logística.
 - o Riqueza de datos a aportar en los sistemas de trazabilidad para seguridad alimentaria.
 - o Automatización necesaria para que se optimice la intervención humana en los procesos para así minimizar los costes de cultivo.
- Por último la identificación de experiencias que se están llevando a cabo en el campo de la SMART Agriculture que ejemplarizan los beneficios que aportan estas tecnologías a las explotaciones agrícolas, tanto en el ámbito económico, como en el ámbito social, como en el ámbito medioambiental.

La discusión que surge en el ámbito de la SMART Agriculture es la decisión sobre el uso de estas metodologías y tecnologías frente a un manejo tradicional. Esta discusión se vertebra fundamentalmente en tres áreas:

- En relación al aspecto estrictamente económico. Es indiscutible que la implementación e implantación de este tipo de metodologías y tecnologías requieren una inversión económica. Es importante tener en cuenta que es una inversión y no un gasto, con lo cual está sujeta a amortización en función de los beneficios estrictamente económicos que se pueden obtener por el hecho de emplear este tipo de tecnologías y metodologías. Normalmente la implantación de este tipo de tecnologías requieren un tiempo de amortización de no más de 2 o 3 campañas productivas, aunque dependiendo del tipo de cultivo la amortización se puede realizar en una sola campaña, con lo cual los beneficios económicos que aportan estas tecnologías pueden tener su impacto en el rendimiento económico neto de los cultivos a muy corto plazo.
- En relación al aspecto medioambiental. La optimización en el uso de recursos a emplear en los cultivos que fomenta este tipo de metodologías y tecnologías provoca que el uso de fertilizantes, fitosanitarios y demás tratamientos que potencialmente pueden ser nocivos para el medioambiente se verán reducidos, con lo que el impacto medioambiental se verá mejorado sensiblemente. El beneficio a medio y largo plazo es muy importante a tener en cuenta ya que impacta en la sostenibilidad de las explotaciones agrícolas y en el respecto a los recursos naturales que han de estar disponibles para futuras generaciones. El manejo tradicional de los cultivos no siempre es respetuoso con los recursos naturales ya que al no tener información precisa sobre las necesidades de recursos de los cultivos, siempre se consume algo más para cubrir las potenciales necesidades no medidas, con lo que a medio / largo plazo redundará en un impacto medioambiental más perjudicial.
- En relación al aspecto social. Un análisis rápido en relación al uso de este tipo de metodologías y tecnologías en las explotaciones agrícolas identifica que puede provocar un perjuicio social ya que, al optimizar el uso de recursos humanos, se perderá empleo y se fomentará la no contratación de nuevo personal. Quizás esta situación puede ocurrir con respecto a personal no cualificado y tecnificado, no así en personal especializado, ya que la implantación de estas metodologías y tecnologías requerirá personal adecuado que las pueda gestionar e interpretar. En relación al personal existente no cualificado tendrá que experimentar un proceso de formación para actualizarse tecnológicamente y un proceso de gestión del cambio para que asuma estas nuevas tecnologías, con lo cual, no se tiene por qué perder empleo. Como beneficio adicional en este aspecto, un personal más cualificado tendrá un mejor salario y unas mejores condiciones laborales fomentadas también por los incrementos

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

en los beneficios económicos de las explotaciones agrícolas, con lo que provocará un beneficio social del entorno donde se ubican las explotaciones agrícolas ya que mejora la economía de la zona por potenciales incrementos en el consumo de servicios.

Las conclusiones de este trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

- El uso de tecnologías y metodologías TICs en el ámbito de la agricultura de precisión ofrecen una serie de beneficios económicos, sociales y medioambientales que justifican la implantación de proyectos SMART Agriculture en las explotaciones agrícolas.
- Todas las explotaciones agrícolas son susceptibles de implementar un proyecto de actualización tecnológica y metodológica en el ámbito de la SMART Agriculture. Inicialmente todos los actores han de tener la actitud adecuada para gestionar el cambio que ello produce, lo demás es inversión económica en la puesta en marcha de tecnologías innovadoras y adaptadas a los objetivos que se pretenden conseguir.
- Los únicos motivos por los cuales una explotación agrícola puede justificar la no implantación de este tipo de tecnologías son los relacionados con la actitud y/o aptitud de los actores que intervienen y los relacionados con los aspectos económicos, es decir, el coste de la inversión a realizar. La actitud y/o aptitud de los actores que intervienen, siempre y cuando no sea la del propietario de la explotación agrícola, es totalmente salvable. Quizás lo más complicado es la justificación económica del proyecto, para ello se ha de realizar un plan de negocio que contemple las potenciales ventas y beneficios que provocaría la implantación de este tipo de tecnologías frente al coste de la inversión que ello provoca. Esto ofrecerá información sobre los tiempos de amortización y la justificación de los beneficios que se pueden obtener una vez amortizada la tecnología.
- Los beneficios económicos, sociales y medioambientales que este tipo de metodologías y tecnologías fomentan en la zona de influencia de las explotaciones agrícolas que las implementan hacen que: se exploten los recursos naturales de forma sostenible y haya una mejora socioeconómica que redunde en una mejor calidad de vida de las personas que en ella habitan.

Como acciones futuras previsibles en el ámbito de la SMART Agriculture, se pueden identificar las siguientes:

- Mejora tecnológica en el proceso de captura de inputs que alimentan los modelos de cálculo de recomendaciones y simulación de escenarios futuros. Tecnologías como el análisis hiperespectral de imágenes de cultivo o captura automatizada de datos cualitativos, aportarán una mejora importante a la hora de minimizar la intervención humana en la captura de datos agronómicos.
- Mejora en las recomendaciones automatizadas de manejo de cultivo. Consecuencia de lo anterior expuesto, se afinará y se harán más precisas las recomendaciones de manejo de cultivo que el sistema de información puede presentar, de forma automatizada, a los responsables y asesores de la explotación agrícola.
- Mejora en la automatización de procesos en campo orientado también a minimizar la intervención humana relativa a la ejecución de labores recomendadas por los sistemas de información. Si el sistema de información puede realizar recomendaciones de operaciones en campo de forma automatizada, también podrá realizarlas automáticamente a través de la integración con actuadores informatizados que ejecuten procesos (riego, apertura de ventanas de invernadero, mecanismos de control climático, etc.).
- Mejora en la robotización de labores. Actuaciones que actualmente las han de realizar personas, bien directamente, bien ayudados por máquinas, como por ejemplo la recolección de fruto o la aplicación fitosanitaria, en un futuro podrán ser realizadas directamente por sistemas robóticos. Actualmente esta tecnología está en fase primaria, no obstante, ya hay avances importantes que permiten pronosticar que en

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

un futuro cercano los sistemas robóticos podrán ser autónomos en la realización de este tipo de actuaciones.

- Mejora en la integración con maquinaria agrícola. Actualmente ya hay definidos protocolos y hay experiencias que demuestran que se puede telecontrolar y telecomandar maquinaria agrícola en campo. No obstante, los principales fabricantes de tractores están realizando mucha inversión en I+D+i en lo que se refiere a tecnologías de integración TIC con la maquinaria a efectos de ofrecer un valor añadido a los agricultores.
- En general, mejora en la precisión de los modelos y en la automatización de labores al objetivo de hacer: más preciso el sistema, más óptimo en el consumo de recursos, más productivo y que requiera la mínima intervención humana posible, haciendo más especializado el trabajo que se tenga que hacer.

Finalmente, indicar que las experiencias que este trabajo refleja y los modelos tecnológicos identificados en el ámbito de la SMART Agriculture ofrecen beneficios a un sector que es fundamental para el desarrollo en todos los ámbitos de cualquier sociedad, ya que este sector primario es el que alimenta a las personas que en ella viven.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

RB - Referencias bibliográficas

RB1 – Precision agriculture '15. Wageningen Academic Publishers. Edited by John V. Stafford. ISBN 978-90-8686-267-2

RB2 – 10th European Conference on Precision Agriculture. July 12-16, 2015. Volcani Center, Israel (www.ecpa2015.com). Program and Abstracts.

RB3 – II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola. “Automatización y TICs en agricultura”. Editores Francisco Rodríguez Díaz y Manuel Berenguel Soria. 10-12 de febrero de 2016. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. Actas de Horticultura. Depósito Legal AL 18-2016. ISBN 978-84-16642-12-0.

RB4 – Ingeniería del Riego. Utilización Racional del Agua. Autor: Guillermo Castañón. Paraninfo Thomson Learning. Depósito Legal M-30.776-2000. ISBN 84-283-2733-5

RB5 – Manual de Agricultura de Precisión. Procisur – Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur. Editores: Evandro Chartuni Mantovani y Carlos Magdalena.

RB6 – Tecnologías Aplicables en Agricultura de Precisión. Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos. Serie FIA – Plataforma SILVOAGROPECUARIA. Fundación para la Innovación Agraria Santiago de Chile. Registro de propiedad intelectual 176.826. ISBN: 978-956-7874-90-3.

RB7 – Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth. Avances in Industrial Control. Autores Francisco Rodríguez, Manuel Berenguel, Jose Luis Guzmán y Armando Ramírez-Arias. AIC Springer. ISBN 978-3-319-11133-9.

RI - Referencias INTERNET

RI1 - <http://www.fao.org/home/es/>

RI2 - [https://es.wikipedia.org/wiki/Agricultura de precisi3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Agricultura_de_precisi3n)

RI3 - <http://www.hispatec.es/erpagroalimentario/>

RI4 - https://www.aenor.es/AENOR/certificacion/mambiente/mab_huella_carbono.asp#.Vzo2KXo0Fik

RI5 - <http://www.aec.es/web/quest/centro-conocimiento/huella-hidrica>

RI6 - http://agriculture.newholland.com/AR/es/Products/Agriculturadeprecision/PLM/Pages/Conexi3nISOBUS_details.aspx

RI7 - <http://blog.agcocorp.com/tag/isobus/>

RI8 - <http://www.omie.es/inicio>

RI9 - http://www.heraldo.es/noticias/suplementos/heraldo_del_campo/2013/10/25/los_costes_elec3ricidad_amenazan_viabilidad_los_cultivos_aragon_254262_1431024.html

Experiencias y Modelos Tecnológicos Aplicados en Agricultura de Precisión

RI10 - <http://www.igme.es/>

RI11 - <http://www.aemet.es/>

RI12 - <http://www.ign.es>

RI13 - <http://www.anoto.com/>

RI14 - <http://hirlam.org/>

RI15 - <http://dictionary.isobus.net/isobus/site/exports?view=export>

RI16 - <http://www.qlik.com>

RI17 - powerbi.microsoft.com

RI18 – <http://www.agrointeligencia.com>

RI19 - <http://anserlog.com/es/>

RP – Referencias de Publicaciones y revistas especializadas del sector

RP1 – Almería en verde. La revista del agricultor. Número 139 febrero 2016. Editado por Coexphal.

RP2 – Almería en verde. La revista del agricultor. Número 140 marzo de 2016. Editado por Coexphal.

RP3 – Agro Técnica. Número 7 Julio 2007. Editado por B&H Editores.

RP4 – Navigation Techniques for Mobile Robots in Greenhouses. Artículo sobre técnicas de navegación de ROBOTS en invernaderos que se puede localizar en la Biblioteca Nicolás Salmerón de la Universidad de Almería.