



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ciencias Empresariales
Departamento de Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información

Tesis de Magíster en Ciencias de la Computación

Framework para la implementación de Agricultura de Precisión

Chillán, Chile, Abril, 2020

Estudiante: Isabel Margarita Cisternas Sepúlveda
Directora de Tesis: Dra. María Angélica Caro Gutiérrez
Co-Director de Tesis: Dr. Alfonso Rodríguez Ríos

Resumen

Cualquier persona al integrarse al mundo de la agricultura debe afrontar diversos problemas, entre los cuales se destacan la gestión de los recursos, ya sea agua o insumos. Una solución es considerar el uso de Agricultura de Precisión, que consiste esencialmente en el uso de Tecnologías de Información con el fin de aumentar el rendimiento en la producción agrícola y optimizar recursos.

Sin embargo, la tasa de adopción aún resulta baja. Entre las razones se encuentran la magnitud de la inversión requerida, la amplia variedad de soluciones tecnológicas ofrecidas, la complejidad al entender su funcionamiento, y la dificultad de compararlas y seleccionarlas, especialmente dadas ciertas condiciones específicas.

Debido a lo anterior, esta investigación se centra en la creación de un Framework que provea del conocimiento necesario para comparar y seleccionar las Tecnologías de Información de una implementación dada de Agricultura de Precisión. Para esto se ha tomado como base el conocimiento existente en la literatura y se ha complementado con la experiencia de la industria.

Consecuentemente, se realizó una Revisión Sistemática de la Literatura, con el propósito de obtener el conocimiento existente de las tecnologías usadas en la Agricultura de Precisión. En base a esto, se establecieron criterios de generalización y se generó una propuesta inicial del Framework, la cual fue ratificada por expertos por medio de una encuesta. Posteriormente, se realizaron ajustes, los que fueron validados por medio de una prueba de concepto. Como resultado, se obtuvo un Framework adecuadamente validado, que permite la comparación y selección de Tecnologías adecuadas para la implementación de Agricultura de Precisión en contextos específicos, junto con un prototipo de herramienta para implementar el Framework, cubriendo así la brecha detectada en la literatura.

Abstract

At the moment of joining the world of agriculture, there are several problems to face, such as the management of resources, either water or inputs. One solution is through the use of Precision Agriculture, which consists essentially in the use of Information Technologies to increase the yield of the agricultural production and optimize resources.

However, the adoption rate is still low. Reasons include the investment required, the wide variety of technological solutions offered, the complexity of understanding how they work, and the difficulty of comparing and selecting them, especially given specific conditions.

Due to the above, this research centered in the creation of a Framework that allows comparing and selecting the Information Technology to be implemented. Based on the existing knowledge in the literature and in addition to the industry experience.

Consequently, a Systematic Review of the Literature was carried out, with the purpose of obtaining the existing knowledge of the technologies used in Precision Agriculture. Based on this, generalization criteria are established and an initial proposal of the Framework is generated, which is ratified through an expert survey. Subsequently, adjustments are made and validated a proof of concept. As a result, an adequately validated Framework is obtained, which allows the comparison and selection of Technologies, together with a prototype which provides an easy use, thus covering the detected breach in the literature.

Contenido

1	Introducción	9
1.1	Planteamiento y Justificación del Trabajo	10
1.2	Hipótesis	11
1.3	Objetivo General	11
1.4	Objetivos Específicos	11
1.5	Alcance de la Investigación	12
1.6	Organización de la Tesis	12
2	Metodología de Trabajo	14
2.1	Revisión Sistemática de la Literatura	15
2.1.1	Planificación de la Revisión	16
2.1.2	Desarrollo de la Revisión	17
2.1.3	Publicación de Resultados	17
2.1.4	Aplicación y Resultados de la Revisión Sistemática de la Literatura	18
2.2	Encuesta	18
2.2.1	Establecimiento de los objetivos de la encuesta	18
2.2.2	Diseño de la encuesta	18
2.2.3	Desarrollo del cuestionario	18
2.2.4	Evaluación y validación del cuestionario	19
2.2.5	Obtención de los datos de la encuesta	19
2.2.6	Análisis de los datos obtenidos	20
2.2.7	Reporte de los resultados	20
2.2.8	Aplicación y Resultados de la Encuesta	20
2.3	Prototipo	20
2.3.1	Aplicación y Resultados del Sistema de recomendación	21
2.4	Prueba de concepto	21
2.4.1	Aplicación y Resultados de la Prueba de Concepto	21
3	Estado del Arte	22
3.1	Resultados Generales de la RSL	23
3.2	Agricultura de Precisión	25
3.3	P1: ¿Qué tecnologías se utilizan en la Agricultura de Precisión?	27
3.4	P2: ¿Qué implementaciones de la AP registra la literatura?	31
3.5	P3: ¿Qué criterios existen para comparar y seleccionar las tecnologías usadas?	35
3.6	P4: ¿Existe algún Framework que guíe la implementación de la Agricultura de Precisión?	40
3.7	Revisión de la Industria	40
3.8	Discusión	42
3.9	Conclusiones del Estado del Arte	43
4	Creación de Framework	45
4.1	Identificación de Criterios para la implementación de AP	46
4.1.1	Criterios identificados durante RSL	46
4.1.2	Criterios identificados durante la Revisión de la Industria	47
4.1.3	Establecimiento de criterios finales	48
4.2	Generación de Framework	48
4.2.1	Propuesta Inicial	48
4.2.2	Desarrollo de Encuesta a la industria	50
4.2.2.1	Resultado Piloto	50
4.2.2.2	Resultados de la Encuesta	50
4.2.2.3	Discusión	58

4.2.3. Ajuste Propuesta del Framework	59
5 Diseño y Construcción de Prototipo de Herramienta	60
5.1 Diseño del prototipo	61
5.1.1 Koba4MS	61
5.1.2 Adaptación del Koba4MS para ser usada en una implementación de AP	64
5.2 Construcción del prototipo.....	73
5.2.1 Características generales del prototipo	73
5.2.2 Modelo Entidad Relación	73
5.2.3 Pantallas principales del prototipo	75
6 Validación por Medio de Prueba de Concepto	81
6.1 Casos de Estudio hipotéticos.....	82
6.1.1 Caso de Estudio 1	83
6.1.2 Caso de Estudio 2.....	84
6.1.3 Caso de Estudio 3.....	85
6.1.4 Caso de Estudio 4.....	86
6.2 Conclusiones	87
7 Conclusiones.....	88
7.1 Análisis de los Objetivos Propuestos/Cumplidos	89
7.2 Principal Aporte	90
7.3 Limitaciones del estudio	90
7.4 Trabajos Futuros.....	90
7.5 Contraste de Resultados	91
8 Referencias	92
9 Anexos	98
Anexo A. Planificación de la Revisión Sistemática de la Literatura	99
A.1 Identificación de la Necesidad de Revisión	100
A.2 Recursos para la Realización de la Revisión Sistemática de la Literatura...	100
A.3 Protocolo de Búsqueda	100
A.4 Protocolo de Revisión.....	101
Anexo B. Relaciones entre los criterios identificados.....	102
Anexo C. Diseño de las Preguntas de la Encuesta	106
Anexo D. Diseño de los Casos de Estudio	110

Índice de Tablas

Tabla 1: Proceso para realizar una Revisión Sistemática de la Literatura.....	16
Tabla 2: Artículos aceptados divididos por cada pregunta de investigación	24
Tabla 3: Número de artículos por cada tecnología	28
Tabla 4: Resumen de las publicaciones que proveen criterios de comparación y selección de TI...	39
Tabla 5: Criterios identificados y sus posibles valores	40
Tabla 6: Priorización de criterios.....	50
Tabla 8: Actividades agregadas por los encuestados	55
Tabla 9: Factores Climáticos agregados por los encuestados.....	56
Tabla 10: Factores del Suelo agregados por los encuestados	58
Tabla 11: Criterios de requisitos de AP	66
Tabla 12: Propiedades del producto.....	67
Tabla 13: Restricciones de compatibilidad.....	69
Tabla 14: Instancias del producto	71
Tabla 15: Variables del autómata	72
Tabla 16: Comparación de las respuestas - Caso Estudio 1	83
Tabla 17: Comparación de las respuestas - Caso Estudio 2	84
Tabla 18: Comparación de las respuestas - Caso Estudio 3	85
Tabla 19: Comparación de las respuestas - Caso Estudio 4	86
Tabla 19: Términos y combinaciones usados en la RSL.....	100
Tabla 20: Relaciones entre Tecnología y Actividad Agrícola	102
Tabla 21: Relaciones entre Actividad Agrícola y Clima.....	103
Tabla 22: Relaciones entre Actividad Agrícola y Suelo	103
Tabla 23: Relaciones entre TI y Clima.....	104
Tabla 24: Relaciones entre TI y Suelo	104
Tabla 25: Relaciones entre cultivo y clima	105
Tabla 26: Relaciones entre Cultivo y Suelo	105

Índice de Figuras

Figura 1: Metodología de trabajo.....	15
Figura 2: Proceso de realización de la RSL.....	24
Figura 3: Relaciones entre los conjuntos de publicaciones que contestan a cada pregunta de investigación.....	25
Figura 4: Clasificación de la TI usadas en AP.....	26
Figura 5: Relaciones entre los conjuntos de publicaciones que mencionan TI y Software.....	27
Figura 6: Distribución de publicaciones por año, en relación a las TI consideradas	29
Figura 7: Técnicas, procesos o software usados en la Agricultura de Precisión	30
Figura 8: Distribución de publicaciones por año, en relación al software y técnicas considerados .	31
Figura 9: Relaciones entre los conjuntos de publicaciones que se enfocan en los distintos aspectos de implementaciones de AP.	32
Figura 10: Actividades agrícolas consideradas durante implementaciones de AP	32
Figura 11: Cultivos mencionados durante implementaciones de AP.....	33
Figura 12:Relaciones entre los conjuntos de publicaciones que desarrollan sistemas de información	34
Figura 13: Sistemas RA elaborados durante implementaciones de AP	34
Figura 14: Sistemas T elaborados durante implementaciones de AP	35
Figura 15: Etapas para la generación del Framework	46
Figura 16: Actividades para la identificación de criterios.....	46
Figura 17: Criterios y subcriterios para una implementación de AP	48
Figura 18: Etapas Generación del Framework	48
Figura 19: Asociación de criterios	49
Figura 21: Nacionalidad de los encuestados.....	51
Figura 22: Años de experiencia con AP de los encuestados	51
Figura 23: Número de veces que un criterio fue elegido con prioridad 1	52
Figura 24 Número de veces que un criterio fue elegido con prioridad 5	52
Figura 25: Características a considerar previo a una implementación de AP	53
Figura 26: Características de la TI a considerar	53
Figura 27: Experiencia en tecnologías de los encuestados.....	54
Figura 28: Promedio de años de experiencia por tecnología.....	54
Figura 29: Existencia de nuevas actividades agrícolas	55
Figura 30: Existencia de nuevos factores climáticos	56
Figura 31: Existencia de nuevos factores del suelo	57
Figura 32: Orden de criterios en una implementación de AP.....	58
Figura 33: Arquitectura Koba4MS Original.....	62
Figura 34: Fuentes de conocimiento Koba4MS	63
Figura 35: Criterios participantes en la arquitectura	64
Figura 36: Arquitectura Koba4MS Adaptada.....	64
Figura 37: Fuentes de conocimiento del Framework	65
Figura 38:Autómata con orden de criterios a solicitar	72
Figura 39: Modelo Entidad Relación	74
Figura 40: Pantalla de inicio.....	75
Figura 41: Pantalla de Recomendación - Cultivo	76
Figura 42: Pantalla de Recomendación - Actividad Agrícola	76
Figura 43: Pantalla de Recomendación - Factores del Suelo	77
Figura 44: Pantalla de Recomendación - Factores Climáticos	77
Figura 45: Pantalla de Recomendación - Tecnología.....	78
Figura 46: Resultado de la Recomendación	78

Figura 47: Pantalla Intervenciones.....	79
Figura 48: Pantalla Tecnologías	79
Figura 49: Pantalla Criterios - Cultivos.....	80
Figura 50: Pantalla Glosario.....	80
Figura 51: Años de experiencia con AP de los encuestados	83
Figura 51: Proceso de Revisión Sistemática de la Literatura aplicada la investigación.....	99
Figura 53: Presentación del motivo y preguntas de la encuesta	109
Figura 54: Presentación del motivo y casos de estudio.....	116

Capítulo 1

Introducción

1.1 Planteamiento y Justificación del Trabajo

Hoy en día, el suelo y el agua no se consideran recursos infinitos o abundantes. Los gobiernos y los científicos se han dado cuenta de la importancia de maximizar el uso de recursos junto con minimizar pérdidas y desechos. En el caso de los recursos hídricos, éstos se encuentran en los océanos salinos que constituyen el 97% del agua de la Tierra. Dos tercios del 3% restante se han acumulado en forma de masas de hielo en los polos y nieve en las montañas. Por lo tanto, el 1% del agua de la Tierra es agua corriente fresca, el 98% de la cual es agua subterránea. Actualmente, 26 países se definen con déficit hídrico y la mayoría de ellos tiene una alta tasa de crecimiento poblacional, de estos 26 países, 9 están en el Medio Oriente (Perea et al., 2017; Jafari et al., 2018; Schwabe et al., 2013).

Existen prácticas de fertilización para optimizar la calidad de la tierra, así como de irrigación para reducir el uso hídrico. Además, se utilizan plaguicidas para controlar las plagas que pueden afectar al cultivo. Estos métodos aumentan el rendimiento del cultivo, sin embargo, inducen una gran cantidad de desechos, contaminan fuertemente el agroecosistema y afectan la calidad de los cultivos. Por lo tanto, con el objetivo de aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos, así como proteger el medio ambiente, se han empezado a utilizar Tecnologías de Información (TI) en la agricultura. Esto es llamado Agricultura de Precisión (AP) y está enfocada a producir beneficios inmediatos ahorrando recursos y siendo amigables con el medio ambiente (Koutsos & Menexes, 2017; Yost et al., 2017). Cuando se trabaja bajo un esquema de AP, los diferentes datos del terreno cultivado se recolectan para evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar el uso de fertilizantes, mejorar la gestión del recurso hídrico, predecir con más exactitud la producción de los cultivos y la calidad del producto final, así como también optimizar los rendimientos a través de prácticas de cosechas automatizadas (Echeverría, 2015). Del mismo modo, el uso de estas tecnologías contribuye a una adecuada toma de decisiones, desde el punto de vista del manejo técnico-productivo, económico y ambiental (Best & Zamora, 2008).

De manera más exacta, el término Agricultura de Precisión implica optimizar la calidad y cantidad de un cultivo, minimizando el costo a través del uso de Tecnologías de Información más eficientes para reducir la variabilidad de un proceso específico, en forma ambientalmente limpia (Ashwini, 2017). En lugar de administrar un predio completo en función de una condición promedio hipotética, que puede no existir en ningún lugar del campo, un enfoque de AP reconoce las diferencias específicas del sitio y ajusta las acciones en consecuencia (Tripathi et al., 2018).

La AP utiliza diversos tipos de tecnologías para su implementación, entre las cuales se puede destacar (i) Sistemas de Posicionamiento Global, más conocido por sus siglas en inglés; GPS - Global Positioning System-; (ii) Sistemas de Información Geográfica -SIG-; (iii) vehículos aéreos no tripulados -UAV - ; y (iv) uso de redes móviles (Fan et al. 2014) y de otros medios electrónicos para obtener datos del cultivo. Se presenta como principal ventaja el análisis del rendimiento en cada sector del predio, y de esta manera ajustar el manejo de insumos dentro de cada uno (Marote, 2010).

Aunque el uso de AP es una gran ayuda para los agricultores que deben optimizar recursos, su tasa de adopción aún resulta baja (Melchiori, Albarenque, & Kemerer, 2013; Mcconnell, 2019; Pathak, Brown & Best, 2019). Entre los factores que explican esta situación se encuentra la diversidad de soluciones tecnológicas ofrecidas en el mercado (Pignatti, Carli & Canavari, 2015). Éstas cumplen diferentes funciones y se pueden combinar entre ellas, aunque no todas son compatibles entre sí,

por lo que se debe tener un conocimiento mínimo acerca de su funcionamiento (Higgins et al., 2017). Cada situación, con variables propias como suelo, tipo de cultivo, agua, entre otros, presenta una gestión única, por lo que no todas las TI ayudarán a determinar las causas de la variabilidad, y sería costoso implementarlas todas de inmediato. Utilizar un enfoque incremental es una mejor estrategia, utilizando una o dos herramientas a la vez y evaluando cuidadosamente los resultados (Tripathi et al., 2018).

Otros autores (Pierpaoli et al., 2013; Mintert et al., 2016) complementan esta información indicando que hay factores a considerar en la implementación de tecnologías de AP, por ejemplo: tamaño del campo, costo de implementar la tecnología, ingresos totales, educación de los agricultores, familiaridad con las computadoras.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la elección de la TI a utilizar para implementar AP resulta ser una decisión compleja. Además, hay que tener en cuenta que una decisión incorrecta conlleva pérdida de recursos y tiempo que son indispensables para una producción eficiente. Debido a esto, se decidió estudiar las TI usadas en la Agricultura de Precisión junto con criterios de comparación y selección, además, de los contextos en los que han sido utilizadas con el fin de identificar criterios de generalización en una implementación de AP.

En esta tesis se presenta la propuesta de crear un Framework que recoja el conocimiento existente en experiencias de la literatura, sitios Web dedicados al tema y expertos del área, de modo que en base a él puedan generarse sugerencias respecto a la TI más adecuada según las circunstancias particulares de una implementación de AP como el cultivo, necesidad del terreno, entre otros.

Un Framework, que simule la opinión de expertos en el área de AP y guíe el proceso para seleccionar la tecnología adecuada, sería de gran utilidad para apoyar la adopción de tecnologías de la Agricultura de Precisión, que como se mencionó a pesar de los grandes beneficios que trae, su tasa de adopción es baja. Además, esta herramienta serviría como guía para la formación de diferentes expertos en el área, por ejemplo, estudiantes, agricultores interesados en incorporar tecnologías y proveedores de alguna de las TI, entre otros.

1.2 Hipótesis

El uso de un Framework que provea alternativas tecnológicas que implementen Agricultura de Precisión mejora el proceso de selección de las TI dadas condiciones y restricciones específicas.

1.3 Objetivo General

El objetivo general de esta investigación es: “Construir un Framework que permita comparar y seleccionar las Tecnologías de Información que pueden usarse en una implementación de AP, dadas ciertas condiciones y restricciones específicas”.

1.4 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general de esta tesis, se han definido los siguientes objetivos específicos.

- Realizar una Revisión Sistemática de la Literatura y búsqueda de sitios Web dedicados sobre implementaciones de Agricultura de Precisión que permitan identificar variables de implementación tales como: TI usada, datos capturados, información generada, beneficios, decisiones apoyadas, entre otras.

- Identificar y definir reglas de generalización respecto de las relaciones existentes entre las variables de implementación encontradas en el objetivo anterior.
- Construir un Framework que permita comparar las Tecnologías de Información y que refleje las relaciones entre variables de implementación identificadas anteriormente.
- Crear un prototipo que permita usar el Framework interactivamente, como guía de implementación de un proyecto de Agricultura de Precisión.
- Validar el Framework a través de una prueba de concepto que permita comprobar su utilidad.

1.5 Alcance de la Investigación

La investigación se centró en la Agricultura de Precisión y Tecnologías de Información utilizadas actualmente con el fin de crear un Framework que facilite la toma de decisiones al momento de elegir qué TI usar para monitorear los diferentes procesos de algún cultivo. El Framework presentará propuestas según las variables de implementación identificadas en este estudio. Se creará un prototipo que permita usar el Framework de manera interactiva y se empleará en una prueba de concepto en que se compararán las TI elegidas por el Framework respecto de aquellas sugeridas por un grupo de expertos.

Cabe destacar que, en esta prueba de concepto, solo se verificará frente a un panel de expertos si las soluciones de implementación elegidas son apropiadas, pero no se instalarán ni se podrán en funcionamiento. Además, los cultivos y criterios que aborde el Framework se determinarán según los encontrados en la literatura.

El Framework a construir se basará en la información de experiencias de implementación documentadas en la literatura, así como de aquellas registradas en la industria.

1.6 Organización de la Tesis

- **Capítulo 2:** cubre la descripción de las metodologías de trabajo utilizadas durante la investigación. Específicamente, se aborda la Revisión Sistemática de la Literatura, luego se describe el desarrollo de Encuestas. Posteriormente, se explica la función del Prototipo y finalmente se encuentra la definición de Prueba de Concepto.
- **Capítulo 3:** detalla el estado del arte. Primero, se presentan los resultados generales de Revisión Sistemática de la Literatura. Luego, se describe con mayor profundidad el concepto de Agricultura de Precisión. Posteriormente, se responden las interrogantes planteadas en la investigación. Después, se entregan detalles de la Revisión de la Industria realizada. Finalmente, se presentan la discusión y conclusiones.
- **Capítulo 4:** se dedica a la descripción de todo el proceso que se llevó a cabo para la generación del Framework. Primero, se identifican los criterios a utilizar en una implementación de AP, para luego presentar la propuesta inicial del Framework. Posteriormente, se procede a documentar el desarrollo de la encuesta cuyo objetivo fue la ratificación de criterios incluidos en el Framework. Finalmente, se detalla la propuesta final del Framework.
- **Capítulo 5:** se documenta el diseño y construcción del prototipo de herramienta que ha sido desarrollado para facilitar el uso del Framework.

- **Capítulo 6:** abarca la validación realizada respecto de las respuestas que entrega el Framework, la cual fue realizada por medio de una prueba de concepto. Primero, se especifica la prueba de concepto realizada y luego se presenta la discusión y conclusiones.
- **Capítulo 7:** se entregan las conclusiones de la investigación, las cuales incluyen el análisis de los objetivos propuestos y cumplidos; el principal aporte de la investigación; los trabajos futuros; y finalmente se muestra el contraste de los resultados.

Capítulo 2

Metodología de Trabajo

En este capítulo se presenta la metodología de trabajo utilizada para el desarrollo de esta tesis. Esta contempla una serie de actividades que incluyen diferentes métodos de investigación. Tal como se muestra en la Figura 1, se desarrollaron 9 actividades que se explican brevemente a continuación.

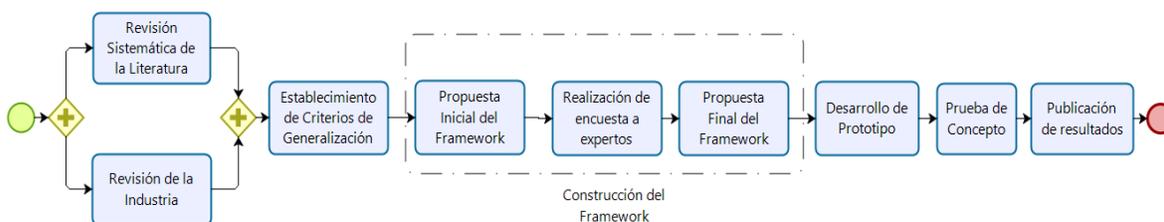


Figura 1: Metodología de trabajo

- **Revisión Sistemática de la Literatura (RSL):** Se realiza con el propósito de adquirir conocimiento sobre las principales Tecnologías de Información usadas en la Agricultura de Precisión e implementaciones realizadas con ellas, además, obtener criterios de comparación y selección que permitan guiar una implementación de Agricultura de Precisión.
- **Revisión de la industria:** Se realiza una búsqueda de páginas Web con el fin de obtener información relevante sobre las TI.
- **Establecimiento de criterios de generalización:** A partir de la RSL y la Revisión de la Industria se identifican criterios de generalización de una implementación de Agricultura de Precisión.
- **Construcción del Framework:** Usando como base los criterios de generalización se construye el Framework. Consta de tres actividades. Primero, el desarrollo de una Propuesta Inicial del Framework. Segundo, la Realización de encuesta a expertos en la industria con el objetivo de ratificar los criterios necesarios en una implementación de Agricultura de Precisión. Por último, la entrega de la Propuesta Final del Framework.
- **Desarrollo de Prototipo:** Se realiza con el fin de usar el Framework interactivamente.
- **Prueba de Concepto:** Se validan los resultados de la investigación por medio de esta herramienta.
- **Publicación de Resultados:** Se comparte con la comunidad los resultados obtenidos en la presente tesis.

El resto de este capítulo se enfoca en describir cada uno de los métodos de investigación utilizados durante el desarrollo de esta tesis. De este modo, en la sección 2.1 se describe la Revisión Sistemática de la Literatura, en la sección 2.2 se explican el desarrollo de Encuestas, en la sección 2.3 se describen el Prototipo para implementar el Framework. Finalmente, en la sección 2.4 se abordan las Pruebas de Concepto.

2.1 Revisión Sistemática de la Literatura

De acuerdo con (Kitchenham & Charters, 2007) una Revisión Sistemática de la Literatura es un medio para evaluar e interpretar todo el conocimiento disponible y relevante para una determinada pregunta de investigación, área temática o fenómeno de interés. El objetivo de una RSL es presentar una evaluación exhaustiva de un tema de investigación utilizando una metodología confiable, rigurosa y verificable (Fisch & Block, 2018).

Una RSL difiere de revisiones de la literatura tradicionales principalmente porque se planifican formalmente y se ejecutan de manera sistemática y metódica. Una buena revisión sistemática debe ser replicable de forma independiente, lo que le da un mayor valor científico, además, al encontrar, evaluar y resumir toda la evidencia disponible sobre un tema específico de investigación, se puede obtener un alto nivel de validez por medio de sus conclusiones (Genero, Cruz-Lemus & Plattini, 2014).

A continuación, se explica el proceso para realizar una RSL que consta de tres actividades principales: Planificación de la revisión, Desarrollo de la revisión y, por último, Publicación de los resultados (Genero, Cruz-Lemus & Plattini, 2014; Kofod-petersen, 2014). Además, se puede observar en la Tabla 1 las subactividades de estas actividades principales.

Etapas	Actividades
Etapa 1	Planificación de la Revisión
1.1	Identificación de la necesidad de revisión
1.2	Formulación de las preguntas de investigación
1.3	Definición de protocolo de revisión
1.4	Validación de protocolo de revisión
Etapa 2	Desarrollo de la Revisión
2.1	Identificar la investigación relevante
2.2	Selección de estudios primarios
2.3	Extracción de datos relevantes
2.4	Síntesis de datos extraídos
Etapa 3	Publicación de los Resultados

Tabla 1: Proceso para realizar una Revisión Sistemática de la Literatura

2.1.1 Planificación de la Revisión

Esta etapa tiene como objetivo especificar los parámetros más importantes que serán tomados en cuenta cuando se realice la búsqueda y revisión de trabajos. Se establecerán las razones por las que se llevará a cabo la investigación, la forma en que se buscarán los trabajos y cómo serán revisados. La planificación se divide en cuatro tareas:

- **Identificación de la necesidad de la revisión:** surge de la necesidad de resumir toda la información relevante sobre un tema de interés.
- **Formulación de las preguntas de investigación:** la especificación de estas preguntas dirigirá todo el proceso de revisión. En el proceso de búsqueda se deben seleccionar los estudios que sirvan para responderlas; en el proceso de revisión se deben extraer los datos necesarios para responderlas; en el proceso de análisis de datos éstos se deben sintetizar de tal manera que las preguntas puedan ser respondidas.
- **Definición del protocolo de revisión:** un protocolo de revisión sistemática es un plan formal y concreto, que debe definirse para reducir sesgos. Después de realizar el proceso de búsqueda, se leerán y examinarán los documentos resultantes. A continuación, se describen los principales elementos que debe tener el protocolo de revisión.

- **Antecedentes y preguntas de investigación:** se debe justificar la relevancia de la necesidad de llevar a cabo la revisión. Se debe utilizar información extraída en la tarea previa “Identificación de la necesidad de la revisión”, además, incluir las preguntas de investigación definidas previamente.
- **Estrategia de búsqueda:** requiere definir la cadena de búsqueda, el periodo de búsqueda y las fuentes de búsqueda.
- **Criterios de selección de estudios:** los criterios de inclusión y exclusión se deben definir con el objetivo de identificar los estudios que muestren evidencia con respecto a las preguntas de investigación.
- **Procedimiento para la selección de estudios:** se indica cómo son aplicados los criterios de inclusión y exclusión, considerando o no, por ejemplo, la lectura de los artículos completos o solo el resumen.
- **Estrategia para la extracción de datos y registro:** se diseña un formulario de extracción de datos que contenga toda la información relevante para responder las preguntas de investigación.
- **Validación del protocolo de revisión:** es conveniente que el protocolo de revisión sea evaluado por expertos. En el caso de estudiantes pueden presentar el protocolo a sus directores para que lo evalúen.

2.1.2 Desarrollo de la Revisión

En esta etapa se pone en práctica todo lo planificado en el protocolo y se obtienen los resultados finales que responderán a las preguntas de investigación. A continuación, se describen las tareas a realizar en esta actividad:

- **Identificar la investigación relevante:** Siguiendo la estrategia de búsqueda definida se identifica el conjunto de publicaciones relevantes para responder a las preguntas de investigación.
- **Selección de estudios primarios:** Siguiendo lo planificado en el protocolo con respecto a criterios y procedimientos de selección de estudios establecidos se localizan los estudios primarios que muestren evidencia relacionada con las preguntas de investigación.
- **Extracción de datos relevantes:** Se rellena el formulario de extracción de datos definido en el protocolo. Como resultado de esta tarea se obtendrán los formularios rellenos con la información correspondiente a cada estudio seleccionado.
- **Síntesis de datos extraídos:** Se sintetizan los datos extraídos en la actividad anterior, a modo de dar respuesta a las preguntas formuladas. La síntesis es comúnmente acompañada de tablas y gráficos para ilustrar los resultados.

2.1.3 Publicación de Resultados

Finalmente, se realizará un informe que refleje todo el proceso de revisión considerando el medio de divulgación seleccionado al definir el protocolo (Genero, Cruz-Lemun & Plattini, 2014).

2.1.4 Aplicación y Resultados de la Revisión Sistemática de la Literatura

La planificación de la RSL desarrollada durante esta investigación puede ser encontrada, en el Anexo A. Por otro lado, los resultados obtenidos se encuentran a lo largo del Capítulo 3.

2.2 Encuesta

Las encuestas son, probablemente, el método de investigación más utilizado por todo el mundo. Una encuesta es un método empírico que se utiliza para recopilar información de personas para describir, comparar o explicar su conocimiento, actitudes o comportamiento (Genero, Cruz-Lemus & Plattini, 2014; Martín, 2011). Las encuestas están formadas por una serie de actividades bien definidas (Kitchenham & Pfleeger, 2008) que se enumeran a continuación:

- Establecimiento de los objetivos de la encuesta.
- Diseño de la encuesta.
- Desarrollo del cuestionario
- Evaluación y validación del cuestionario.
- Obtención de los datos de la encuesta.
- Análisis de los datos obtenidos.
- Reporte de los resultados.

A continuación, se explican las actividades recién mencionadas.

2.2.1 Establecimiento de los objetivos de la encuesta

Establecer los objetivos es siempre el primer paso de una encuesta (Genero, Cruz-Lemus & Plattini, 2014; Jones, Baxter & Khanduja, 2013). Cada objetivo debería establecerse como una frase relativa a los resultados esperados tras realizar la propia encuesta. Los objetivos deben ser lo más claros posibles y han de poder medirse. Éstos determinarán la mayoría del resto de actividades del proceso de realización de encuestas, de ahí que deban establecerse cuidadosamente.

2.2.2 Diseño de la encuesta

Existen distintos tipos de diseño de encuestas, principalmente se encuentran las encuestas transversales donde se pide información a los participantes en un instante determinado; por otro lado, están las encuestas longitudinales que tratan de conocer la evolución a través del tiempo de una determinada población. Otros tipos más complejos son diseños que comparan poblaciones diferentes u otros que pretenden medir el impacto de un cambio.

Un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de diseñar una encuesta es como se va a administrar (Genero, Cruz-Lemun & Plattini, 2014). Existen diversos instrumentos para recolectar los datos, uno de los más utilizados es el cuestionario, que puede ser entregado a los encuestados de forma impresa o digital (vía internet).

2.2.3 Desarrollo del cuestionario

Una encuesta pretende obtener respuestas sobre una serie de preguntas por una razón determinada (Genero, Cruz-Lemun & Plattini, 2014). Por tanto, a la hora de diseñar un cuestionario conviene

partir del objetivo de la investigación. A continuación, se comentan las distintas tareas a llevar a cabo para desarrollar correctamente un cuestionario:

- **Consulta de la literatura relevante:** se trata de identificar cuestionarios o cualquier método de recolección que se han llevado a cabo con anterioridad sobre el mismo tema, además, será de gran ayuda conocer cómo se han conseguido los datos en estos estudios previos, si es que los hay.
- **Tipos de preguntas:** se pueden encontrar dos tipos de preguntas: abiertas o cerradas. Una pregunta abierta permite al encuestado expresar la respuesta utilizando sus propias palabras, mientras que una pregunta cerrada proporciona una lista de posibles respuestas a la pregunta.
- **Diseño de las preguntas:** es necesario pensar detenidamente cómo se quieren plantear las preguntas. Éstas han de ser precisas, carentes de ambigüedad y perfectamente comprensibles por parte de todas las personas que vayan a responderlas.
- **Diseño de las respuestas:** las respuestas a las preguntas de un cuestionario suelen ser alguna de las siguientes: valores numéricos, categorías, respuestas SI/NO o escalas ordinales.
- **Formato de los cuestionarios:** para conseguir que el aspecto de los cuestionarios no introduzca complejidad innecesaria a la encuesta se tienen recomendaciones tales como dejar un espacio para que los participantes dejen sus comentarios sobre el cuestionario, usar espacio entre las distintas preguntas o el enfatizar la información que lo requiera mediante el uso de negritas, subrayado y mayúsculas. También es importante el orden en que se plantean las preguntas (Kitchenham & Pflieger, 2008).
- **Motivación:** se debe conseguir motivar a los participantes para que respondan de manera fiel a una encuesta en la que, en la mayoría de los casos, no han pedido participar.

2.2.4 Evaluación y validación del cuestionario

Una vez se han definido las preguntas del cuestionario, es esencial que se evalúe. En esta actividad se pretenden diversos objetivos (Kitchenham & Pflieger, 2008):

- Comprobar que las preguntas se entienden correctamente.
- Evaluar el índice probable de respuestas.
- Evaluar la fiabilidad y validez del cuestionario, a través de grupos de discusión y/o de estudios pilotos.
- Comprobar que el método de análisis de datos que se utilizará será compatible con las respuestas que se van a obtener.

2.2.5 Obtención de los datos de la encuesta

A la hora de conseguir los datos, normalmente es imposible contar con las respuestas de toda la población implicada en el estudio, de ahí que se haya que recurrir a una muestra de la misma (Genero, Cruz-Lemus & Plattini, 2014). Además, se debe indicar la tasa de respuesta de la encuesta.

Encontrar un compromiso entre el tamaño de la muestra y la tasa de respuesta de la encuesta no es un proceso sencillo. Conviene utilizar los recursos con los que se cuente, como enviar recordatorios en listas de correo, llegado el caso, individualmente a aquellos participantes potenciales que aún no hayan completado los cuestionarios.

2.2.6 Análisis de los datos obtenidos

Una vez llevada cabo la encuesta es el momento de analizar los resultados obtenidos (Genero, Cruz-Lemus & Plattini, 2014). Los puntos más importantes a considerar son la validación de los datos obtenidos, que sean completos y consistentes, la posible división de las respuestas en grupos homogéneos en función de la información demográfica que se ha obtenido de los participantes y el análisis de los datos propiamente tal, ya sean numérico, ordinales o nominales.

2.2.7 Reporte de los resultados

En la mayoría de las ocasiones, se tratará de publicar la información generada durante la realización de la encuesta y el análisis de sus resultados en alguna revista o congreso o incluso como un informe técnico asociado a algún proyecto de investigación.

2.2.8 Aplicación y Resultados de la Encuesta

La encuesta fue diseñada usando Adobe Acrobat. Capturas de pantalla de las preguntas consideradas en la encuesta pueden ser encontradas en el Anexo C. Por otro lado, el reporte de los resultados de la encuesta puede ser encontrado en la Sección 3 del Capítulo 4.

Cabe destacar que se utilizó una encuesta de tipo transversal auto-administrada. La validación del cuestionario se realizó con los directores de tesis, además se realizó un estudio piloto por medio de la realización de la encuesta a un grupo reducido de personas en la modalidad de entrevistas personales.

2.3 Prototipo

Un prototipo es una versión inicial de un sistema de software que se utiliza para demostrar conceptos, probar opciones de diseño y obtener más información sobre el problema y sus posibles soluciones (Sommerville, 2011; Ogedebe & Jacob, 2012). En el caso de un Framework, se desarrolla un prototipo con el objetivo de que los usuarios puedan interactuar con él de una forma más sencilla. Así, los usuarios pueden verificar resultados y validarlos. Existen diversos tipos de prototipo; éste será específicamente un sistema de recomendación. Los sistemas de recomendación son herramientas y técnicas de software que permiten sugerir ítems de interés a los usuarios. Estos sistemas están principalmente orientados a usuarios que carecen de la suficiente experiencia personal o competencias para evaluar un número potencialmente abrumador de ítems, como ocurre por ejemplo en sitios Web (Ricci, Shapira & Rokach, 2015). Estos ítems pueden corresponder a productos de consumo regular, tales como música, películas y libros, en cuyo caso se suele utilizar información histórica del usuario (qué música ha escuchado antes) para identificar sus preferencias y en base a ello generar las sugerencias, utilizando técnicas basadas en contenido y filtrado colaborativo.

También es posible producir recomendaciones para ítems cuyo consumo no es regular, para los cuales es difícil obtener o no existe información histórica de consumo. En este caso, se utiliza un enfoque de recomendación basado en conocimiento (Felfernig, 2007), el cual permite generar sugerencias en base, por ejemplo, a reglas de selección acordes a las necesidades del usuario. Estas reglas se construyen a partir de conocimiento experto en el dominio.

Una ventaja de los sistemas de recomendación es que no sufren del problema de arranque en frío, es decir, no requieren de información previa sobre preferencias de usuarios respecto de los ítems a

recomendar, ya que los requerimientos sobre los ítems de interés se solicitan durante la sesión de recomendación. Por otro lado, estos sistemas requieren de un cuidadoso trabajo de explicitación y codificación del conocimiento de expertos del dominio, en una representación que permita su posterior uso en el proceso de recomendación.

Un tipo particular de Sistema de Recomendación basado en Conocimiento son el Sistema basado en Restricciones, el cual explota bases de conocimiento, las que contienen reglas explícitas para relacionar necesidades del usuario con propiedades de los ítems, permitiendo recomendar aquellos ítems cuyas propiedades son compatibles con dichas necesidades (Felfernig & Burke, 2008).

2.3.1 Aplicación y Resultados del Sistema de recomendación

El desarrollo del prototipo mediante un Sistema de Recomendación basado en Conocimiento se encuentra en el Capítulo 5.

2.4 Prueba de concepto

Una prueba de concepto es la implementación de un determinado método con el propósito de verificar que el concepto o idea es susceptible de tener éxito. Puede referirse a cualquier idea que puede aplicarse a una clase de fenómenos. La prueba parece ser una posibilidad que se demuestra que se obtiene en la práctica experimental (Kendig, 2016).

La prueba puede ser un experimento o conjunto de experimentos que están destinados a representar un caso de prueba para el marco teórico hipotético (por ejemplo, se produce la entrada dada por p y q). Si la prueba o el experimento ejemplar muestra que p produce q , se denomina prueba de que p puede producir q . Al hacerlo el experimento afirma la hipótesis universal, “si p , entonces q ”, al mostrar que en al menos un caso A) dado p , q se produce. La prueba es en el fondo una prueba de posibilidad por medio de un caso real (Kendig, 2016).

2.4.1 Aplicación y Resultados de la Prueba de Concepto

La prueba de concepto se utilizará para la validación del Framework con el apoyo de expertos en el área de la Agricultura de Precisión. Los resultados obtenidos se encuentran en el Capítulo 6.

Capítulo 3

Estado del Arte

En este capítulo se presentan los resultados de la Revisión Sistemática de la Literatura, realizada con la metodología especificada en la Sección 2, los cuales entregan el estado del arte, en el cual se basará la propuesta de esta tesis.

En la Sección 3.1 se presentan los resultados generales de la RSL; la Sección 3.2 da un breve resumen de qué se entiende por Agricultura de Precisión; en las secciones 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 se presenta el estado del arte dando respuesta a las siguientes interrogantes de investigación: ¿qué tecnologías de información se utilizan en la Agricultura de Precisión?, ¿qué implementaciones de la Agricultura de Precisión registra la literatura?, ¿qué criterios existen para comparar y seleccionar las tecnologías usadas? y ¿existe algún Framework que guíe la implementación de la Agricultura de Precisión? Finalmente, en la Secciones 3.6 y 3.7 se muestran la discusión del estado del arte y las conclusiones respectivamente.

3.1 Resultados Generales de la RSL

A continuación, se presentan los aspectos más relevantes de la RSL desarrollada y los resultados generales de ésta. El detalle de la planificación se encuentra en el Anexo A.

Primero, se plantearon cuatro preguntas de investigación, estas están orientadas a incentivar o contrastar la hipótesis de la tesis, que era: “El uso de un Framework que provea alternativas tecnológicas que implementen Agricultura de Precisión mejora el proceso de selección de las TI dadas condiciones y restricciones específicas”. Las preguntas son las siguientes:

1. ¿Qué tecnologías se utilizan en la Agricultura de Precisión?
2. ¿Qué implementaciones de la Agricultura de Precisión registra la literatura?
3. ¿Qué criterios existen para comparar y seleccionar las tecnologías usadas?
4. ¿Existe algún Framework que guíe la implementación de la Agricultura de Precisión?

Las preguntas de investigación 1,2 y 3 son consistentes con el objetivo general, es decir, recolectan la información básica de tecnologías, implementaciones y criterios que permitan la selección de TI de Agricultura de Precisión y posteriormente la creación de un Framework. Mientras que la pregunta 4, busca otras propuestas de la literatura para contrastar la propuesta de investigación.

En base a las preguntas de investigación, se determinó un conjunto de nueve términos, tanto en inglés como en español, que se utilizaron en la búsqueda de la literatura, son los siguientes en inglés: “Intelligent Agriculture”, “Precision Agriculture”, “Technologies”, “Implementation”, “Comparison”, “Selection”, “Analysis”, “Decision” y “Framework”. Por otro lado, en español fueron: “Agricultura Inteligente”, “Agricultura de Precisión”, “Tecnologías”, “Implementación”, “Comparación”, “Selección”, “Análisis”, “Decisión” y “Marco de Trabajo”. Luego se combinaron los términos, en cuatro combinaciones en inglés y cuatro en español, los cuales se usaron en las siguientes fuentes bibliográficas: Google Scholar, Scopus, Springer, Science Direct y National Agricultural Library. Cabe mencionar que se utilizó un buscador general como Google Scholar debido a la cobertura tan diversa de fuentes de información que ofrece, además, provee una mayor cantidad de publicaciones en español.

Con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos, fueron realizados algunos refinamientos adicionales en algunas de las fuentes: específicamente en Scopus se limitó el área temática a Ciencias de la Computación y en Google Scholar se excluyeron las patentes y citas. Además, para obtener información actual del tema solo se consideraron publicaciones del año 2010 en adelante.

Posteriormente, se realizó una búsqueda por cada combinación en cada fuente especificada en el protocolo de búsqueda, lo que en total sumó 40 búsquedas distintas. Sin embargo, debido a que existe una enorme cantidad de publicaciones de AP, se limitó a revisar 200 publicaciones por cada búsqueda. Sin embargo, 20 de éstas entregaron menos de 200 resultados y, entre esas, 15 no entregaron ninguno. Se encontraron 3.949 artículos en total, los que fueron sometidos a una revisión parcial, es decir, a una lectura del resumen, introducción y conclusiones, con el objetivo de encontrar los potencialmente útiles, los cuales fueron 1.242. Después se procedió a eliminar los documentos repetidos, obteniendo un total de 863 artículos distintos. Consecutivamente, se realizó un análisis más detallado, donde se encontró que 593 de los artículos potencialmente útiles no eran relevantes para la investigación actual, porque no respondían ninguna de las preguntas de investigación, así que fueron descartados, dejando un total de 259 artículos útiles y aceptados. La Figura 2 muestra de forma gráfica este proceso. Además, una lista conteniendo todas las referencias de los artículos aceptados puede ser encontrada en <http://colvin.chillan.ubiobio.cl/mcaro/cisternas/>.

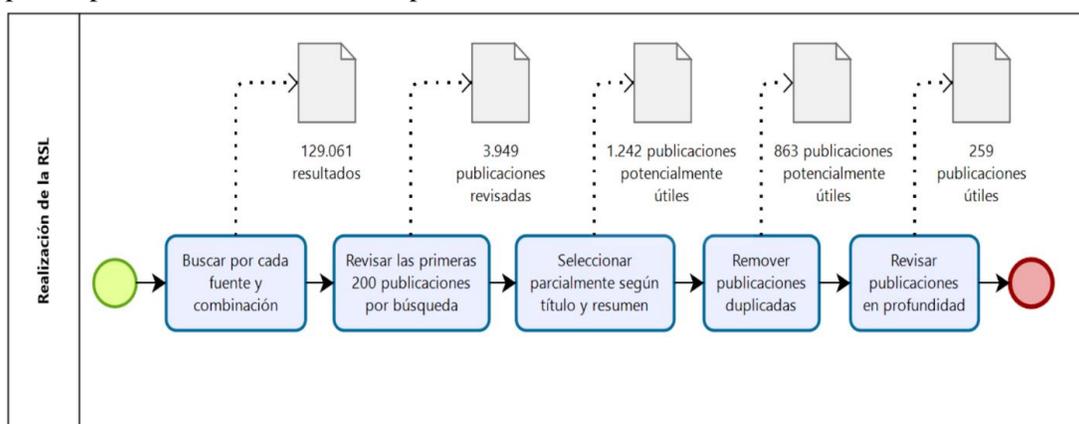


Figura 2: Proceso de realización de la RSL

Todas las publicaciones seleccionadas contestan al menos una de las preguntas de investigación. En la Tabla 2 se muestra la cantidad de publicaciones que contestan cada pregunta. Debido a que la primera pregunta es más general, casi todas las publicaciones seleccionadas la contestan de cierto modo. Las demás preguntas son crecientemente más específicas, por lo que se encontraron menos publicaciones que las contestaran.

ID	Pregunta de Investigación	Cantidad de Publicaciones
P1	¿Qué tecnologías se utilizan en la Agricultura de Precisión?	257
P2	¿Qué implementaciones de la Agricultura de Precisión registra la literatura?	122
P3	¿Qué criterios existen para comparar y seleccionar las tecnologías usadas?	19
P4	¿Existe algún Framework que guíe la implementación de la Agricultura de Precisión?	0

Tabla 2: Artículos aceptados divididos por cada pregunta de investigación

En la Figura 3 se muestran las relaciones entre los conjuntos de publicaciones que contestan a cada pregunta. Por ejemplo, en (Smiljkovikj & Gavrilovska, 2014) se presenta la implementación de GPS en un campo de maíz y, además, se desarrolla un sistema de información. Esta publicación aborda tanto la pregunta de investigación P1 como P2, pues identifica las tecnologías usadas y también realiza una implementación de AP. Se debe resaltar que no se logró encontrar ninguna publicación que propusiera un Framework que guiara la implementación de AP.

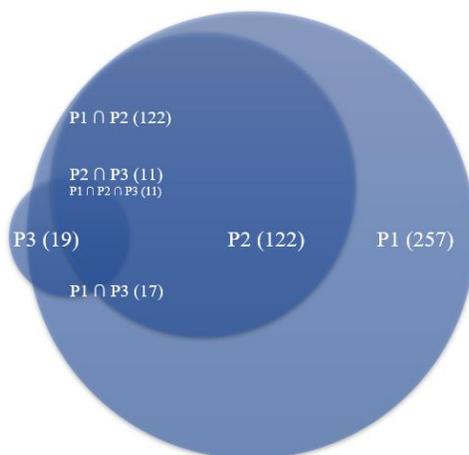


Figura 3: Relaciones entre los conjuntos de publicaciones que contestan a cada pregunta de investigación

A continuación, se describe el estado del arte, partiendo por el concepto de Agricultura de Precisión y luego se responden las preguntas de investigación, todo ello basado en los resultados de la RSL.

3.2 Agricultura de Precisión

La Agricultura de Precisión es una estrategia de administración que utiliza tecnologías de información y las comunicaciones para recolectar datos útiles desde distintas fuentes con el fin de apoyar decisiones asociadas a producción de cultivos. Consiste en reconocer, localizar, cuantificar y registrar la variabilidad espacial y temporal de cada unidad agrícola, de esa manera es posible proporcionar un manejo agronómico diferenciado en cada sitio específico (Salcedo & Carvajal, 2011). La idea emergió a principios de la década de 1980 y se caracteriza por ayudar a utilizar recursos eficientemente, reducir el aporte de capital innecesario, reducir la contaminación ambiental y obtener el beneficio en el área económica, social y ambiental (Min et al., 2011; Li & Chunjiang, 2010).

La Agricultura de Precisión incluye todas las prácticas de producción agrícola que usan la informática para ajustar el uso de insumos de modo tal que permita obtener el producto deseado, o para monitorear dicho resultado, por ejemplo, tecnologías de dosis variable, monitores de rendimiento, uso de sensores, entre otros (Marote, 2010). Las tecnologías que utiliza la Agricultura de Precisión la constituyen tanto dispositivos hardware como sistemas de software que procesan los datos capturados por distintos dispositivos y entregan la información necesaria para la toma de decisiones. Las prácticas de la AP agrupan el conjunto de tecnologías en tres etapas diferentes, descritas a continuación y mostradas gráficamente en la Figura 4.

- **Recolección de datos:** Esta primera etapa se caracteriza por el monitoreo de los factores del cultivo, del suelo y del clima. Posteriormente se obtienen los datos relevantes para su posterior análisis; estos datos pueden ser: humedad, temperatura, textura, nutrientes, color, entre otros.
- **Procesamiento e interpretación:** Los datos capturados en la etapa anterior se pueden almacenar para su posterior procesamiento e interpretación. Con los resultados obtenidos se puede evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar fertilizantes y otras entradas necesarias, y predecir con más exactitud la producción de los cultivos (Marote, 2010).
- **Aplicación de insumos:** Después de haber interpretado la información recolectada, se pueden aplicar los insumos correspondientes con el fin de aumentar o disminuir los índices de diversos factores climáticos, del suelo o del cultivo.

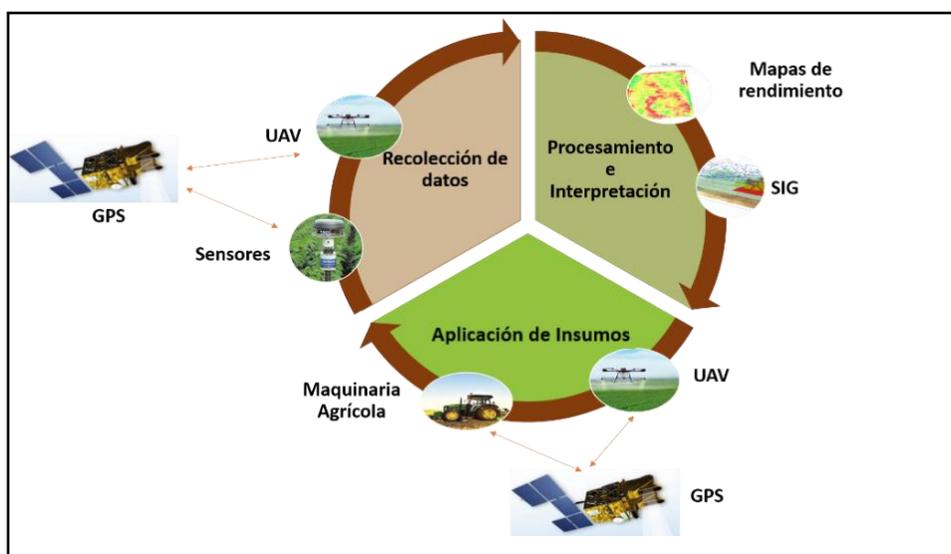


Figura 4: Clasificación de la TI usadas en AP

El beneficio que aporta la AP principalmente es la reducción del uso de agua, fertilizantes, herbicidas y pesticidas, además del equipo agrícola. En lugar de manejar un campo entero en base a alguna condición promedio hipotética, que puede que no exista en ningún lugar del campo, un enfoque de Agricultura de Precisión reconoce las diferencias específicas del sitio dentro de los campos y ajusta las acciones de gestión en consecuencia. La Agricultura de Precisión ofrece el potencial de automatizar y simplificar la recopilación y el análisis de la información. Permite que las decisiones de gestión se tomen e implementen rápidamente en áreas pequeñas dentro de los campos más grandes (Tripathi et al., 2018; Echeverría, 2015).

3.3 P1: ¿Qué tecnologías se utilizan en la Agricultura de Precisión?

Entre las publicaciones seleccionadas, 257 ayudan a contestar la primera pregunta de investigación. Esto se debe a que las tecnologías forman la base de la AP, proveyendo un punto de partida para las demás preguntas de investigación, por lo que han sido revisadas más recurrentemente en la literatura. Se han encontrado tanto TI como aplicaciones computacionales. Las TI son herramientas que se caracterizan por el tratamiento y la transmisión de la información. Mientras que las aplicaciones han sido desarrolladas para usar las tecnologías más eficientemente, vale decir, software, sistemas y técnicas que son complementarios al uso de TI. Éstos, generalmente necesitan utilizar las TI como prerequisite para capturar la información que es necesaria para su funcionamiento. Así, los resultados asociados a esta pregunta de investigación pueden dividirse en las TI y el software que hacen uso de ellas, ambos en el contexto de la Agricultura de Precisión. En la Figura 5 se muestran las relaciones entre los conjuntos de publicaciones que mencionan TI y software. Por un lado, la mayoría de las publicaciones se centraban en describir TI, mientras que otras solo mencionaban software. Por otro lado, varias de las publicaciones presentaban el uso tanto de TI como de software. Por ejemplo, (Stoorvogel, Kooistra & Bouma, 2015) pertenece a la intersección de conjuntos que usan tanto TI como software, pues menciona tanto sensores (una TI) como mapas de rendimiento (un software).

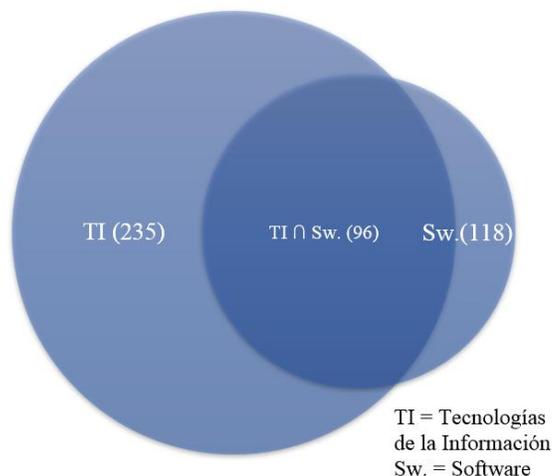


Figura 5: Relaciones entre los conjuntos de publicaciones que mencionan TI y Software

Se ha identificado un total 10 tecnologías diferentes por medio de la RSL. La función de estas TI es la de almacenar, recuperar, transmitir y manipular datos agrícolas, tales como datos del terreno, cultivo, condiciones ambientales, entre otros. En la Tabla 3, se presentan las tecnologías encontradas junto con el número de publicaciones que abordaron cada una de ellas. Cabe destacar que existen artículos que describieron más de una tecnología.

Tecnología	Número de Publicaciones
Sensores Remotos	112
GPS	99
WSN	46
UAV	38
Sensor General	37
VRT	30
Multimedia	9
UAS	9
Nanosensor	4
UGV	2

Tabla 3: Número de artículos por cada tecnología

Una descripción con más detalle se presenta a continuación:

- **Sensores remotos** (RS por las siglas de Remote Sensing): Sensores situados en satélites o aviones que engloban una serie de técnicas y procesos que permiten obtener una imagen de la superficie terrestre de forma remota, para posteriormente tratarla e interpretarla (Omran, 2017).
- **Sistema de Posicionamiento Global** (GPS, por las siglas de Global Positioning System): Sistema que permite determinar una posición tridimensional de alta precisión en tiempo real y en todo tiempo, información tridimensional de velocidad y tiempo, navegación de aplicaciones y posicionamiento para la superficie global y el espacio cercano a la Tierra. Este se encuentra integrado en otras tecnologías como sensores y drones (Yanna, 2012).
- **Redes de Sensores inalámbricos** (WSN, por las siglas de Wireless Sensor Network): Son sensores autónomos espacialmente distribuidos para monitorear condiciones físicas y ambientales, como temperatura, presión, humedad, entre otros. Puede desempeñar un papel muy importante en la realización de adquisición, procesamiento y controles de datos ininterrumpidos con una resolución espacial y temporal fina (Wang & Li, 2012).
- **Vehículo Aéreo No Tripulado** (UAV, por las siglas de Unmanned Aerial Vehicle): Comúnmente nombrado drone, es una aeronave que vuela para recopilar datos e imágenes requeridas (Gago et al., 2015).
- **Sensor general**: Algunos artículos no especificaron el tipo de sensor, sino que solo se describieron las condiciones que captaba como humedad, luz, temperatura, entre otros; por lo que se englobaron en sensor general (Nugroho et al., 2013).
- **Tecnología de Tasa Variable** (VRT, por las siglas de Variable Rate Technology): Describe cualquier tecnología que permita la aplicación variable de entradas, puede reducir el uso de insumos y los impactos ambientales (Nair, 2011).
- **Multimedia**: Objetos que permite obtener videos o imágenes para un análisis más simple, estos pueden ser teléfonos y cámaras (Sabzi, Abbaspour-Gilandeh & García-Mateos, 2018).
- **Sistema Aéreo No Tripulado** (UAS, por las siglas de Unmanned Aerial System): Es un paquete necesario para operar el sistema, incluye: UAV, cámara, GPS, software, entre otros (Van der Wal et al., 2013).

- **Nanosensores:** Son dispositivos extremadamente pequeños que se pueden unir a lo que quiera detectar y enviar una señal (Antonacci et al., 2018).
- **Vehículo Terrestre No tripulado (UGV,** por las siglas de Unmanned Ground Vehicle): Es un vehículo que opera mientras está en contacto con el suelo y sin una presencia humana a bordo. En general, el vehículo tendrá un conjunto de sensores para observar el entorno y tomará decisiones de forma autónoma acerca de su comportamiento o pasará la información a un operador humano en una ubicación diferente que controlará el vehículo a través de la teleoperación (Bacco et al., 2018).

Se puede ver que los distintos tipos de sensores, especialmente los remotos, son la tecnología más usada. Además, permiten la medición de múltiples parámetros diferentes, lo cual depende de los requerimientos del usuario. Por ejemplo, permiten capturar datos como la temperatura, la humedad, el pH, los nutrientes del suelo, el nivel del agua y la conductividad, entre otros (Kumar & Ilango, 2018).

En la Figura 6 se muestra la distribución de las publicaciones por cada año y por cada TI. Cabe destacar que el número de publicaciones al año se ha mantenido relativamente constante cada año.

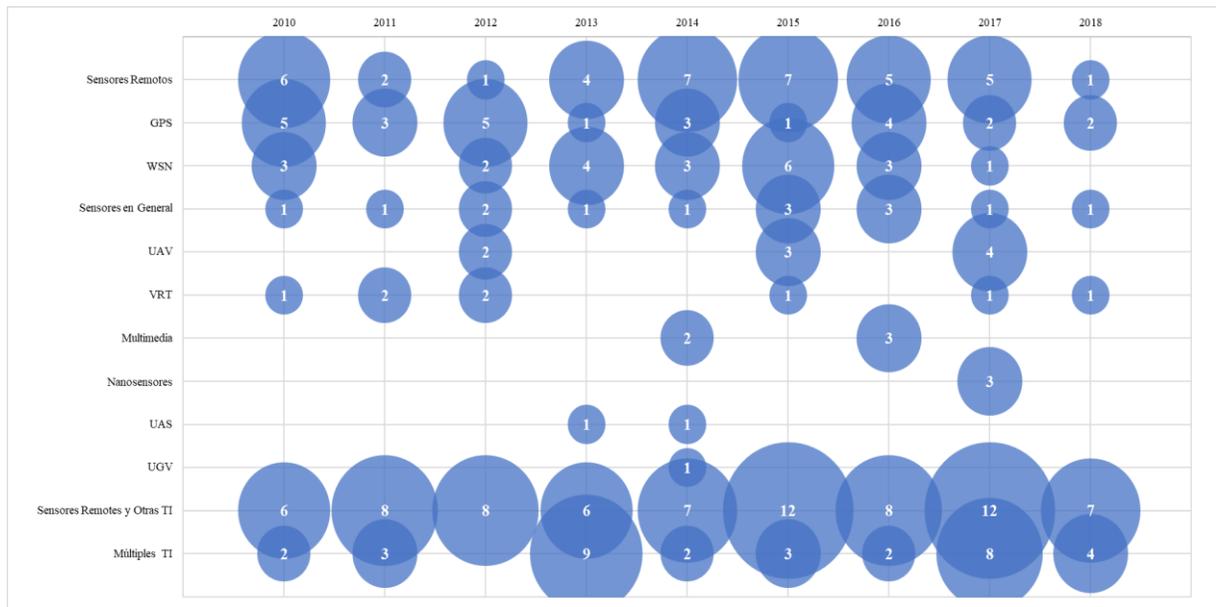


Figura 6: Distribución de publicaciones por año, en relación a las TI consideradas

Con respecto al software, sistemas o técnicas nombrados anteriormente se encontraron 7. Se caracterizan porque necesitan alguna TI que recupere los datos necesarios para poder ser utilizados. Éstos son los siguientes ordenados de mayor a menor según la cantidad de publicaciones que los nombraron:

- **Sistema de información geográfica (GIS,** por sus siglas en inglés): Son sistemas capaces de capturar, almacenar, analizar y mostrar información geográficamente referenciada de los cultivos (Yousefi & Razdari, 2015).
- **Mapas de rendimiento:** Proceso de recopilación de datos georreferenciados sobre el rendimiento y las características del cultivo. Se necesitan sensores y GPS para su desarrollo (Gemtos et al., 2013).

- **Monitor de rendimiento:** Instrumento que mide el contenido de humedad de los granos en tiempo real y el rendimiento de la cosecha. Estos datos se analizan posteriormente y se producen de mapas de rendimiento (Mahmood et al., 2013).
- **Aplicación de Tasa Variable (VRA, por sus siglas en inglés):** Aplicación de algún material basándose en la ubicación precisa o en las cualidades del área. Se puede basar en mapas o en sensores (Markley & Hughes, 2014).
- **Fertilización de Tasa Variable (VRF, por sus siglas en inglés):** Uso de VRA, pero enfocada a la actividad de fertilización (Griffin et al., 2016).
- **Imágenes multiespectrales:** Captura datos de imágenes dentro de rangos de longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético, lo que permite detectar con rapidez el ataque de una plaga, episodio de estrés hídrico, entre otros. Puede ser utilizada junto con UAV (Rivera & Clavijo, 2016).
- **Riego de Tasa Variable:** Uso de VRA, pero enfocándose en el riego (Perea et al., 2017).

En la Figura 7 se presenta el número de publicaciones que considera cada software o técnica. Se puede ver que GIS corresponde al software más investigado. Esto podría deberse a la importancia que poseen para el almacenado de los datos que son requeridos para realizar análisis y decisiones a largo plazo (Markoski et al., 2015). GIS es una herramienta útil para poder cartografiar y proyectar las fluctuaciones actuales de precipitación, la temperatura, la producción de cultivo y más. Además, permite crear técnicas de cultivo más efectivas y eficientes. Esta herramienta es usada de base para otras aplicaciones informáticas y técnicas cuando estos requieren un conjunto de datos previo para así procesarlo o interpretarlo. De este modo, los GIS son comúnmente utilizados en combinación con Mapas de Rendimiento y otras tecnologías.



Figura 7: Técnicas, procesos o software usados en la Agricultura de Precisión

En la Figura 8 se muestra la distribución de publicaciones por año en relación al software y técnicas, donde GIS resulta seguir siendo el más investigado en la mayoría de los años.

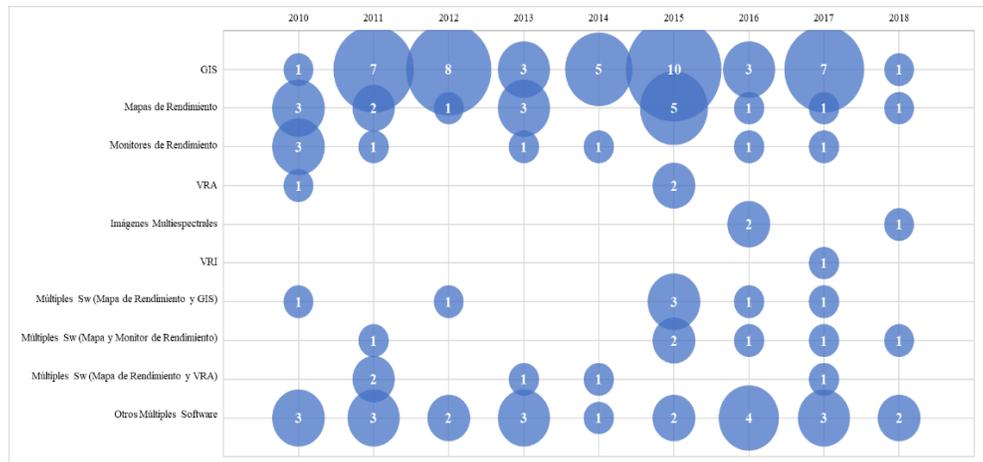


Figura 8: Distribución de publicaciones por año, en relación al software y técnicas considerados

3.4 P2: ¿Qué implementaciones de la AP registra la literatura?

Se ha encontrado un total de 122 publicaciones que describen implementaciones de AP. Estas publicaciones especifican tecnologías aplicadas en cultivos para observar y/o modificar los diversos factores que influyen en su crecimiento, tales como la humedad, la temperatura, la radiación solar y el nivel de agua. Entre estas publicaciones, se ha podido observar que 69 de ellas indican cultivos en específico para las implementaciones. Por otro lado, 38 de las publicaciones indican las actividades agrícolas para las cuales iba dirigida la implementación, y 57 consideran la elaboración de un sistema de información dentro de la implementación. Se debe mencionar que, en el caso de 5 publicaciones, son más generales. Si bien estas describen una implementación de una tecnología de Agricultura de Precisión, no indican explícitamente algún tipo de cultivo, ni se enfocan en una actividad agrícola en concreto, ni elaboran algún sistema de información durante la implementación. Las relaciones existentes entre los distintos conjuntos de publicaciones que se enfocan en los aspectos de la implementación de AP que han sido mencionados pueden ser observadas en la Figura 9. Cabe mencionar que, solo 6 artículos abordan tanto tipo de cultivo como actividades agrícolas y sistema que apoyan a la TI. Por ejemplo, (Rokhmana, 2015) indica todo lo anterior, ya que realiza una implementación para la actividad de siembra en un campo de caña de azúcar y también desarrolla una plataforma UAV.

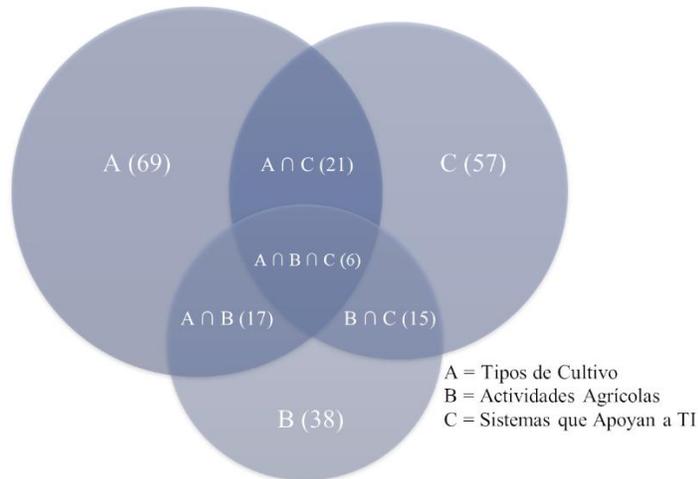


Figura 9: Relaciones entre los conjuntos de publicaciones que se enfocan en los distintos aspectos de implementaciones de AP.

Algunas de las implementaciones encontradas indican la(s) actividad(es) agrícola(s) en la(s) que se enfocaba(n). Esto es porque cada actividad posee requerimientos distintos a las otras. Las actividades identificadas son: (i) control de enfermedades, plagas y malezas, (ii) cosecha, (iii) fertilización, (iv) riego y (v) siembra o plantación. Además, se pueden observar en la Figura 10.

Para cada actividad se debe considerar diferentes variables, por ejemplo, al momento de sembrar o plantar hay que considerar las características del suelo y la temperatura entre otros factores; para la fertilización hay que identificar previamente el tiempo apropiado y los nutrientes del cultivo; al cosechar hay que estudiar el índice de maduración; para el riego se requiere el nivel de agua y finalmente para las actividades de control de plagas, malezas y enfermedades se necesita el estado nutricional del cultivo. La distribución de las publicaciones es relativamente similar, aunque la cosecha y la riego han sido investigadas ligeramente más.

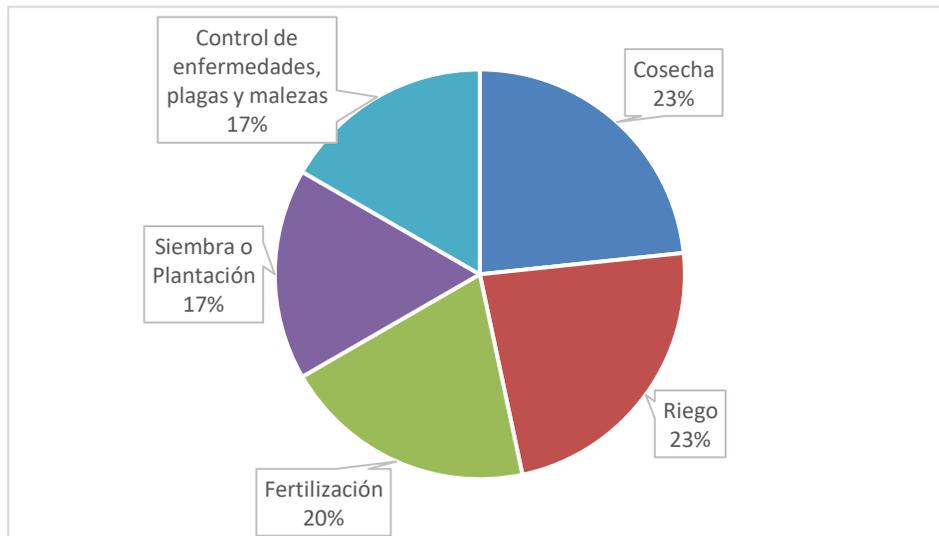


Figura 10: Actividades agrícolas consideradas durante implementaciones de AP

Entre las implementaciones de AP ha sido posible identificar un total de 23 cultivos, como se muestra en la Figura 11. Los cultivos abordados más frecuentemente son el maíz, la caña de azúcar, el trigo, el algodón, la soya y la uva. Se debe percibir que cada cultivo tiene distintas cualidades y factores que deben ser considerados para un óptimo rendimiento, tales como el clima, el tipo de suelo y los nutrientes necesarios.

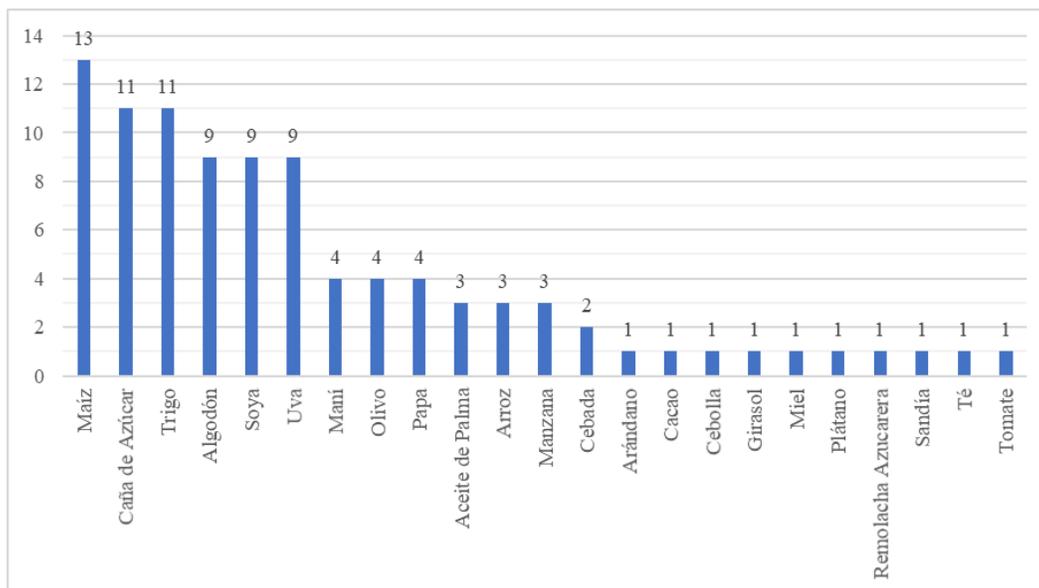


Figura 11: Cultivos mencionados durante implementaciones de AP

Finalmente, existen implementaciones que consideraban la elaboración de sistemas de información para poder usar las tecnologías de manera más eficiente. Los sistemas identificados pueden ser divididos en dos conjuntos: los sistemas Relacionados con Actividades (A) y los sistemas Relacionados a Tecnologías (T). Los sistemas A son desarrollados para apoyar a las distintas actividades agrícolas, mientras que los T son sistemas que se enfocan en apoyar la implementación de tecnologías específicas. Las relaciones entre ambos conjuntos de sistemas pueden ser vistas en la Figura 12. Por ejemplo, (Yang & Chen, 2015) se incluye en ambos conjuntos pues desarrolla tanto un sistema de riego (A) y un sistema local de posicionamiento (T).

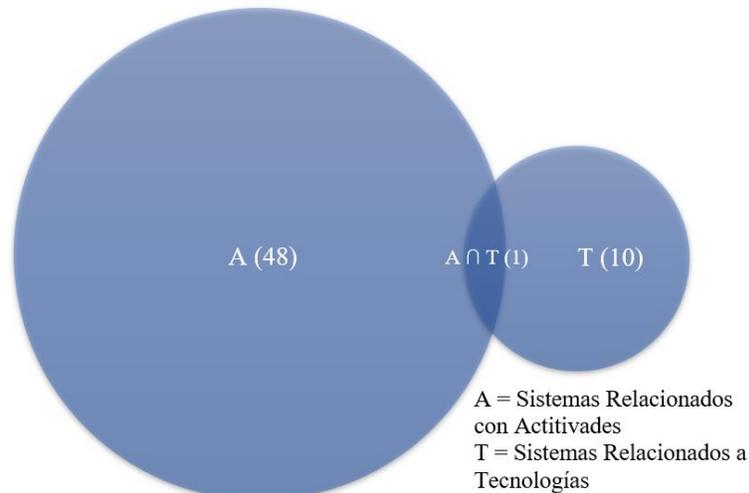


Figura 12: Relaciones entre los conjuntos de publicaciones que desarrollan sistemas de información

Los sistemas A han sido desarrollados principalmente con el objetivo de monitorear la totalidad de las actividades agrícolas. Por ejemplo, en (Markoski et al., 2015) se desarrolla un sistema llamado SmartWine para apoyar la implementación de WSN en viñedos. También existen sistemas más específicos que solo se enfocan en algunas de las actividades agrícolas mencionadas anteriormente. La Figura 13 muestra el número de publicaciones que han elaborado sistemas A. Los sistemas más comunes son aquellos desarrollados para realizar el monitoreo de todas las actividades. Del mismo modo, también se encontraron Sistemas de Soporte a Decisiones (Decision Support Systems, DSS) y Sistemas de Información Gerencial (Management Information Systems, MIS) que también realizaban apoyo a todas las actividades del proceso.

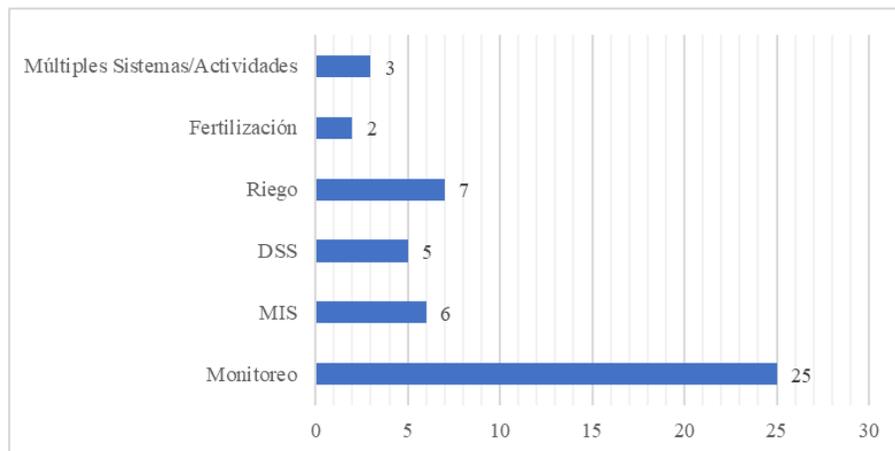


Figura 13: Sistemas RA elaborados durante implementaciones de AP

Por otro lado, pocos sistemas T han sido encontrados. Éstos se enfocaban principalmente en apoyar a tecnologías específicas, como los sensores o los UAV. Los sistemas T que han sido identificados pueden ser observados en la Figura 14.

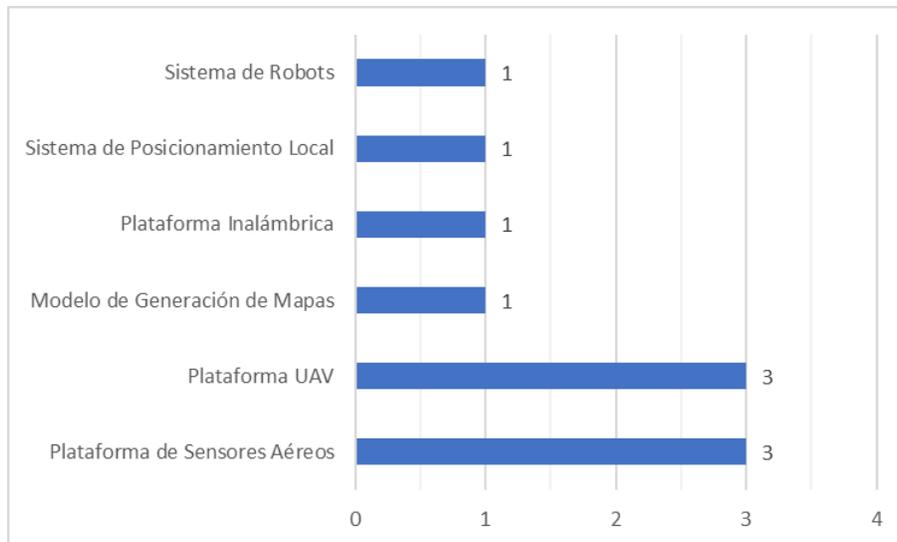


Figura 14: Sistemas T elaborados durante implementaciones de AP

3.5 P3: ¿Qué criterios existen para comparar y seleccionar las tecnologías usadas?

Solo se han encontrado 19 publicaciones que directamente contestaban esta pregunta. Éstas se enfocan principalmente en la comparación de TI para un cultivo en específico o en la comparación del nivel de adopción de TI. Debido al reducido número de publicaciones, a continuación, se presenta cada una, junto con los criterios aportados.

En (Winstead et al., 2010) se realiza un estudio sobre la adopción de diversas tecnologías, cada una posee diferentes usos, objetivos y requisitos que afectan a su adopción. De este modo, cada tipo de TI podría cubrir distintas necesidades. De este artículo se despliega el criterio de Tipo de TI.

Por otro lado, en (Nair, 2011) se realizan estudios sobre la AP desde el punto de vista económico en la producción de algodón. La publicación indica factores que podrían influenciar la adopción de TI tales como: tipo de tecnología seleccionada, el nivel de educación y la necesidad usar los computadores.

Por otra parte, en (Schimmelpfennig & Ebel, 2011) se indica la existencia del obstáculo de que los agricultores prefieren invertir en nuevas tecnologías de semillas por sobre la Agricultura de Precisión. Adicionalmente, se asevera que existen múltiples factores ambientales y administrativos que influyen en la adopción de la Agricultura de Precisión. Un ejemplo de esto es el nivel de educación del operador de la tecnología debido a que existen problemas que podrían requerir un mayor grado de experticia, como la gestión de la información. Otro factor considerado es el costo asociado a la tecnología. Por ejemplo, el uso de VRT requiere una inversión sustancial en el equipo para aplicar fertilizantes y pesticidas o para realizar la siembra a tasas variables.

De igual forma, en (Tey & Brindal, 2012) se mencionan siete factores que influyen en la adopción de la AP, son los factores: socio-económico, agro-ecológico, institucional, informacional, de percepción, conductual y tecnológico. Primero, el factor Socio-económico se refiere a los antecedentes personales, como la educación o el conocimiento, de los agricultores. Debido a que las TI requieren de un alto capital humano, las capacidades del agricultor influyen claramente en su decisión de usar AP. Segundo, el factor Agro-ecológico implica las especificaciones biofísicas del

predio; como la extensión del terreno y tipo de cultivo. Cabe destacar, que el artículo indica que es más probable que las TI se adopten en predios más grandes. Tercero, el factor institucional es un indicador de la inclinación de un agricultor hacia el cambio, incluye la región del cultivo, es decir, donde se encuentra ubicada. Las empresas agrícolas ubicadas en áreas ricas en recursos, tienen más probabilidades de adoptar TI. Cuarto, se encuentra el factor informacional, generalmente la información sobre prácticas agrícolas se obtiene de servicios de extensión o consultores. Sin embargo, existen consultores destinados al consumo masivo, lo que limita el enfoque y la disponibilidad para ayudar a una empresa en específico. Las empresas tienen mayor disposición a adoptar alguna tecnología cuando los consultores son expertos en el cultivo. Quinto, el factor de percepción de los agricultores se refiere a una evaluación subjetiva sobre la rentabilidad que ofrecería la TI a adoptar, esperando que se generen ganancias. Sexto, el factor conductual se utiliza para representar la psicología del agricultor, es decir, si tiene la motivación para adquirir una nueva herramienta, aunque no se ofrezcan beneficios directos. Por último, el factor tecnológico incorpora una serie de indicadores en el uso de tecnologías, que incluyen instalaciones de riego, TI y computadoras, esto implica que el agricultor tenga cierto conocimiento del funcionamiento tecnológico. Cabe mencionar que el uso de la computadora se ha encontrado comúnmente como un predictor de la adopción de tecnologías de AP.

En cambio, en (Babu, 2013) se crea un modelo para proveer servicios de AP, donde se señalan diversos datos de interés. Se destacan tres tipos de información: la información estática como el calendario del cultivo que incluye las actividades necesarias para su crecimiento desde la fase preparatoria hasta la fase de cosecha; información semi - dinámica que es específica de cada temporada del terreno; por último, información dinámica, es decir, información obtenida en tiempo real sobre diversos factores climáticos y del suelo. Por otro lado, el artículo identifica otros parámetros necesarios como tamaño del terreno, tipo y variedad del cultivo, etc.

En (Melchiori, Albarenque & Kemerer, 2013) se explican las motivaciones de los usuarios para adoptar AP. Estas motivaciones fueron el aumento del beneficio económico, la disminución de los costos, el aumento del rendimiento y la mejora del sistema productivo. En general la adopción de herramientas dependía de la experiencia de los usuarios, la mayoría se inclinaba por el GPS y monitor de rendimiento ya que no requieren más que la instalación y calibración del equipo para su utilización. Otros grupos de técnicas que requieren un mayor procesamiento de los datos e información como VRT, son más utilizadas por adoptantes tempranos. Por otro lado, algunas justificaciones para no adoptar TI fueron la falta de especialización tanto de profesionales como de operarios, la escasa disponibilidad de capacitación, alto costo de la tecnología y pocas empresas de servicios.

Se propone un modelo de gestión en (Morales & Augusto, 2013). Indica que las TI pueden ser clasificadas dependiendo de las funcionalidades que poseen, tales como recuperar o analizar datos, entre otras.

Al contrario, en (Burlacu et al., 2014) se destaca que la muestras de suelo son un factor de comparación importante, pues permiten obtener una distribución general de las propiedades químicas y físicas del suelo. Similarmente, se destacan los factores climáticos pues afectan el rendimiento del cultivo.

Semejantemente, en (Demattê et al., 2014) se realiza una comparación entre AP y la agricultura tradicional. Se discuten diferencias como el muestreo de red, la variación de producción, falla de la planta y costos. Además, indica que un aspecto importante es el análisis del suelo del terreno.

En (Watcharaanantapong et al., 2014) se realiza una investigación con el fin de determinar por qué los productores de algodón escogen adoptar el muestreo de suelo, monitor de rendimiento y sensores remotos por sobre otras tecnologías. En la publicación se indican factores que influyen la adopción de TI en AP. Estos factores son la disponibilidad de las tecnologías en el mercado, las características de los agricultores, como su edad, educación, posesión de computadores, uso de tecnologías; y las características del terreno como su extensión y los ingresos que podría proveer.

Asimismo, en (Pignatti, Carli & Canavari, 2015) se provee una lista de razones que motivan la adopción de innovaciones tecnológicas en la agricultura. La facilidad de uso, la efectividad, la utilidad, el ahorro de recursos y la compatibilidad son mencionados como características relevantes para que una innovación sea adoptada. Las pruebas y demostraciones, la compartición de experiencia y conocimiento, y el apoyo de terceros cualificados también se incluyen entre los factores que facilitan la transmisión y promoción de las innovaciones. Finalmente, el financiamiento público, las políticas agrícolas y las condiciones del mercado son identificados como factores que podrían inclinar la balanza en el proceso de adoptar una innovación en la AP.

Por otro lado, en (Schieffer & Dillon, 2015) se investigan los impactos económicos y ambientales de AP, indicando que es importante considerar los costos de las TI que se adoptará.

Se presentan comparaciones de diferentes tecnologías y técnicas durante su adopción en (Griffin et al., 2016). Un factor que afecta a esto es la habilidad de gestionar la tecnología. Vale decir, si el conocimiento o habilidades requeridos son muy elevados, entonces existe una mayor probabilidad de que la tecnología sea abandonada.

En (Schimmelpfennig & Ebel, 2016) se expresa que, a medida que el terreno sea más grande, el interés por adoptar tecnologías de la información será mayor. Se mencionan factores relacionados al conocimiento del operador, los costos asociados y las pruebas de suelo. Aquí, las muestras de suelo son descritas como un diagnóstico de los nutrientes y micronutrientes del suelo. Adicionalmente, se puede inferir que los prerrequisitos de las tecnologías también son considerados como factores, puesto que estas no pueden ser instaladas de manera aleatoria debido a los requerimientos que deben ser cumplidos previamente para ello.

Se investigan los factores que influyen en cómo los agricultores aprenden sobre las tecnologías en (Higgins et al., 2017). Se enfatiza la necesidad de comprender y de tomar en consideración el conocimiento tácito y experimental de los agricultores, pues algunas tecnologías requieren un mayor nivel de conocimiento que otras.

En (Kendall et al., 2017) se presentan las barreras y los facilitadores para la adopción de la AP en China, esto desde la perspectiva de dos grupos involucrados claves: los expertos agrícolas, y los agricultores y usuarios finales. La publicación indica que la barrera más prominente es la actual falta de idoneidad de las tecnologías para abordar los retos que enfrentan terrenos agrícolas pequeños debido a que las tecnologías de AP se centran principalmente en terrenos vastos. También se menciona que los usuarios finales que poseen grandes terrenos usualmente son más jóvenes y con niveles de educación altos, lo que incrementa su disposición y habilidad para involucrarse con tecnologías de AP. Adicionalmente, se observa que los beneficios inmediatos de las tecnologías de AP son difíciles de evaluar y cuantificar. La publicación concluye mencionando que, pese a que las tecnologías de AP son consideradas un avance científico significativo en la práctica agrícola, estas no son percibidas como relevantes para las condiciones agronómicas y socioeconómicas en los predios pequeños y medianos.

En cambio, en (Raghunandan et al., 2017) se comparan diferentes tipos de sensores en base a su costo, eficiencia, aplicación, tipo de datos capturados, entre otros.

En (Zhou et al., 2017) se proporcionan las tendencias de uso de TI entre los productores de algodón, además de ayudarlos a tomar decisiones de adopción. La publicación indica que el tiempo considerado para el análisis es importante para la adopción de TI, pues se necesita investigar las tecnologías disponibles.

Finalmente, en (Far & Rezaei-Moghaddam, 2018) se investigan los factores que influyen el impacto de la Agricultura de Precisión por medio de una encuesta. En base a los resultados, los expertos observaron que la utilidad percibida, la facilidad de uso percibida, el conocimiento sobre la Agricultura de Precisión, y la actitud conductual poseen los mayores efectos sobre la adopción de tecnologías.

Para sintetizar la información anterior, en la Tabla 4 se provee un resumen de las publicaciones que han sido descritas, incluyendo criterios que contribuye cada una para la comparación y selección de tecnologías en implementaciones de Agricultura de Precisión.

En resumen, si bien existe un bajo número de publicaciones que realizan comparaciones entre las distintas TI y técnicas, es importante analizar las ventajas y desventajas de las tecnologías en una variedad de situaciones para así poder saber cuál es la más conveniente en cada caso.

Referencia	Resumen	Criterios Observados
(Winstead et al. 2010)	Estudia la adopción de TI considerando que poseen distintas funcionalidades.	Tipo de TI
(Nair 2011)	Estudia el uso de AP en la industria del algodón desde el punto de vista económico.	Conocimiento requerido; Tipo de TI
(Schimmelpfennig and Ebel 2011)	Destaca la necesidad de mayor conocimiento de la TI y la relevancia de los costos asociados a la AP.	Conocimiento requerido; Costos
(Tey and Brindal 2012)	Menciona múltiples factores que influyen la adopción de AP.	Conocimiento requerido; Superficie del terreno; Costos; Tipo de TI
(Babu 2013)	Provee un modelo para proveer servicios de AP usando información estática, semi-estática y dinámica.	Actividad Agrícola; Clima; Cultivo; Superficie del Terreno; Suelo
(Melchiori, Albarenque, and Kemerer 2013)	Explica motivaciones de los usuarios para adoptar AP.	Costos; Función de la TI
(Morales and Augusto 2013)	Propone un modelo de gestión de AP y clasifica las TI en base a sus funcionalidades.	Tipo de TI
(Burlacu et al. 2014)	Destaca que el suelo y el clima afectan el rendimiento de los cultivos.	Clima; Suelo
(Demattê et al. 2014)	Compara la AP con la agricultura tradicional por medio de distintos criterios.	Costos; Suelo
(Watcharaanantapong et al. 2014)	Investiga las razones por las que los productores de algodón favorecen algunas TI por sobre otras.	Conocimiento requerido; Disponibilidad; Superficie del terreno
(Pignatti, Carli, and Canavari 2015)	Lista impulsores para adoptar TI.	Conocimiento requerido; Costos
(Schieffer and Dillon 2015)	Analiza los impactos económicos y ambientales de la AP.	Costos
(Schimmelpfennig and Ebel 2016)	Afirma que la extensión del terreno motiva la implementación de AP y que es importante evaluar el suelo.	Conocimiento requerido; Costos; Superficie del Terreno; Prerrequisitos; Suelo
(Higgins et al. 2017)	Investiga cómo los agricultores emplean AP.	Conocimiento requerido
(Kendall et al. 2017)	Presenta barreras y facilitadores de la adopción de AP en China.	Conocimiento requerido; Costos; Prerrequisitos

Referencia	Resumen	Criterios Observados
(Raghuandan et al. 2017)	Compara distintos tipos de sensores usando variados criterios.	Costos; Datos capturados por la TI
(Zhou et al. 2017)	Muestra las tendencias de TI entre los productores de algodón.	Conocimiento requerido
(Far and Rezaei-Moghaddam 2018)	Encuentra los factores que influyen el impacto de la AP.	Conocimiento requerido

Tabla 4: Resumen de las publicaciones que proveen criterios de comparación y selección de TI

Dado lo anterior, se analizó el resto de las publicaciones aceptadas en esta RSL con el fin de identificar posibles criterios que pudieran ser inferidos basándose en las distintas implementaciones que han sido propuestas. Como resultado de esto, se ha establecido un total de 11 posibles criterios y posibles valores asociados a cada uno. Son los siguientes ordenados alfabéticamente, además, son presentados en la Tabla 5 junto con ejemplos de valores posibles.

1. **Actividad Agrícola:** son las tareas agrícolas que se realizan en el ciclo de vida del cultivo. Cada actividad tiene características e importancia diversa, se debe analizar si se quiere implementar la tecnología en una sola actividad o para un monitoreo completo, lo que influirá en los costos asociados.
2. **Costos asociados:** son los valores monetarios que se deben invertir para adquirir o arrendar la tecnología. Casi todos los criterios aumentan o disminuyen la inversión que se debe realizar.
3. **Cultivo:** son los productos agrícolas que se cultivan en un terreno designado. En cada cultivo influyen factores distintos, como la predisposición a ciertas enfermedades. Se debe analizar que factor(es) influye(n) más en el cultivo para capturarlo.
4. **Datos capturados por la TI:** son los datos que captura o recolecta la TI, estos datos pueden ser sobre el clima, cultivo o suelo. Estos datos influirán en momento de decidir qué tecnología adoptar.
5. **Factores climáticos:** son los elementos del clima que afectan positiva o negativamente el crecimiento del cultivo. Existen factores más variables, que pueden afectar negativamente al cultivo, por lo que se deben capturar.
6. **Factores del suelo:** es la composición del suelo bajo el que está sembrado o plantado el cultivo, este favorece o retarda el crecimiento del cultivo. Normalmente, antes del cultivar un producto se realiza un análisis del suelo, para verificar si es el óptimo para la siembra o plantación del cultivo.
7. **Función que desarrolla la TI:** son los objetivos por los que se desea adoptar la tecnología, por ejemplo, capturar datos o almacenarlos.
8. **Nivel de conocimiento requerido:** son las habilidades mínimas necesarias que debe tener el operador de la tecnología, debido a que cada tecnología tiene una curva de aprendizaje distinta. Si el operador no tiene el conocimiento necesario, no se empleará la tecnología adecuadamente, lo que producirá un desperdicio de la inversión.
9. **Prerrequisitos para implementar la TI:** son las herramientas que necesita una tecnología para implementada, puede ser una base de datos, software u otra tecnología. En caso de disponer de ellas previamente aumentara el costo de inversión.
10. **Superficie del Terreno:** es la extensión de terreno en la que se está cultivando el producto agrícola. Mientras mayor sea esta superficie más tecnologías se necesitarán o de mayor alcance. Esto aumentará la inversión a realizar.

11. Tecnología: son las TI o software que se adoptarán para una implementación de AP, cada una tiene su costo asociado, por lo que se debe analizar todos los requerimientos.

Criterios	Ejemplo de posibles valores
Actividad Agrícola	Cosecha, Siembra
Costos asociados	Precio
Cultivo	Arroz, Arándano
Datos capturados por la TI	Humedad, pH, Temperatura
Factores climáticos	Temperatura, Velocidad del viento
Factores del suelo	Nutrientes, Profundidad, Topografía
Función que desarrolla la TI	Capturar datos, Analizar datos
Nivel de conocimiento requerido	Bajo, Medio, Alto
Prerrequisitos para implementar la TI	Software, Otras TI
Superficie del terreno	Número de hectáreas
Tecnología	GPS, Sensor, UAV

Tabla 5: Criterios identificados y sus posibles valores

3.6 P4: ¿Existe algún Framework que guíe la implementación de la Agricultura de Precisión?

No se encontró ningún artículo que propusiera un Framework para guiar la implementación de AP que tuviera en cuenta diferentes criterios por ejemplo cultivo, presupuesto, etapa de cultivo, entre otros; esto debido a que la mayoría de los artículos eran más generales y se concentran en una sola TI.

3.7 Revisión de la Industria

Esta revisión se enfocó en la exploración de diversos sitios Web especializados en el área de la Agricultura de Precisión, con el objetivo de complementar y profundizar los conocimientos encontrados en la literatura. Para esto, se utilizó como herramienta el buscador Google.

Se investigó en detalle todo el proceso de producción agrícola, lo que involucró a los 11 criterios identificados durante la RSL. Se profundizó el conocimiento de estos criterios, como los valores posibles a adoptar. Posteriormente se investigó acerca de las relaciones entre criterios. También, con respecto al criterio de Tecnología se buscaron las más actuales y su uso en distintos contextos. Todo esto con el fin de obtener una visión íntegra. A continuación, se explica información de cada uno de los criterios:

- La Actividad Agrícola es el conjunto de tareas relacionadas con el tratamiento del suelo y cultivo de la tierra. Los valores posibles son las 9 actividades que se identificaron previamente y fueron validadas por los expertos mediante la encuesta.
- Los Costos Asociados de las tecnologías no se pudieron generalizar en rangos, debido a que existen diversas opciones que ofrece el mercado. Depende del modelo de cada tecnología.
- El Cultivo es el producto agrícola en el que se realizará la implementación de Agricultura de Precisión. Los posibles valores son los cultivos identificados durante la RSL.

- Los Datos Capturados son los factores del suelo y del clima que pueden ser recolectados por una tecnología, en caso de que esta tenga la función de captar datos.
- Los Factores Climáticos son los elementos del clima que necesitará capturar. Los valores posibles son: Humedad, Precipitación, Radiación Solar, Temperatura y Viento.
- De igual forma, los Factores de Suelo son los elementos del suelo que se necesitan monitorear. Los valores posibles son Contenido de Nutrientes, Estructura, Materia Orgánica, pH, Profundidad, Textura y Topografía.
- Cada tecnología exige un Nivel de Conocimiento diferente debido a su complejidad de uso. Algunas necesitan solo una breve capacitación, mientras que otras solo pueden ser utilizadas por algún experto. Los valores posibles son Mínimo, Medio y Avanzado.
- Algunas tecnologías tienen prerequisites asociados. Pueden requerir alguna base de datos, software u otra tecnología para poder ser utilizada.
- Cada tecnología tiene una o muchas funciones o roles que puede realizar dentro de una implementación de AP. Por ejemplo, capturar los datos; procesarlos, es decir, convertirlos a información; almacenarlos en una base de datos o aplicar algún insumo.
- La Superficie del terreno, es decir, el tamaño del terreno en el que se utilizará la TI influye debido al alcance de cada TI. Se realizó una clasificación en base a la superficie de explotaciones de la agricultura que provee Rimisp (Felipe & Pizarro, 2014). Los valores posibles son pequeños (1 a 3 ha), mediano (3 a 30 ha), grande (30 a 100 ha) y muy grande (más de 100 ha).

Finalmente, la Tecnología es la TI o software que se utilizará para la implementación de AP. Los posibles valores son las tecnologías identificadas durante la RSL.

Luego del análisis, se establecieron 3 nuevos criterios, estos son los siguientes:

1. **Altura del cultivo:** la altura influye en las tecnologías debido a que hay ciertos sensores que no captarían datos importantes. Los valores posibles son bajos (menos a 1 metro), medio (igual a 1 metro) y alto (mayor a 1 metro).
2. **Año de plantación:** los árboles frutales no son cultivos de ciclo anual, debido a esto su producción no es inmediata. Dependiendo del año de plantación solo involucrará algunas actividades agrícolas. Los primeros años de crecimiento no se encuentra en producción, es decir, no se puede cosechar. Cuando llega a una edad madura, se encontrará apto para la producción y se cosechará anualmente.
3. **Tipo de agricultura según agua:** los cultivos necesitan agua para su crecimiento, pero existe la agricultura de secano, en donde el agua solo proviene de las lluvias. Debido a esto, no se involucra la actividad de riego por parte de las personas.
4. **Tipo de cultivo:** se refiere a la clasificación a la que pertenece aquel cultivo. Se utilizaron las categorías que entrega la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Odepa en [/www.odepa.gob.cl/fichas-de-costos](http://www.odepa.gob.cl/fichas-de-costos). Son las siguientes: cereal, fruta, hortaliza, leguminosa, papa y otro.

Posteriormente, se procedió a establecer las relaciones existentes entre los criterios más importantes, estos son: Actividad Agrícola, Cultivo, Factor Climático, Factor del Suelo y Tecnología. Las relaciones identificadas entre las instancias se pueden observar en el Anexo B.

3.8 Discusión

A continuación, se discuten los principales hallazgos de la RSL. Esta revisión ha permitido no solo el conocer el estado del arte respecto del uso de TI y software en la Agricultura de Precisión, sino que también sirve como una vía para identificar los principales contextos en los que han sido usadas, entregando también una visión de los criterios que son utilizados cuando se debe decidir qué tecnología usar en los diferentes contextos.

La investigación sobre la Agricultura de Precisión y sus tecnologías se ha mantenido constante a lo largo de los años. Esto puede ser observado por medio de la considerable cantidad de publicaciones encontradas. La mayoría de estas publicaciones describe tecnologías o software que permiten recuperar o procesar datos que indican el estado actual de los diferentes sectores del terreno (Hunt & Daughtry, 2018; Quebrajo et al., 2018).

El sensor remoto ha sido la tecnología más investigada. Esto podría deberse a sus ventajas sobre otras tecnologías, como lo es su precisión y los diferentes factores que puede capturar (Hernández et al., 2015). Sin embargo, los sensores remotos poseen desventajas, como el costo de inversión requerido. De este modo, otras alternativas para capturar datos también deberían tenerse en mente basándose en las necesidades de cada cultivo (Hedley, 2015).

Por otro lado, se debe mencionar que no basta con solo capturar los datos, pues éstos deben ser almacenados y subsecuentemente transformados en información para así poder realizar el análisis apropiado. Así, se ha observado que se han desarrollado software y técnicas para realizar esta tarea de procesar y analizar los datos, lo que permite una mejor interpretación de la situación del terreno. Un ejemplo de esto son los mapas que muestran el nivel de agua de cada sector del terreno, usando colores para mostrar cuáles poseen un nivel adecuado y cuáles requieren la atención del agricultor (Oliver, 2013). Estos tipos de software y técnicas permiten tomar decisiones más fácil y rápido. Se debe notar que el uso de estas tecnologías va de la mano con el uso de sensores u otras tecnologías que permitan recolectar los datos que son necesarios (Tripathi et al., 2018).

Se ha encontrado una cantidad razonable de publicaciones que discuten la implementación de TI en la Agricultura de Precisión. Se ha detectado que estas implementaciones se concentraban en aplicar las tecnologías en alguna de las actividades agrícolas, como la siembra o la cosecha de un cultivo (Higgins et al., 2017; Griffin et al., 2017). También se pudo ver que las tecnologías eran usadas en cultivos específicos para cada caso, pues cada cultivo posee necesidades y condiciones diferentes (Yost et al., 2017). Finalmente, también se observó que algunas implementaciones consideraban el desarrollo de sistemas computacionales que apoyaran a las TI usadas para la Agricultura de Precisión (Biqing et al., 2018).

Se han encontrado pocas publicaciones que proveyeran criterios para la comparación y selección de tecnologías en el contexto de la AP. Uno de los criterios importantes que ha sido observado es el tipo de cultivo pues, como se mencionó anteriormente, cada uno posee diferentes necesidades y no todas las tecnologías pueden ser aplicadas en cada caso (Tripathi et al., 2018). Otros criterios importantes que han sido vistos son los tipos de TI y sus características, así como los costos asociados. Cada tecnología requiere una inversión significativa para el agricultor (Mushtaq, Maraseni & Reardon-Smith, 2013), por lo que es necesario tener un conocimiento adecuado sobre las funcionalidades que provee, los datos que captura o procesa, los resultados que genera, los requerimientos que le son necesarios y el nivel de conocimiento requerido. Si no se tiene en consideración lo anterior, entonces existe un mayor riesgo de que el agricultor abandone la tecnología y pierda su inversión (Melchiori, Albarenque & Kemerer, 2013; Schimmelpfennig & Ebel, 2011).

Uno de los objetivos de la RSL era identificar Framework de decisión que usaran los criterios que han sido identificados. Sin embargo, no se ha logrado encontrar ninguna publicación que propusiera alguna herramienta que guiara la implementación de AP.

Por medio de la realización de la RSL se ha notado que la cantidad de datos capturados y almacenados por medio de las tecnologías de Agricultura de Precisión es enorme. El procesado y gestión de tales cantidades de datos es un gran reto si se utilizan metodologías y plataformas tradicionales. Aquí se destaca el término de Big Data pues esta tecnología puede apoyar a un amplio número de funciones de la Agricultura de Precisión para así lograr nuevos descubrimientos sobre los datos y, además, ayuda a abordar múltiples nuevas e importantes decisiones y problemas agrícolas (Bendre & Thool, 2015). De hecho, una buena cantidad de las publicaciones identificadas ya han propuesto el uso de Big Data para apoyar a las tecnologías usadas en la AP (Wolfert et al., 2017; Kamilaris, Kartakoullis & Prenafeta-Boldú, 2017; Alves & Cruvinel, 2016).

Además, se realizó una Revisión de la Industria que ayudó a complementar los resultados obtenidos durante la RSL. Esto ayudó a obtener información más profunda y actualizada.

3.9 Conclusiones del Estado del Arte

Los resultados de esta Revisión Sistemática de la Literatura y la Revisión de la industria han permitido comprobar que, la Agricultura de Precisión ha demostrado ser un área ampliamente investigada que progresa constantemente debido a las necesidades de los agricultores de usar los recursos de una manera óptima. Además, la RSL ha permitido identificar las múltiples implementaciones de Agricultura de Precisión que están presentes en la literatura, así como las tecnologías que son usadas para este propósito. También ha sido posible identificar una cantidad de criterios y factores que motivan ya sea la decisión de usar determinada tecnología, o de optar por usar o no AP. De este modo, a continuación, se mencionan los principales hallazgos de la investigación.

Existe una variedad de diferentes TI que han sido usadas en el contexto de la AP. Aquí se destacan los sensores remotos y los GPS debido a la elevada cantidad de publicaciones que hacen uso de ellos. Similarmente, entre los diferentes tipos de software que apoyan el uso de estas tecnologías, los que han visto un mayor uso son los GIS y los mapas de rendimiento.

Si bien ha sido posible identificar la implementación de AP en múltiples tipos de cultivos, hay cinco de estos que han sido más investigados en la literatura, estos son el maíz, la caña de azúcar, el trigo, el algodón y la soya. Estas implementaciones de AP también eran consideradas para distintas actividades agrícolas, siendo las actividades de cosecha y siembra las que han sido investigadas ligeramente más seguido. Adicionalmente, ha sido posible observar que se han desarrollado múltiples sistemas de información que usan las TI identificadas para la implementación de AP.

No ha sido posible identificar un número importante de publicaciones que propusieran criterios de comparación y selección para la implementación de la Agricultura de Precisión. Sin embargo, se ha podido observar recurrentemente algunos criterios importantes entre estas publicaciones, como lo son los costos asociados a las TI, el tipo de TI a implementar, los factores del suelo y del clima, y el conocimiento requerido para usar las TI. Se destaca este último criterio pues múltiples publicaciones indicaban que éste era uno de los principales factores para que los agricultores decidieran implementar AP, debido a que el conocimiento sobre AP es una de las mayores barreras para su adopción.

Pese a que uno de los objetivos de la RSL era identificar la existencia de alguna herramienta o Framework que apoyara en la toma de decisiones sobre qué TI debería ser implementada en determinado cultivo dentro del contexto de la AP, no ha sido posible encontrar alguna publicación de ese tipo entre aquellas que han sido revisadas.

Los resultados de esta RSL permiten identificar posibles líneas de investigación a modo de trabajo futuro dentro del contexto de la AP. Por ejemplo, el enfocarse en tecnologías que no hayan sido investigadas tan a menudo, como los UAS o las imágenes multiespectrales, o en cultivos que también requieran un mayor muestreo, como los arándanos o el té, podría ayudar a identificar nuevos avances en el contexto de la AP. Otro aspecto importante en el cual se debería enfocar el trabajo futuro es en la necesidad existente de que los agricultores adquieran un mayor conocimiento respecto a la AP, pues este ha resultado ser uno de los mayores factores de disuasión para la implementación de TI en sus campos.

En este sentido, se ratifica la idea de definir una herramienta o Framework que abarque este conocimiento requerido, y/o que directamente apoye al proceso de toma de decisiones sobre la elección de la TI apropiada para las necesidades de cada agricultor, sin tener que recurrir a estrategias de prueba y error que incrementan aún más los costos de adopción.

Capítulo 4

Creación de Framework

En este capítulo se presenta la creación del Framework teórico con el objetivo de comparar y seleccionar las TI según diferentes parámetros del proceso agrícola. Este Framework fue diseñado en base a lo recopilado de la literatura y de experiencias en la industria. Se genera una propuesta inicial del Framework, la cual es validada por un panel de expertos, para luego realizar un ajuste del Framework teórico y entregar una versión final. La Figura 15 muestra, gráficamente, las 4 etapas desarrolladas para la creación e implementación del Framework.

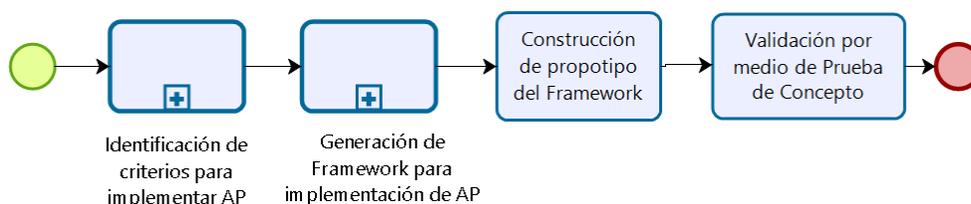


Figura 15: Etapas para la generación del Framework

En el resto de este capítulo se describen las dos primeras etapas que dan origen al Framework teórico. En la Sección 4.1 se identifican los criterios para implementación de AP, que se obtuvieron mediante una RSL y una Revisión de experiencias en la industria. Posteriormente, en la Sección 4.2 se presenta la generación del Framework que consta de una propuesta inicial, realización de encuestas a expertos y un ajuste de la propuesta. La construcción del prototipo se encuentra en el Capítulo 5, mientras que su validación mediante una Prueba de Concepto en el Capítulo 6.

4.1 Identificación de Criterios para la implementación de AP

A continuación, se describen brevemente los hallazgos más importantes de la Revisión Sistemática de la Literatura y de la Revisión de la industria, que fueron la base para la identificación de criterios con el fin de generar el Framework de implementación de Agricultura de Precisión. Esta etapa constó de 3 actividades, tal como se muestra en la Figura 16.

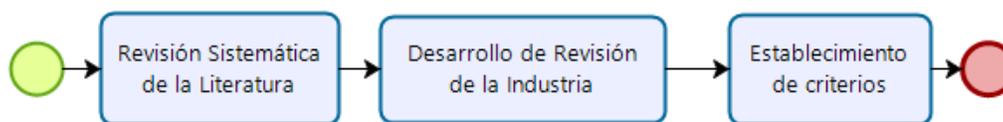


Figura 16: Actividades para la identificación de criterios

4.1.1 Criterios identificados durante RSL

Como se mencionó en el estado del arte, se encontraron 11 criterios necesarios para una implementación de Agricultura de Precisión, éstos fueron:

- 1 **Actividad Agrícola:** tarea agrícola relacionada al tratamiento del suelo y del cultivo.
- 2 **Costo asociado a cada TI:** cada tecnología tiene un costo asociado que es directamente proporcional a su alcance y a su eficiencia.
- 3 **Cultivo:** producto agrícola que se quieren cultivar. Cada cultivo tiene características y requisitos determinados en cuanto a factores a detectar e insumos a utilizar.

- 4 **Datos capturados por la TI:** tipo de dato capturado por la TI respecto del cultivo y ambiente que luego deberá ser procesado y analizado.
- 5 **Factores climáticos:** elementos climáticos como la temperatura y las precipitaciones que varían de unas zonas a otras, se deben detectar debido a que afectan el crecimiento del cultivo.
- 6 **Factores del suelo:** composición del suelo que varía de un terreno a otro y afecta el crecimiento del cultivo.
- 7 **Función que desarrolla la TI:** las tecnologías pueden tener uno o más objetivos de uso, entre ellos está la captura de datos.
- 8 **Nivel de conocimiento para usar la herramienta:** cada tecnología tiene una curva de aprendizaje distinta, algunas pueden emplearse sin previo conocimiento, mientras que otras solo pueden ser utilizadas por un especialista.
- 9 **Prerrequisitos para utilizar la TI:** existen tecnologías que necesitan de una base de datos, software u otra tecnología para su implementación.
- 10 **Superficie del terreno:** el tamaño del terreno es importante al momento de decidir qué tecnología utilizar, mientras más grande mayor cantidad de dispositivos se necesitarán para abarcar todo el terreno.
- 11 **Tecnología:** son específicamente las tecnologías que pueden usarse en una implementación de Agricultura de Precisión.

4.1.2 Criterios identificados durante la Revisión de la Industria

Después de la RSL se procedió a investigar más profundamente los criterios obtenidos, con el fin de obtener las relaciones entre ellos y la posible existencia de otros relevantes. Se realizó una revisión de experiencias en la industria, donde se recopiló información de cada criterio y sus instancias. También, con respecto al criterio de Tecnología se buscaron las más actuales y su uso en distintos contextos.

Luego del análisis, se establecieron 4 nuevos criterios, éstos son los siguientes:

1. **Altura del cultivo:** La altura influye en las tecnologías debido a que hay ciertos sensores que no captarían datos importantes.
2. **Año de plantación:** Los árboles frutales no son cultivos de ciclo anual, por lo que su producción no es inmediata. Dependiendo del año de plantación solo involucrará algunas actividades agrícolas.
3. **Tipo de agricultura según agua:** Los cultivos necesitan agua para su crecimiento, pero existe la agricultura de secano, en donde el agua solo proviene de las lluvias. Debido a esto, no se involucra la actividad de riego por parte de las personas.
4. **Tipo de cultivo:** Cada cultivo pertenece a una categoría en específico. Este criterio permite generalizar los conocimientos, una característica de un cultivo podría presentarse en otro del mismo tipo.

4.1.3 Establecimiento de criterios finales

Para un manejo más simple de los criterios se procedió a clasificarlos en 5 más amplios, estos son: Cultivo, Actividad Agrícola, Suelo, Clima y Tecnología. La distribución se presenta en Figura 17.

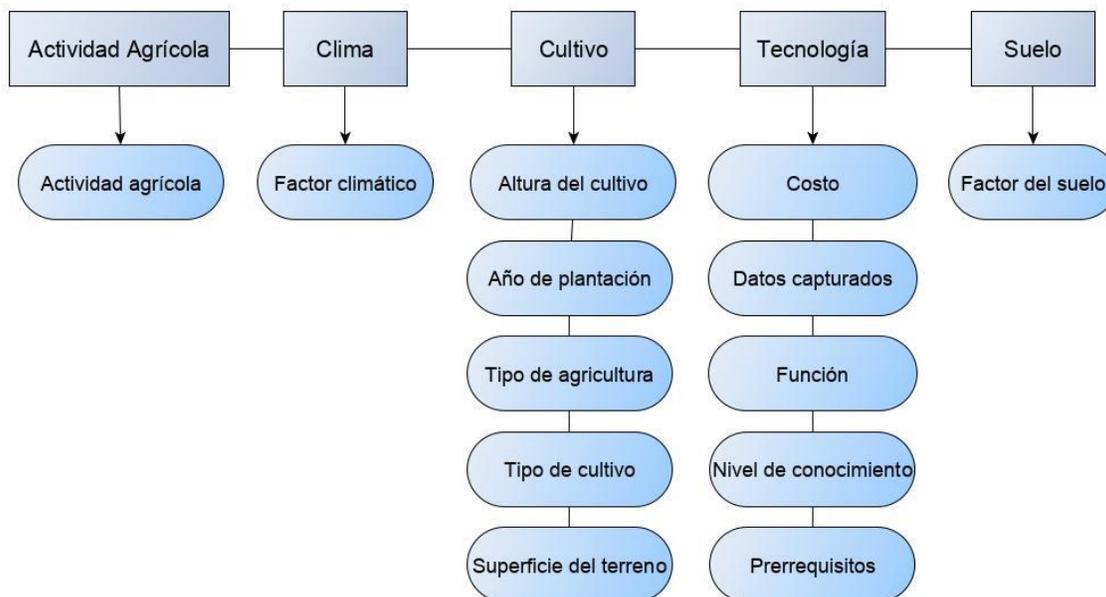


Figura 17: Criterios y subcriterios para una implementación de AP

4.2 Generación de Framework

La generación del Framework se realizó mediante diversas actividades, conforme a los criterios identificados se establecieron las relaciones para una propuesta inicial. Esta propuesta se valida mediante encuestas y entrevistas a expertos de la industria. Finalmente, se ajusta la propuesta según los resultados obtenidos. Las actividades descritas se pueden visualizar en la Figura 18.

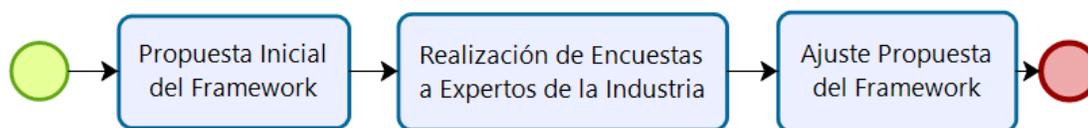


Figura 18: Etapas Generación del Framework

4.2.1. Propuesta Inicial

Con el fin de desarrollar la propuesta inicial se tomaron los criterios de la Figura 17 y se procedió a identificar las asociaciones existentes entre ellos, específicamente qué instancias de los criterios se relacionan. Para esto, se analizaron los 5 criterios y su influencia en los demás. La Figura 19 muestra la relación entre los criterios.

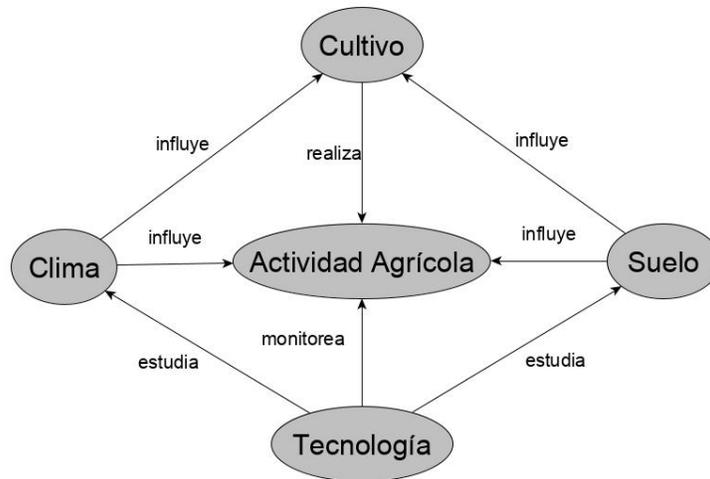


Figura 19: Asociación de criterios

Para un manejo integrado de un cultivo se consideraron diversos factores climáticos y del suelo, que afectan su rendimiento. Por cada cultivo se debe analizar la influencia de cada factor climático y cada factor del suelo, esto debido a que cada cultivo presenta características y necesidades únicas por lo que los factores influirán de diferente manera (Best & Zamora, 2008). Por ejemplo, el viento tiene escasa influencia en los tubérculos ya que éstos están bajo tierra y, por otro lado, tiene una gran influencia en árboles frutales porque pueden ocasionar la caída del fruto.

Durante el ciclo del cultivo se deben realizar todas las actividades agrícolas que se identificaron previamente, éstas son: Adecuación de suelos, Siembra, Fertilización, Control de crecimiento, Control de malezas, Control de plagas, Control de enfermedades, Riego y Cosecha. En estas actividades también se deberá considerar la influencia de los factores climáticos y del suelo, y no intervendrán de la misma manera, por lo que se debe analizar por cada uno.

Por otro lado, mediante las tecnologías se obtendrá información sobre los factores climáticos y del suelo. Éstas pueden capturar los valores de los factores, procesar los datos y con análisis adecuado para la toma de decisiones.

El Framework se desarrolló utilizando los criterios y subcriterios anteriores. Además, se priorizaron, es decir, se escogió el orden más adecuado según su importancia para el futuro Framework. Se analizaron los diversos criterios y se identificó que el criterio más general e importante es el cultivo en que se implementará la TI, debido a que el cultivo necesita de condiciones específicas para su crecimiento, de él dependerá como realizar las actividades agrícolas y qué factores se deberán considerar (Babu, 2013).

Se continúa con la actividad agrícola a realizar, se escogió esta debido a que los factores tanto del suelo como climático influyen en dichas actividades, pero no en todas, por lo que un modo de filtrar es mediante este criterio.

Continuando con los factores del suelo, éstos son importantes ya que influyen en el crecimiento del cultivo debido a que es el lugar donde crecen las plantas. Los elementos del suelo no tienen grandes variaciones a través del tiempo, por lo que no necesita de un análisis periódico.

Luego se encuentran los factores climáticos, que se caracterizan porque cambian rápidamente, por lo que se necesitan mediciones más continuas. Como criterio final están las tecnologías disponibles y sus características que cumplen los requisitos, en la Tabla 6 se muestra el orden descrito.

Priorización	Criterio
1	Cultivo
2	Actividad Agrícola
3	Suelo
4	Clima
5	Tecnología

Tabla 6: Priorización de criterios

Con los valores obtenidos durante la RSL y la Revisión de la Industria, junto con la identificación de criterios, subcriterios y relaciones se entrega la recomendación de la tecnología de información más adecuada para una implementación de AP. Las respuestas entregadas por el Framework variarán también dependiendo del ambiente en el que será implementado.

4.2.2. Desarrollo de Encuesta a la industria

La encuesta es un método empírico que se utiliza para recopilar información de personas y así comparar su conocimiento. Se empleó este instrumento para la ratificación de los resultados obtenidos durante la Revisión Sistemática de la Literatura, y así tener una visión tanto por parte de la academia como de la industria. Se recopiló información sobre los criterios, subcriterios y prioridades a considerar en una implementación de Agricultura de Precisión, según lo especificado en la Sección 2.

La encuesta primero fue validada a través de un piloto que se especifica en la Sección 4.2.2.1, mientras que la Sección 4.2.2.2 entrega los resultados obtenidos en la encuesta, además, el instrumento aplicada se puede ver en el Anexo C. Finalmente, en la Sección 4.2.2.3 se realiza una discusión de los resultados contrastándola con los obtenidos en la RSL, además de entregar las conclusiones pertinentes.

4.2.2.1. Resultado Piloto

Se entrevistaron a 2 expertos de la industria a modo de piloto para validar que las preguntas consideradas en la encuesta estuvieran adecuadamente formuladas. Uno de los expertos era Ingeniero Civil en Informática con experiencia en las tecnologías de AP, mientras que el otro era Ingeniero Agrónomo que había implementado algunas tecnologías de AP. Por lo que el cuestionario fue validado tanto del punto de vista informático como del agronómico. Las respuestas de los expertos se incluyeron a los demás resultados.

Con cada experto se agendó una reunión en la que se presentó detalladamente el objetivo del trabajo y el avance hasta la fecha. Posteriormente, se presentaron los criterios identificados anteriormente y sus relaciones, donde cada uno expresó su opinión. De forma que se ratificaron los criterios.

4.2.2.2. Resultados de la Encuesta

Otro medio que se utilizó para la validación de los criterios obtenidos fue una encuesta de tipo transversal auto-administrada. Primero, se realizó una versión preliminar del instrumento y se validó mediante los directores de tesis y el piloto descrito previamente. Después de la validación se hicieron los cambios necesarios y resultó en un cuestionario dividido en dos secciones. La primera contenía dos preguntas demográficas de los encuestados, mientras que la segunda sección era

específica en cuanto a los criterios a considerar en una implementación de AP. La formulación de las preguntas de la encuesta puede ser encontrada en el Anexo C.

Después de la elaboración del cuestionario se procedió a buscar a los expertos en el tema. Se identificó un total de 104 personas a las que se envió y solicitó responder la encuesta, 41 de ellas la respondieron, alcanzando el 39% de la muestra.

La primera sección de la encuesta constaba de preguntas demográficas, específicamente su nacionalidad y su experiencia en el área, los resultados pueden ser vistos en la Figura 20 y Figura 21. Aproximadamente el 70% de los encuestados fueron chilenos, pero también se obtuvo participación internacional lo que nos permite entender el comportamiento de las implementaciones de Agricultura de Precisión de manera más universal.

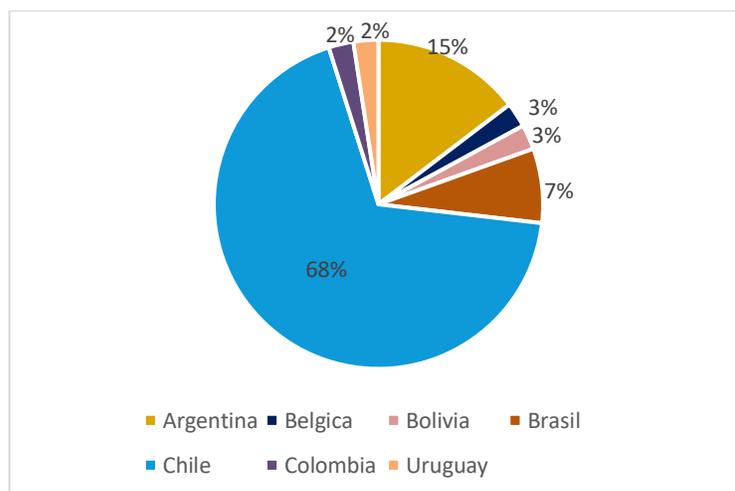


Figura 20: Nacionalidad de los encuestados

La Figura 21 muestra el nivel de experiencia de los encuestados; aproximadamente el 61% los encuestados tienen una experiencia superior a 5 años.

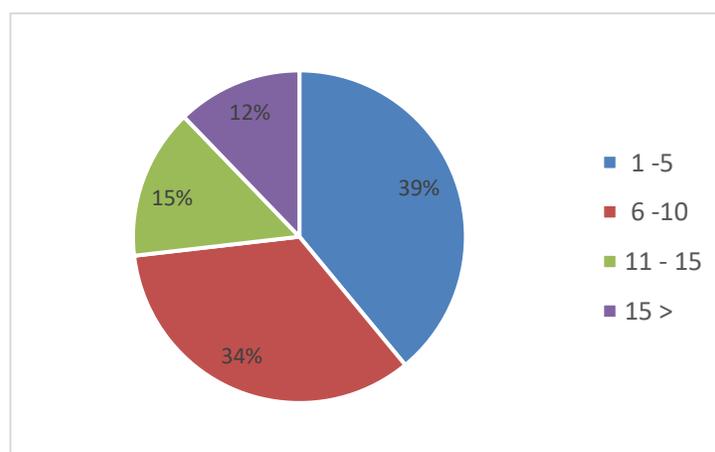


Figura 21: Años de experiencia con AP de los encuestados

En las siguientes figuras se presentan los resultados de la pregunta 1 de la sección II. Para esta pregunta “¿Cuál(es) de estos criterios se deben(n) considerar al momento de implementar AP?” se obtuvieron 39 respuestas válidas, donde los usuarios debían jerarquizar los criterios a considerar. El criterio que fue elegido mayor cantidad de veces como número 1 fue el cultivo (Figura 22). Por otro lado, en la Figura 23 se muestran los criterios que se consideraron menos importantes, es decir, con número de prioridad 5; éstos son el suelo, clima y tecnología. Cabe destacar que algunos encuestados no priorizaron todos los criterios o repitieron los valores entre éstos.

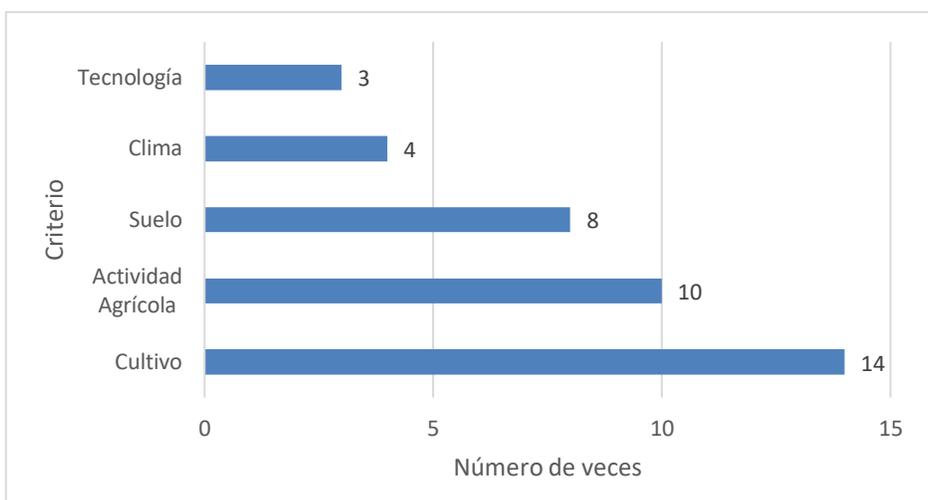


Figura 22: Número de veces que un criterio fue elegido con prioridad 1



Figura 23 Número de veces que un criterio fue elegido con prioridad 5

Cabe destacar que los encuestados agregaron otros criterios a considerar como: superficie del terreno, conocimiento del ingeniero, hidrografía, factores humanos, entre otros.

En cuanto a la segunda pregunta “¿Qué características se deben identificar previamente a la implementación de AP?”, en la Figura 24 se comparan los resultados, siendo el más indicado el tipo de cultivo. Los encuestados aportaron otras características a considerar como: nutrición y rentabilidad económica del cultivo, topografía, entre otros.

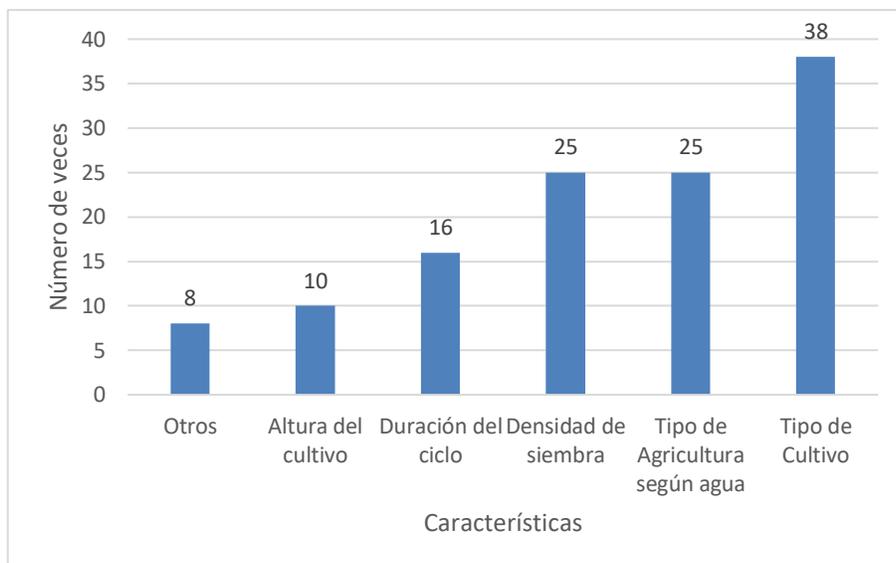


Figura 24: Características a considerar previo a una implementación de AP

Respecto a la 3era pregunta “¿Qué características de las tecnologías se deben considerar en una implementación de AP?”, en la Figura 25 se muestran los resultados, las características más importantes identificadas son el costo de implementación, nivel de conocimiento necesario y los datos capturados. En general no hay una variación tan evidente entre éstas.

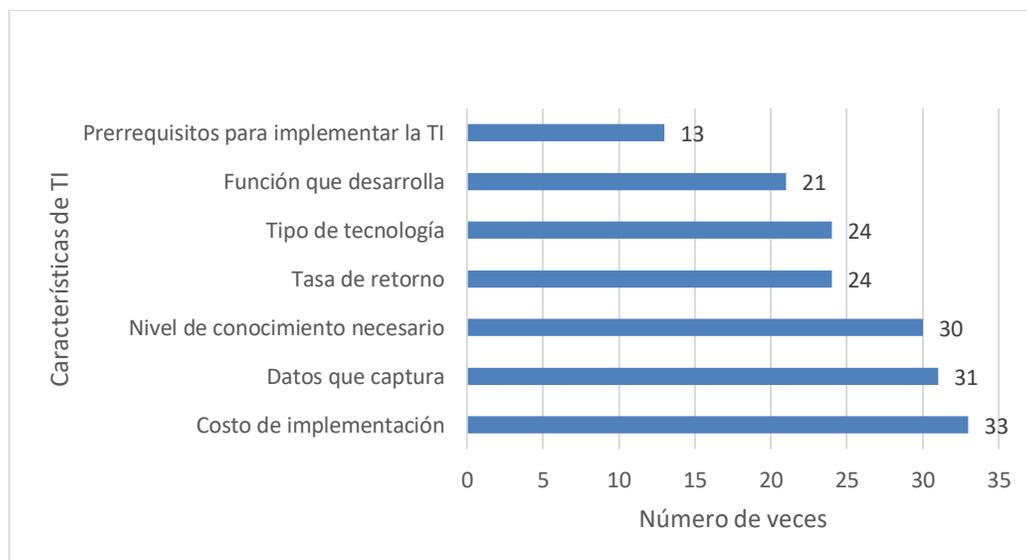


Figura 25: Características de la TI a considerar

La siguiente pregunta se enfocaba en la experiencia de los encuestados en las diferentes tecnologías. En la Figura 26 se indican cuántos expertos tienen experiencia en cada una de ellas, mientras que la Figura 27 presenta el promedio de años de experiencia. Se puede destacar que casi el 100% de los encuestados tiene experiencia en GPS, específicamente un promedio de 9 años.

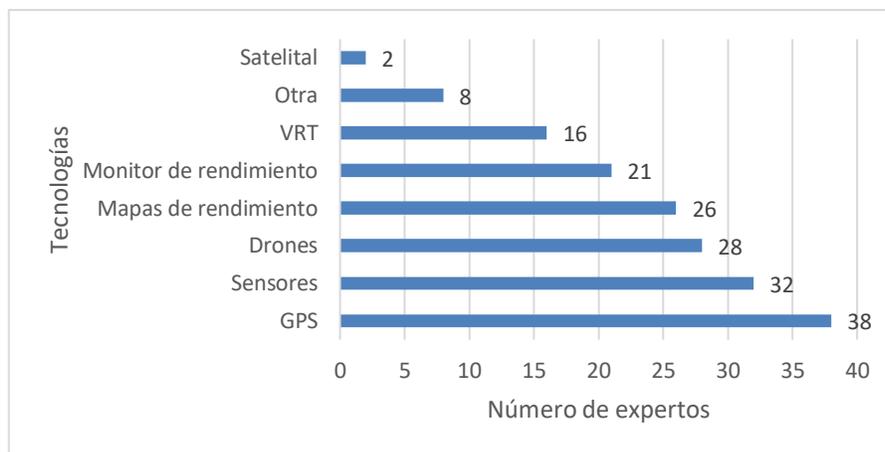


Figura 26: Experiencia en tecnologías de los encuestados

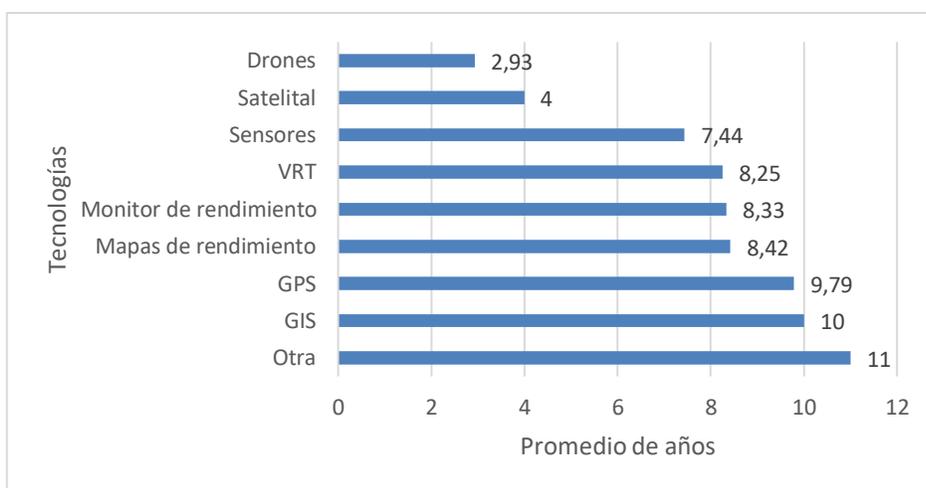


Figura 27: Promedio de años de experiencia por tecnología

La pregunta 5 se concentraba en obtener la tasa de retorno de las tecnologías según la experiencia de los encuestados. Desafortunadamente, a pesar de que la objetividad de la pregunta fue validada a través del piloto, se encontraron diferentes tipos de respuestas. Se esperaba un valor numérico para la tasa de retorno, pero se encontraron rangos, jerarquización, entre otros. Por lo que se procedió a invalidar la pregunta.

Luego, la pregunta 6 consultaba la existencia de otras actividades agrícolas además de las que se identificaron previamente. Como muestra la Figura 28, el 64% de los encuestados aportaron nuevas actividades. Las 14 actividades que fueron agregadas se encuentran en Tabla 7, donde la más nombrada es la Calidad de cosecha.

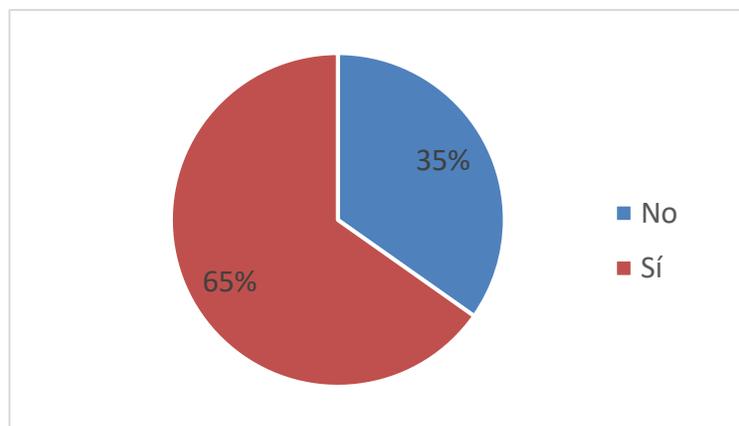


Figura 28: Existencia de nuevas actividades agrícolas

Actividades	Cantidad de respuestas
Administración	1
Automatización de riego	1
Calidad de cosecha	4
Clasificación de tierras	1
Control de gestión	3
Control de maquinaria	2
Costos	2
Descompactación de suelos	1
Fenotipado	2
Ganadería de precisión	1
Matriz de riesgos	1
Mediciones climáticas	1
Monitoreo	2
Predicción	2
Rendimiento de terreno	1
Trazabilidad	2

Tabla 7: Actividades agregadas por los encuestados

Luego, la pregunta 7 consultaba la existencia de otros factores climáticos además de los que se identificaron previamente. Como muestra la Figura 29, solo el 27% de los encuestados aportó nuevos factores. Los factores nuevos se encuentran en la Tabla 8.

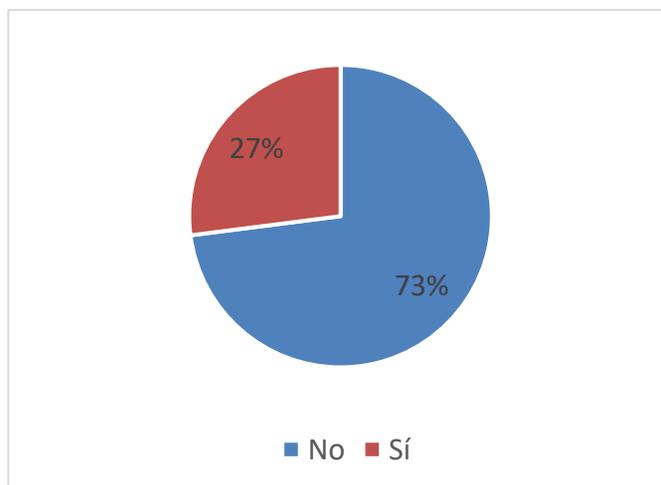


Figura 29: Existencia de nuevos factores climáticos

Factores Climáticos	Cantidad de respuestas
Alta niebla	1
Acumulación de hora frío	1
Dendrometría	1
Evotranspiración	2
Granizo	1
Humedad relativa	1
Luminosidad	1
Nivel de humedad de la planta	1
Nubosidad	1
Presión atmosférica	1

Tabla 8: Factores Climáticos agregados por los encuestados

Luego, la pregunta 8 verificaba la existencia de otros factores del suelo además de los que se identificaron previamente. Como muestra la Figura 30, el 66% de los encuestados aportó nuevos factores, entre ellos están: Almacenamiento de agua, actividad enzimática, anegabilidad, conductividad eléctrica, cultivo antecesor, densidad aparente, efecto napa, humedad del suelo, posición en relieve, porosidad, entre otros. Los 31 factores se encuentran en la Tabla 9.

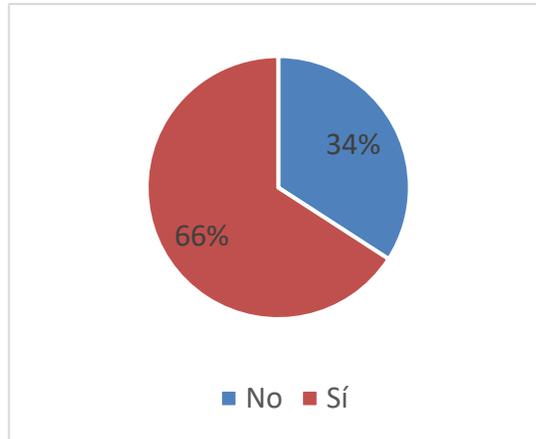


Figura 30: Existencia de nuevos factores del suelo

Factores del Suelo	Cantidad de respuestas
Almacenamiento de agua	1
Actividad enzimática	1
Anegabilidad	1
Capacidad de uso	1
Capacidad de estanque	1
Clasificación taxonómica	1
Conductividad eléctrica	6
Cultivo antecesor	1
Densidad aparente	3
Drenaje	1
Efecto napa	1
Estratificación	1
Fauna del suelo	1
Horizontes del suelo	1
Humedad del suelo	1
Litología	1
Manejo antrópico	1
Manejo histórico del suelo	1
Microbiomas de las raíces	1
Nivel de compactación	3
Niveles freáticos	1
Pedregosidad	1
Porosidad	1
Posición en el relieve	2
Presencia de concreciones	1
Retención de humedad	1

Factores del Suelo	Cantidad de respuestas
Salinidad	2
Serie del suelo	1
Velocidad de infiltración	1

Tabla 9: Factores del Suelo agregados por los encuestados

Finalmente, la última pregunta era escoger un orden apropiado de criterios para una implementación de Agricultura de Precisión. La Figura 31 muestra los resultados, 11 de los 41 encuestados eligieron el orden Cultivo, Suelo, Clima, Actividad Agrícola; en general no hay mucha variación con las otras opciones, pero permite entender la importancia del cultivo y el suelo a considerar en una implementación de AP.

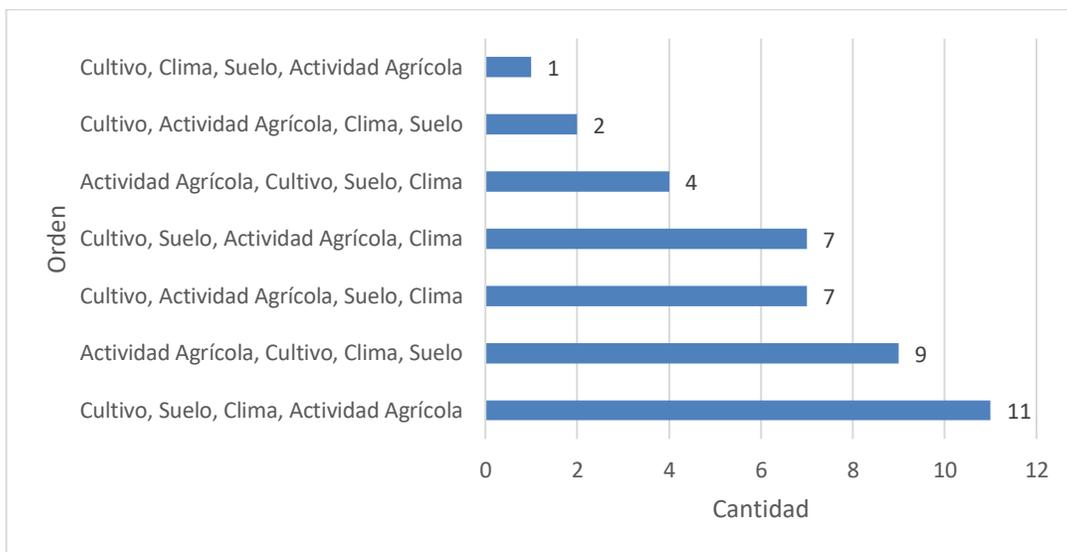


Figura 31: Orden de criterios en una implementación de AP

4.2.2.3. Discusión

Se ha logrado alcanzar un total de 41 respuestas por medio de entrevistas y encuestas. Se puede observar que tanto las respuestas entregadas por los entrevistados, como aquellas conseguidas por medio de la encuesta, poseen cierta similitud en cuanto a los resultados. Lo anterior permitió ratificar los criterios identificados.

Los expertos son principalmente chilenos, pero existe un 30% de origen internacional. Además, todos tienen una cantidad de experiencia aceptable con la Agricultura de Precisión, especialmente usando el GPS. Este nivel de experiencia nos da la seguridad de tener resultados confiables con la encuesta.

Las encuestas nos han permitido la ratificación de los criterios y su priorización, junto con sus características a considerar. El criterio más importante sería el cultivo según los resultados de la pregunta 2 y pregunta 9; además, su característica más importante sería el tipo de cultivo, tipo de agricultura según agua y densidad de siembra. Por otro lado, el criterio con menor prioridad es el clima junto con el suelo debido a que estos son más variables.

También la encuesta abordó las características a considerar de una tecnología en una implementación de AP, no se captó una gran variación entre ellas, pero las tres más importantes son costo asociado, nivel de conocimiento necesario y datos que captura. Adicionalmente, los encuestados proveyeron 18 nuevas actividades agrícolas, 12 factores climáticos y 35 factores del suelo que intervienen en una implementación de Agricultura de Precisión.

Finalmente, la última pregunta requería el orden necesario de los criterios en una implementación de AP, la respuesta con mayor cantidad de votos fue: Cultivo, Suelo, Clima y Actividad Agrícola; después estaba: Actividad Agrícola, Cultivo, Suelo y Clima. Como se puede apreciar la Actividad Agrícola cambia drásticamente de posición de última a primera en las dos opciones anteriores. Por lo que existe una gran diferencia en el orden de las dos opciones y también con los restantes, lo que nos da a entender que podría depender de la región en que se implemente la Agricultura de Precisión u otros factores. Los resultados nos indican que existe una gran flexibilidad para establecer el orden de los criterios ya que depende en sí de la experiencia del experto, pero la mayoría concuerda que el criterio llamado cultivo es el más importante.

4.2.3. Ajuste Propuesta del Framework

La propuesta inicial tenía definido un orden específico de los criterios para la implementación de la Agricultura de Precisión. El orden es el siguiente Cultivo – Actividad Agrícola – Suelo – Clima. Esa opción fue seleccionada aproximadamente por el 18% de los encuestados y la opción con mayor porcentaje fue de 28%, la variación no es tan grande. Como se mencionó anteriormente el orden de los criterios varía según el experto.

El único ajuste de la propuesta del Framework es el establecimiento por defecto del orden mencionado anteriormente, además de definir como requisito para el prototipo del Framework una versión por defecto aquel orden y otra versión según las especificaciones de los expertos. En el siguiente capítulo se explica el diseño y la construcción del prototipo del Framework.

Capítulo 5

Diseño y Construcción de Prototipo de Herramienta

En el capítulo anterior se presentó la definición del Framework para la Comparación y Selección de criterios en una implementación de Agricultura de Precisión, mostrando el proceso que se llevó a cabo para su generación, desde la obtención del conocimiento necesario para generar una propuesta inicial, hasta la creación de una propuesta final.

Este capítulo se concentra en explicar el diseño y la construcción del prototipo, donde se realizará un Sistema de recomendación basado en conocimiento, específicamente una adaptación de la arquitectura Koba4MS (Felfernig, 2005). Se realizó una búsqueda de Sistemas Expertos y Sistemas de Recomendación basados en conocimiento, hasta que finalmente se eligió el Koba4MS como el más adecuado, ya que proveía la documentación necesaria para replicarlo, usando los criterios vistos previamente.

5.1 Diseño del prototipo

Los criterios identificados se utilizaron para la generación de la base de conocimiento empleando el ambiente de desarrollo de la arquitectura Koba4MS. Esta arquitectura provee una serie de etapas que permiten definir atributos y reglas de interacción que se utilizan para la creación del Framework. Se usó como base y se adaptó para una implementación de Agricultura de Precisión. A continuación, describe la arquitectura y posteriormente la adaptación desarrollada para el Framework.

5.1.1 Koba4MS

Recientemente, Alexander Felfernig ha propuesto una arquitectura para el desarrollo de aplicaciones de recomendación basadas en el conocimiento llamada Koba4MS que consta de dos aspectos básicos. Primero, una base de conocimiento que consiste en una descripción formal del conjunto relevante de productos, posibles requisitos del cliente y restricciones. Segundo, un proceso de recomendación que representa la navegación personalizada de los caminos a través de una aplicación de recomendación.

La Figura 32 representa la arquitectura general de Koba4MS. Las bases de conocimiento y las definiciones de procesos se diseñan utilizando el Ambiente de desarrollo y se almacenan en una base de datos relacional subyacente. La aplicación de recomendación construida debe estar disponible para que los clientes puedan interactuar. Basado en las entradas dadas, el servidor determina y ejecuta un flujo de diálogo personalizado, desencadena el cálculo de resultados y determina el producto adecuado.

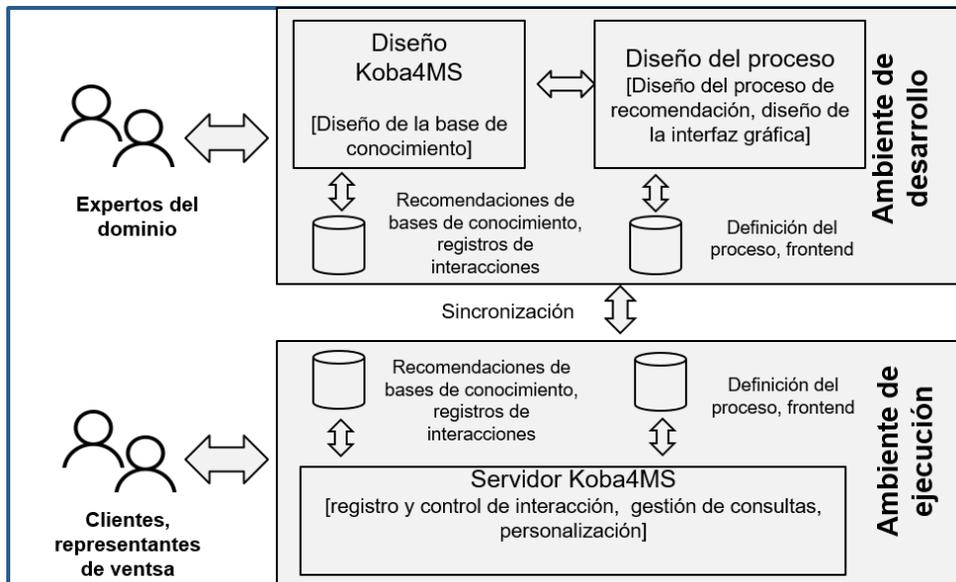


Figura 32: Arquitectura Koba4MS Original (Felfernig, 2007)

Como todos los sistemas inteligentes, los sistemas de recomendación utilizan diferentes formas de conocimiento. A veces, este conocimiento es implícito, como la distribución de las opiniones de los usuarios sobre algún grupo de elementos o el conocimiento codificado en un algoritmo; en otros casos, es conocimiento inferencial u ontológico codificado explícitamente.

Como se muestra en la Figura 33, se proponen cuatro fuentes desde donde se puede extraer el conocimiento necesario para generar recomendaciones: del propio usuario, de otros usuarios pares del sistema, de los datos sobre los elementos que se recomiendan, y finalmente del dominio de la recomendación en sí, es decir, cómo los elementos recomendados son utilizados y qué necesidades satisfacen (Felfernig, 2005).

El conocimiento social o colaborativo es el conocimiento sobre otros usuarios. Su manifestación más familiar son los perfiles de calificación numérica (opinión). Los datos demográficos también se han utilizado para establecer similitudes entre los usuarios o para complementar el comportamiento de calificación.

El conocimiento del usuario individual es el que analiza las opiniones o datos demográficos de una persona en específico y se entrega una recomendación según aquel contexto. El conocimiento histórico de las preferencias del usuario puede ser suficiente para algunas tareas de recomendación, pero en muchas circunstancias, el usuario acudirá al sistema con una intención particular en mente, y el sistema de recomendación deberá responder. Estos requisitos de usuario pueden venir en forma de consulta, restricción, preferencia o contexto.

El área de conocimiento del contenido es muy amplia. En algunos casos, un sistema tendrá muy poco conocimiento que pueda usarse para igualar las necesidades de los usuarios con los productos. La taxonomía distingue cuatro tipos diferentes de conocimiento de contenido: el conocimiento de los ítems mismos, conocimiento de los contextos particulares, conocimiento de los productos que recomienda y el conocimiento medio-fin que permite al sistema razonar sobre cómo determinados elementos (los "medios") satisfacen necesidades o requisitos particulares del usuario (los "fines").

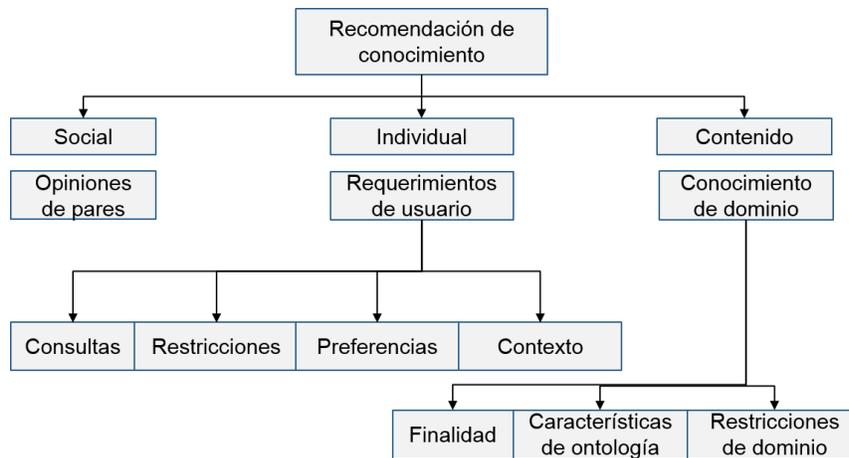


Figura 33: Fuentes de conocimiento Koba4MS (Felfernig and Burke, 2008)

A continuación, se describen las etapas para la elaboración del sistema de recomendación.

5.1.1.1 Ambiente de desarrollo

El primer paso cuando se crea una aplicación de recomendación basada en el conocimiento es la construcción de una base de conocimiento de recomendación que consta de dos conjuntos de variables que representan las propiedades del cliente (V_C) y las propiedades del producto (V_{PROD}) y tres conjuntos de restricciones correspondientes que representan tres tipos diferentes de restricciones sobre la combinación de los requisitos del cliente y productos (Restricciones de Compatibilidad(C_C), Restricciones de Filtro(C_F), Instancias del Producto(C_{PROD})) (Felfernig, 2007). A continuación, se explican con mayor detalle los conceptos:

- **Propiedades del cliente (V_C):** describen los posibles requisitos del cliente relacionados con una variedad de productos. Los requisitos del cliente son instancias de propiedades del cliente.
- **Propiedades del producto (V_{PROD}):** son una descripción de las propiedades de un conjunto dado de productos en forma de variables de dominio finito.
- **Restricciones de compatibilidad (C_C):** estas restringen las posibles combinaciones de los requisitos del cliente.
- **Restricciones de filtro (C_F):** definen la relación entre los requisitos del cliente y un surtido de productos disponible.
- **Instancias del producto (C_{PROD}):** las instancias permitidas de las propiedades del producto pueden interpretarse como restricciones que definen las posibles instancias de variables en V_{PROD} .

Después de obtener las propiedades y restricciones se procede a definir el proceso recomendador. Este consiste en proporcionar mecanismos que permitan la definición del comportamiento previsto (personalizado) de la interfaz de usuario. Una interfaz de usuario recomendada puede describirse mediante un autómata de estado finito, donde las transiciones de estado se activan por los requisitos impuestos por los clientes. Dichos autómatas se basan en el formalismo de autómatas de estados finitos basados en predicados, donde las restricciones especifican condiciones de transición entre diferentes estados.

5.1.1.2 Ambiente de ejecución

En el ambiente de ejecución se procede a desarrollar el frontend del sistema dadas las propiedades y restricciones establecidas anteriormente. En este ambiente los usuarios interactúan señalando sus requisitos con el objetivo de obtener el resultado más acertado.

5.1.2 Adaptación del Koba4MS para ser usada en una implementación de AP

La arquitectura Koba4MS se enfoca al área de marketing y venta de productos, donde los clientes interactúan con el sistema hasta encontrar el producto óptimo según las necesidades requeridas. Se ha decidido adaptar la arquitectura hacia el área de la Agricultura de Precisión. El cliente se reemplazará por los requisitos de una implementación de AP, estos requerimientos serán los criterios de cultivo, actividad agrícola, clima y suelo identificados previamente. A su vez, el producto equivaldrá a la tecnología(s) resultante(s) de los requisitos entregados. La Figura 34 muestra la distribución de criterios.

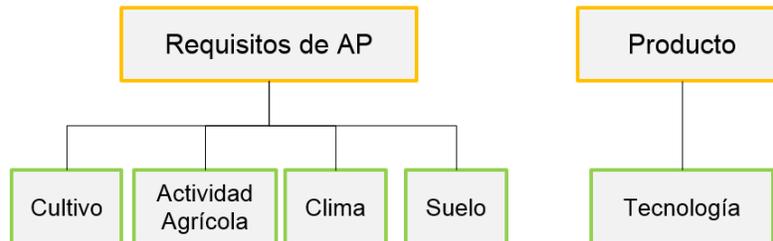


Figura 34: Criterios participantes en la arquitectura

La Figura 35 muestra las ligeras variaciones realizadas. Se diseñará la base de conocimiento y el proceso de recomendación de igual forma que la versión original. Se cambiarán los participantes involucrados, además del ambiente de ejecución. Debido a que no se tiene acceso al Koba Server se desarrollará un sistema Web, su diseño y construcción se especificará en el Capítulo 5. A continuación, se describen las etapas realizadas.

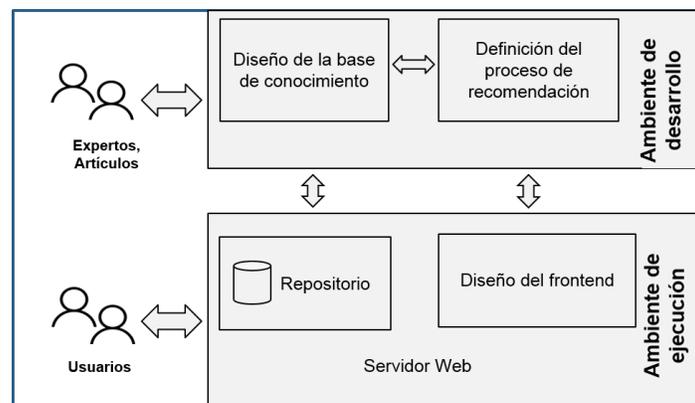


Figura 35: Arquitectura Koba4MS Adaptada

No se han utilizado las mismas fuentes de la versión original, debido a que estas estaban más enfocadas al área de marketing y ventas. La Figura 36, presenta las fuentes de conocimiento usadas. La fuente principal de conocimiento es el Framework; a su vez, éste se basa en los criterios identificados durante la Revisión Sistemática de la Literatura y de la revisión de la industria. Además, se emplean las relaciones establecidas durante la revisión de la industria y la encuesta realizada por los expertos. Adicionalmente, en el futuro se planea considerar como fuente de conocimiento las opiniones individuales de los usuarios que hayan interactuado con el sistema, por esta razón, se presenta en la figura con una línea punteada.

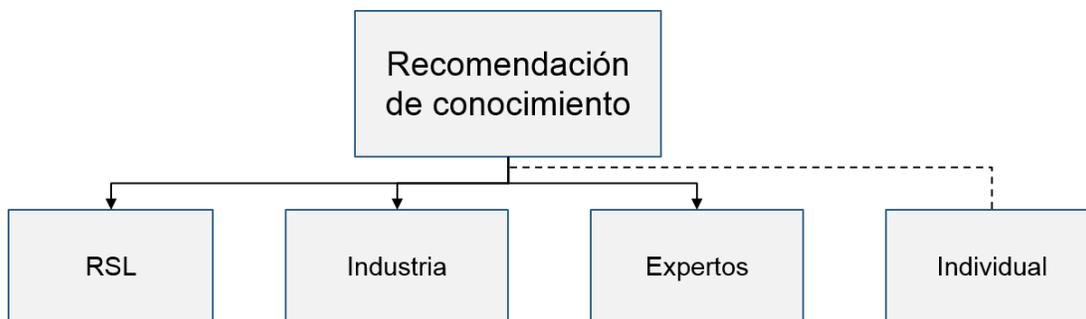


Figura 36: Fuentes de conocimiento del Framework

5.1.2.1 Ambiente de desarrollo – Adaptación Koba4MS

Para el ambiente de desarrollo se planea utilizar el mismo que propuso Felfernig, descrito en la Sección 5.1.1.1. Se realiza la definición de propiedades de los requisitos de una implementación de AP, de la tecnología y de las restricciones. Estas se especifican a continuación.

5.1.2.1.1 Definición de propiedades de los requisitos de una implementación de AP

Para la definición de las propiedades de los requisitos se utilizarán los criterios de cultivo, actividad agrícola, clima y suelo, además, de los subcriterios identificados para cada uno de esos criterios. Debido a que estas son características y necesidades que se deben considerar para elegir la solución adecuada. A continuación, se describe cada uno de ellos.

- **Actividad agrícola:** es la tarea en la se empleará la tecnología. Los valores posibles son las 9 actividades que se identificaron previamente y fueron validadas por los expertos mediante la encuesta.
- **Año de plantación:** En caso de ser árboles frutales influye este factor. El árbol se planta, pero los primeros años que está en crecimiento no se encuentra en producción, es decir, no se puede cosechar. Cuando llega a una edad madura, estará en periodo de producción y se cosechará anualmente.
- **Altura del cultivo:** influye en que categorías se pueden utilizar. Con la asesoría de un Ingeniero Agrónomo, se plantearon los siguientes valores posibles: bajos (menor a 1 metro), medio (igual a 1 metro) y alto (mayor a 1 metro).
- **Cultivo:** es el producto agrícola específico en el que se realizará la implementación de Agricultura de Precisión. Los posibles valores son los cultivos identificados durante la RSL.
- **Factor climático:** son los elementos del clima que necesitará capturar. Los valores posibles

son los 4 factores que se identificaron previamente, que fueron validados por los expertos.

- **Factor de suelo:** son los elementos del suelo que necesitará capturar. Los valores posibles son los 7 factores que se identificaron previamente y fueron validados por los expertos mediante la encuesta.
- **Superficie del terreno:** el tamaño del terreno en el que se utilizará la TI influye al momento de implementar Agricultura de Precisión, debido a que el alcance de cada TI es distinto. En la Revisión de la Industria se indicó que se realizó una clasificación en base a la superficie de explotaciones de la agricultura que provee Rimisp. Los valores posibles son pequeños (1 a 3 ha), mediano (3 a 30 ha), grande (30 a 100 ha) y muy grande (más de 100 ha).
- **Tipo de agricultura según agua:** cómo se hidratará el cultivo para su crecimiento. Principalmente, existe la agricultura de secano, donde el ser humano no contribuye a la irrigación de los campos, sino que se utiliza únicamente la que proviene de la lluvia; y la agricultura de regadío que consiste en el suministro de agua a través de canales, aspersores, acequias, entre otros.
- **Tipo de cultivo:** se refiere a la clasificación a la que pertenece aquel cultivo. Se utilizaron las categorías que entrega la Odepa, son las siguientes: cereal, fruta, hortaliza, leguminosa, papa y otro.

En la Tabla 10 se muestran las propiedades definidas, donde por cada subcriterio se presenta el criterio al que pertenece, su identificador y los posibles valores que puede adoptar. Cabe destacar, que el formato del ID está basado en la notación que se utilizó en (Felfernig, 2007).

Criterio	Subcriterio	ID	Valores
Cultivo	Cultivo	nombrec _r	[text]
Cultivo	Tipo de cultivo	tc _r	[cereal, fruta, hortaliza, leguminosa, papa, otro]
Cultivo	Tipo de agricultura según agua	taa _r	[regadío, secano]
Cultivo	Altura del cultivo	ac _r	[bajo, medio, alto]
Cultivo	Superficie del terreno	st _r	[pequeño, mediano, grande, muy grande]
Cultivo	Año de plantación	ap _r	[No producción, Producción, No aplica]
Actividad Agrícola	Actividad agrícola	tag _r	[Adecuación de suelos, Siembra, Fertilización, Control de crecimiento, Control de malezas, Control de plagas, Control de enfermedades, Riego, Cosecha]
Suelo	Factor del suelo	tfsc	[Contenido de nutrientes, Estructura, Materia orgánica, pH, Profundidad, Textura, Topografía]
Clima	Factor climático	tfcc	[Humedad, Precipitación, Temperatura, Viento]

Tabla 10: Criterios de requisitos de AP

5.1.2.1.2 Definición de propiedades de la tecnología

Son una descripción de las propiedades de un conjunto dado de productos en forma de variables de dominio finito, es decir, equivalen a los subcriterios definidos de la tecnología. Los subcriterios son los siguiente:

- **Tecnología:** es la TI o software que se utilizará para la implementación de AP. Los posibles valores son las tecnologías identificadas durante la Revisión Sistemática de la Literatura.
- **Datos capturados:** son los factores del suelo y del clima que pueden ser recolectados por una tecnología, en caso de que esta tenga la función de captar datos.
- **Función que desarrolla:** Cada tecnología tiene una o muchas funciones que puede realizar dentro de una implementación de Agricultura de Precisión. Por ejemplo, capturar los datos; procesarlos, es decir, convertirlos a información; almacenarlos en una base de datos o aplicar algún insumo.
- **Prerrequisitos:** algunas tecnologías tienen prerrequisitos asociados. La tecnología puede requerir alguna base de datos, software u otra tecnología para poder ser utilizada.
- **Nivel de conocimiento:** cada tecnología exige un nivel de conocimiento debido a que existe una complejidad al momento de implementar una tecnología, algunas necesitan solo una breve capacitación, mientras que otras solo pueden ser utilizadas por algún experto. Los valores posibles son Mínimo, Medio y Avanzado. Con un conocimiento mínimo solo se necesita de un conocimiento básico de computadoras, con el medio se necesita de una capacitación previa para el uso de la tecnología, finalmente el avanzado indica que la tecnología debe ser operada por un experto.
- **Eficiencia:** previamente existía el factor de costo asociado a la tecnología. Pero después de un análisis, se identificó que el precio no se puede clasificar en rangos, ya que depende más del modelo de la tecnología y de la empresa proveedora. Por lo que, se optó por cambiar a Eficiencia, para especificar la relación general entre precio y calidad. Los valores posibles son Baja, Media y Alta.

En la Tabla 11 se puede observar cada subcriterio junto con su identificador y sus posibles valores.

Subcriterio	ID	Valores
Tecnología	nombret _t	[text]
Datos capturados	dc _t	[Humedad, Precipitación, Temperatura, Viento] Δ [Contenido de nutrientes, Estructura, Materia orgánica, pH, Profundidad, Textura, Topografía] Δ [Enfermedades, Imágenes, Luz, Propiedades del suelo, Ubicación, Ninguno]
Función que desarrolla	fd _t	[Almacenar, Aplicar insumo, Capturar, Procesar]
Prerrequisitos	pr _t	[Base de datos, Software, Tecnología, Ninguno]
Nivel de conocimiento	nc _t	[Mínimo, Medio, Avanzado]
Eficiencia	e _t	[Baja, Media, Alta]

Tabla 11: Propiedades del producto

5.1.2.1.3 Definición de restricciones de compatibilidad

Las restricciones de compatibilidad limitan las posibles combinaciones de los requisitos de la implementación de AP. Se han determinado 12 restricciones de la compatibilidad, se presentan a continuación:

- **Cc1:** para un cultivo donde su tipo no es Fruta, no influye su año de plantación debido a que son anuales o bianuales. Por lo tanto, estos cultivos no frutales solo pueden tener valor de año de plantación a No aplica.
- **Cc2:** para un cultivo donde su tipo sea Fruta, si estará involucrado el año de plantación, por lo que no puede tener valor de No aplica.
- **Cc3:** si el tipo de agricultura según agua es Secano, significa que no estará involucrada la actividad de Riego.
- **Cc4:** si el año de plantación tiene valor de No Producción, significa que está en crecimiento y no está involucrada la actividad de Cosecha.
- **Cc5:** en la actividad de Adecuación de suelos no están involucrados los factores de suelo de Materia orgánica ni pH.
- **Cc6:** en la actividad de Control de crecimiento no está involucrado el factor de suelo de Materia Orgánica.
- **Cc7:** en la actividad de Control de malezas suelos no están involucrados los factores de suelo de Materia orgánica ni Estructura.
- **Cc8:** en la actividad de Cosecha solo está involucrado el factor de suelo de Topografía.
- **Cc9:** en la actividad de Control de enfermedades solo están involucrados los factores de suelo de Contenido de nutrientes y Textura.
- **Cc10:** en la actividad de Adecuación de suelos solo están involucrados los factores climáticos de Precipitación y Viento.
- **Cc11:** en la actividad de Siembra no está involucrado el factor climático de Radiación solar.
- **Cc12:** si el año de plantación tiene como valor Producción ya se ha realizado las actividades de Adecuación de suelos y Siembra por lo que ya no deben involucrarse.

Las restricciones de compatibilidad se pueden observar en la Tabla 12, donde se encuentra su identificador junto con la regla establecida utilizando la sintaxis usada en la arquitectura original.

ID	Compatibility Constraints (Cc)
Cc1	$\neg (\neg tc_r = Fruta \wedge (ap_r = No\ Producci3n \vee ap_r = Producci3n))$
Cc2	$\neg (tc_r = Fruta \wedge ap_r = No\ aplica)$
Cc3	$\neg (taa_r = Secano \wedge tag_r = Riego)$
Cc4	$\neg (ap_r = No\ Producci3n \wedge tag_r = Cosecha)$
Cc5	$\neg (tag_r = Adecuaci3n\ de\ suelos \wedge (tfs_r = Materia\ Org3nica \vee tfs_r = pH))$
Cc6	$\neg (tag_r = Control\ de\ crecimiento \wedge tfs_r = Materia\ Org3nica)$
Cc7	$\neg (tag_r = Control\ de\ malezas \wedge (tfs_r = Materia\ Org3nica \vee tfs_r = Estructura))$
Cc8	$\neg (tag_r = Cosecha \wedge \neg (tfs_r = Topograf3a))$
Cc9	$\neg (tag_r = Control\ de\ enfermedades \wedge \neg (tfs_r = Contenido\ de\ nutrientes \vee tfs_r = Textura))$
Cc10	$\neg (tag_r = Adecuaci3n\ de\ suelos \wedge \neg (tfc_r = Precipitaci3n \vee tfc_r = Viento))$
Cc11	$\neg (tag_r = Siembra \wedge tfc_r = Radiaci3n\ Solar)$
Cc12	$\neg (ap_r = Producci3n \wedge (tag_r = Adecuaci3n\ de\ Suelos \vee tag_r = Siembra))$

Tabla 12: Restricciones de compatibilidad

5.1.2.1.4 Definici3n de instancias de la tecnolog3a

Las instancias permitidas de las propiedades de la tecnolog3a pueden interpretarse como restricciones que definen las posibles instancias de variables en VPROD. A continuaci3n, se presenta la descripci3n de las instancias:

- CP1: La tecnolog3a UGV permite capturar im3genes, despu3s de un an3lisis puede cosechar el cultivo maduro. Como prerrequisito necesita de sensores y un nivel avanzado de conocimiento previo. Esta tecnolog3a no es muy utilizada actualmente, por lo que se necesita de un experto para su uso.
- CP2: La tecnolog3a UAV permite capturar diversos factores, adem3s se pueden aplicar insumos. No tiene prerrequisitos y el nivel de conocimiento necesario para el operador es medio.
- CP3: La tecnolog3a WSN permite capturar diversos factores. Tiene como prerrequisito un software para su uso, adem3s, su nivel de conocimiento m3nimo es medio. Normalmente esta tecnolog3a se solicita a una empresa proveedora, no se adquiere independiente. Por lo que, el proveedor debe realizar una capacitaci3n para su uso.
- CP4: La tecnolog3a Remote Sensing permite capturar diversos factores. Tiene como prerrequisito un software para su uso, adem3s, su nivel de conocimiento m3nimo es medio.
- CP5: La tecnolog3a Sensor General permite capturar diversos factores. Tiene como prerrequisito un software para su uso, adem3s, su nivel de conocimiento m3nimo es medio.
- CP6: La tecnolog3a GPS permite capturar la ubicaci3n. No tiene ning3n prerrequisito y su nivel de conocimiento m3nimo es b3sico. Normalmente esta tecnolog3a se encuentra integrada dentro de otras.

- CP7: La tecnología multimedia permite captar imágenes. No tiene ningún prerrequisito y su nivel de conocimiento mínimo es básico. Solo se necesitan las habilidades básicas de uso de cámaras, smartphones y computadoras.
- CP8: La técnica Yield Map permite procesar y analizar la información obtenida. Tiene como prerrequisito un sensor o base de datos y su nivel de conocimiento es medio. Las empresas proveedoras de esta herramienta, deben realizar de una capacitación para su uso.
- CP9: La técnica Yield Monitor permite procesar y analizar la información obtenida. Tiene como prerrequisito un sensor o base de datos y su nivel de conocimiento es medio. Las empresas proveedoras de esta herramienta, deben realizar de una capacitación para su uso.
- CP10: El software GIS permite almacenar los datos y analizarlos. Para su uso se requieren sensores para la captura de datos y/o una base de datos con la información previa. Su nivel de conocimiento necesario es medio. Se debe recibir una capacitación previa para su uso.
- CP11: La técnica VRA permite ejecutar, es decir, aplicar un insumo en lugares específicos. Se necesitan previamente sensores o base de datos. Su nivel de conocimiento es medio. Las empresas proveedoras de esta herramienta, deben realizar de una capacitación para su uso.
- CP12: La técnica VRF permite ejecutar, es decir, aplicar un insumo en lugares específicos. Se necesitan previamente sensores o base de datos. Su nivel de conocimiento es medio. Se necesita de una capacitación para su uso.
- CP13: La técnica VRI permite ejecutar, es decir, aplicar un insumo en lugares específicos. Se necesitan previamente sensores o base de datos. Su nivel de conocimiento es medio. Las empresas proveedoras, deben realizar de una capacitación para su uso.

En la Tabla 13 se encuentran todas las tecnologías disponibles con los datos que capturan, su función su nivel de conocimiento requerido y su eficiencia.

ID	Allowed instantiations of Product Properties (CP)
CP1	nombret _t = UGV \wedge dc _t = Imágenes \wedge fd _t = Capturar \wedge fd _t = Aplicar Insumo \wedge pr _t = Tecnología \wedge nc _t = Alto \wedge e _t = Media
CP2	nombret _t = UAV \wedge dc _t = Imágenes \wedge dc _t = Ubicación \wedge dc _t = Propiedades del suelo \wedge dc _t = Humedad \wedge dc _t = Enfermedades \wedge fd _t = Capturar \wedge fd _t = Aplicar Insumo \wedge pr _t = Ninguno \wedge nc _t = Medio \wedge e _t = Alta
CP3	nombret _t = WSN \wedge dc _t = Enfermedades \wedge dc _t = Luz \wedge dc _t = Ubicación \wedge dc _t = Temperatura \wedge dc _t = Humedad \wedge dc _t = Viento \wedge dc _t = Propiedades del suelo \wedge dc _t = pH \wedge dc _t = Radiación Solar \wedge fd _t = Capturar \wedge pr _t = Software \wedge nct = Medio \wedge e _t = Alta
CP4	nombret _t = RS \wedge dc _t = Enfermedades \wedge dc _t = Ubicación \wedge dc _t = Luz \wedge dc _t = Temperatura \wedge dc _t = Viento \wedge dc _t = Propiedades de suelo \wedge dc _t = pH \wedge dc _t = Radiación Solar \wedge fd _t = Capturar \wedge prt = Software \wedge nc _t = Medio \wedge e _t = Alta
CP5	nombret _t = Sensor \wedge dc _t = Enfermedades \wedge dc _t = Luz \wedge dc _t = Temperatura \wedge dc _t = Viento \wedge dc _t = Propiedades del suelo \wedge dc _t = Ubicación \wedge dc _t = pH \wedge fd _t = Capturar \wedge pr _t = Software \wedge nc _t = Medio \wedge e _t = Alta

ID	Allowed instantiations of Product Properties (CP)
CP6	nombret _t = GPS \wedge dc _t = Ubicación \wedge fd _t = Capturar \wedge pr _t = Ninguno \wedge nc _t = Básico \wedge e _t = Baja
CP7	nombret _t = Multimedia \wedge dc _t = Imágenes \wedge fd _t = Capturar \wedge pr _t = Ninguno \wedge nc _t = Básico \wedge e _t = Mínimo
CP8	nombret _t = Yield Map \wedge dc _t = Ninguno \wedge fd _t = Procesar \wedge pr _t = Tecnología \wedge pr _t = Base de Datos \wedge nc _t = Medio \wedge e _t = Alta
CP9	nombret _t = Yield Monitor \wedge dc _t = Ninguno \wedge fd _t = Procesar \wedge pr _t = Tecnología \wedge pr _t = Base de Datos \wedge nc _t = Medio \wedge e _t = Alta
CP10	nombret _t = GIS \wedge dc _t = Ninguno \wedge fd _t = Almacenar \wedge pr _t = Base de Datos \wedge nc _t = Medio \wedge e _t = Alta
CP11	nombret _t = VRA \wedge dc _t = Ninguno \wedge fd _t = Aplicar Insumo \wedge pr _t = Tecnología \wedge pr _t = Base de Datos \wedge nc _t = Medio \wedge e _t = Alta
CP12	nombret _t = VRF \wedge dc _t = Ninguno \wedge fd _t = Aplicar Insumo \wedge pr _t = Tecnología \wedge pr _t = Base de Datos \wedge nc _t = Medio \wedge e _t = Alta
CP13	nombret _t = VRI \wedge dc _t = Ninguno \wedge fd _t = Aplicar Insumo \wedge pr _t = Tecnología \wedge pr _t = Base de Datos \wedge nc _t = Medio \wedge e _t = Alta

Tabla 13: Instancias del producto

5.1.2.1.5 Diseño del comportamiento a través de un autómata

Con las propiedades del cliente y del producto se procedió a establecer un autómata que represente el comportamiento del Framework. El autómata está formado por 9 estados o variables, donde cada uno representa a una de las propiedades del cliente. A su vez, las propiedades del cliente involucran criterios y subcriterios del Framework, definido en la Sección 4. Los primeros seis estados representan al criterio de Cultivo, mientras que el séptimo estado implica al criterio de Actividad Agrícola. Continuando, con el octavo y noveno estado, que representan al factor del suelo y climático respectivamente. A continuación, se presentan en la Tabla 14.

- q₀ - Cultivo: Es el estado inicial y representa al producto agrícola en específico que se está cultivando, por ejemplo, manzana. Es lo primero que se debe consultar, ya que cada cultivo tiene características distintas.
- q₁ – Tipo de Cultivo: Se continua con el Tipo de cultivo, es decir, a que clasificación pertenece, como cereal o frutal. Si es frutal significa que es un árbol, posteriormente se debe consultar por el año de plantación.
- q₂ – Tipo de agricultura según agua: Define como se hidratará el cultivo, si solo con la lluvia o también con regadío.
- q₃ – Altura del Cultivo: Posteriormente, se encuentra la estatura que tiene el cultivo, donde se definieron los valores bajo, medio y alto.
- q₄ – Año de plantación: Después, se encuentra un elemento específico de cada empresa, que es la cantidad de años que se encuentra plantado. Este estado solo se consulta, si el tipo de cultivo es frutal.
- q₅ – Superficie del terreno: Se continua con la extensión del terreno o tamaño. Este es un subcriterio de cultivo, pero específicamente se relaciona con la empresa.

- q_6 – Tipo de actividad agrícola: Se refiere al criterio de Actividad agrícola, es decir, la tarea en la que se empleará la tecnología.
- q_7 – Tipo de factor de suelo: Representa al criterio de Suelo, que son los elementos del suelo que se deben capturar.
- q_8 – Tipo de factor climático: Finalmente, este estado representa al criterio de Clima, que son los elementos climáticos que se deben capturar.

Variables	Propiedad	Id
$var(q_0)$	Cultivo	nombrec _r
$var(q_1)$	Tipo de cultivo	tc _r
$var(q_2)$	Tipo de agricultura según agua	taa _r
$var(q_3)$	Altura del cultivo	ac _r
$var(q_4)$	Año de plantación	ap _r
$var(q_5)$	Superficie del terreno	st _r
$var(q_6)$	Tipo de actividad agrícola	tag _r
$var(q_7)$	Tipo de factor de suelo	tfs _r
$var(q_8)$	Tipo de factor climático	tfc _r

Tabla 14: Variables del autómata

El autómata se presenta mediante la Figura 37, donde sigue un orden secuencial obligatorio utilizando la transición True. La única bifurcación que existe es al momento de solicitar el año de plantación, solo se pasará a este estado si el tipo de cultivo que ha sido elegido previamente es el Frutal. Como ya se mencionó, las transiciones involucran el orden de los criterios que se definió en la Sección 4.2.3. Se solicitan primero las seis variables relacionadas con los criterios de cultivo. Además, de la variable q_0 a q_4 son específicas del cultivo, mientras que q_5 es sobre el tamaño del predio que destina la empresa al cultivo. Los últimos 3 estados consultan sobre los criterios de actividad agrícola, suelo y clima respectivamente.

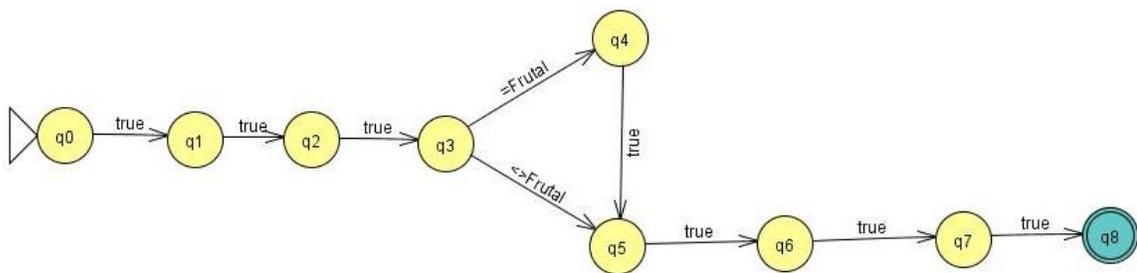


Figura 37: Autómata con orden de criterios a solicitar

Se continúa con el ambiente de ejecución, es decir, la construcción del prototipo de herramienta, donde el proceso de recomendación sigue el orden del autómata. Se presentarán sus características, el detalle de la base de datos y las pantallas principales.

5.2 Construcción del prototipo

El ambiente de ejecución, es decir, la construcción del prototipo de herramienta permite utilizar el Framework de forma más cómoda. Este prototipo es un Sistema de Recomendación basado en conocimiento utilizado en una aplicación Web que ha sido pensada para seleccionar de forma rápida y sencilla las recomendaciones que entregaría el Framework para las aplicaciones que éstas se vean enfrentadas a desarrollar. Esta herramienta puede ser descargada desde <http://colvin.chillan.ubiobio.cl/mcaro/cisternas>.

5.2.1 Características generales del prototipo

Como el desarrollo de la herramienta solo sirve para mostrar la aplicabilidad del Framework, para su desarrollo se privilegiaron tecnologías conocidas previamente. Así entonces, para la construcción del prototipo de herramienta se trabajó bajo el patrón Modelo Vista Controlador, apoyado por el Framework Laravel, el cual es usado dentro del lenguaje de programación orientado a objetos PHP. Como gestor de base de datos se usó phpmyadmin para almacenar la información necesaria de la aplicación. Además, se utilizó TensorRec, un sistema de recomendación de Python que permite desarrollar rápidamente algoritmos y personalizarlos con TensorFlow. Este permite obtener las recomendaciones que proporciona el Framework creado.

El prototipo de herramienta considera como usuario al experto o interesado en implementar AP, el cual es quien hace uso del Framework propiamente tal, seleccionando los criterios para obtener como resultado la(s) tecnología(s).

Para hacer uso del Framework, el interesado debe, responder las preguntas según el orden de los criterios (Cultivo, Actividad Agrícola, Suelo, Clima). Luego, el prototipo de herramienta mostrará a continuación las recomendaciones que entregaría el Framework para las características y el contexto seleccionados. Además, se facilitará al usuario la información básica de cada tecnología.

Como se mencionó anteriormente, la aplicación está pensada para ser usada por interesados en implementar Agricultura de Precisión o proveedores. Si bien el prototipo de herramienta trabaja inicialmente con las configuraciones entregadas por el Framework, podría llegar a ser deseable por los usuarios actualizar el contenido de los criterios, ya sea agregar nuevas instancias o modificar los valores actuales. De este modo, se mantiene actualizado la información de cada una de las tecnologías, cultivos, actividades, clima, suelo y relaciones, a través del paso del tiempo.

5.2.2 Modelo Entidad Relación

Se diseñó un Modelo Entidad Relación para representar los participantes del proceso de negocio y sus relaciones, este se puede observar en la Figura 38.

Basándose en la descripción de los criterios y propiedades de la Sección 5.1.2, se establecieron 5 entidades participantes, estas son: Actividad Agrícola, Clima, Cultivo, Suelo y Tecnología. A continuación, se detalla cada una de ellas.

- **Actividad Agrícola:** Se refiere al criterio del mismo nombre, son las tareas agrícolas relacionadas al tratamiento del suelo y del cultivo.
- **Clima:** Representa al criterio del mismo nombre, son los elementos climáticos que afectan el crecimiento del cultivo.

- Cultivo: Simboliza al criterio del mismo nombre, son los productos agrícolas que se están cultivando. Como atributos tiene los subcriterios del cultivo definidos en la Sección 5.1.2.1.1.
- Suelo: Representa al criterio del mismo nombre, es la composición del suelo que afecta al crecimiento del cultivo.
- Tecnología: Representa al criterio del mismo nombre, son las herramientas tecnológicas que solucionan los requerimientos definidos por la empresa. Como atributos tiene los subcriterios definidos en la Sección 5.1.2.1.2. Además, una tecnología puede necesitar de otra o ser necesitada por otra como prerequisite de implementación.

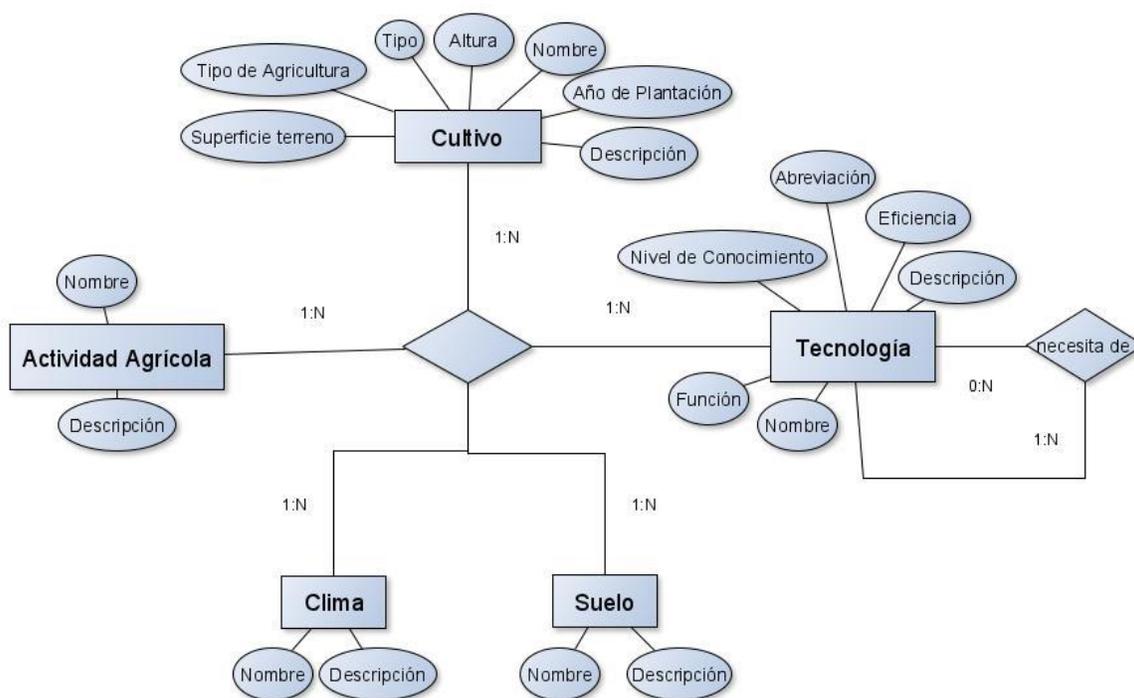


Figura 38: Modelo Entidad Relación

5.2.3 Pantallas principales del prototipo

Se presentan las principales pantallas del prototipo, junto a una breve descripción de cada de ellas. La Figura 39 muestra la pantalla de inicio del prototipo, que explica el término Agricultura del Precisión y el objetivo del Framework. Como se puede observar, se presentan cinco opciones en la barra de navegación: Recomendación, Intervenciones, Tecnologías, Criterios y Glosario.

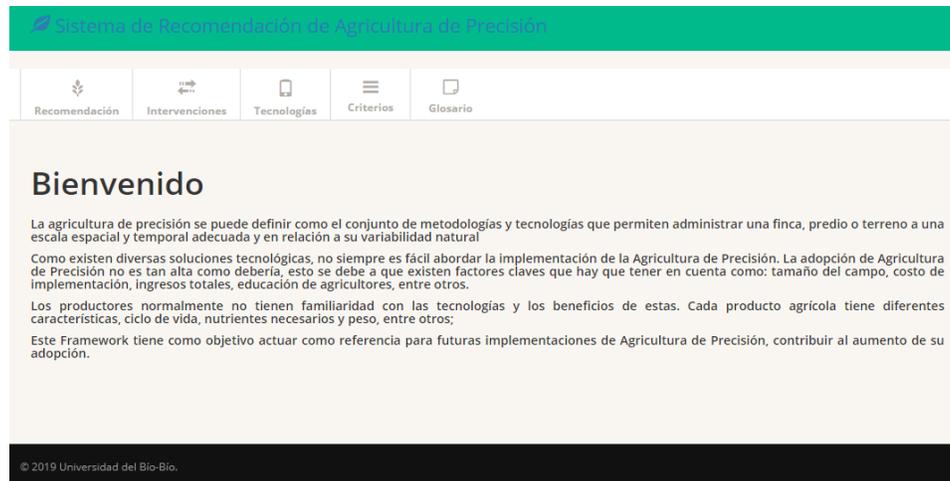


Figura 39: Pantalla de inicio

Primero, en Recomendación, desde la Figura 40 a Figura 45 se presenta el proceso de Recomendación de las Tecnologías, donde sigue el orden del autómata descrito en la anterior. El usuario debe ir respondiendo las preguntas en cuántos los criterios de Cultivo (Figura 40), Actividad Agrícola (Figura 41), Factor del Suelo (Figura 42), Factor Climático (Figura 43) y Tecnología (Figura 44). Para mayor facilidad de uso, el proceso se divide en 5 pasos o etapas, cada uno vinculado a un criterio. Cabe destacar, que si el usuario desliza el puntero sobre los símbolos de asteriscos que aparecen al lado de algunas preguntas, se le proveerá una breve descripción de las opciones posibles.

Sistema de Recomendación de Agricultura de Precisión

Recomendación Intervenciones Tecnologías Criterios Glosario

Paso 1 Cultivo Paso 2 Actividad Agrícola Paso 3 Suelo Paso 4 Clima Paso 5 Tecnología

Cultivo

¿Cuál es el cultivo?

¿Qué tipo de agricultura tiene según agua? *

¿En que etapa de crecimiento se encuentra el cultivo frutal? *

¿Cuál es el tamaño del terreno? *

Previous Next Finish

Figura 40: Pantalla de Recomendación - Cultivo

Cultivo: Arroz

Actividad Agrícola

¿En cuál(es) actividad(es) agrícola(s) se necesitarán las tecnologías?

NOMBRE	
Adecuación de Suelos	<input type="checkbox"/>
Siembra	<input checked="" type="checkbox"/>
Fertilización	<input type="checkbox"/>
Control de Crecimiento	<input type="checkbox"/>
Control de Malezas	<input type="checkbox"/>
Control de Plagas	<input type="checkbox"/>
Control de Enfermedades	<input type="checkbox"/>
Riego	<input type="checkbox"/>
Cosecha	<input type="checkbox"/>

Previous Next Finish

Figura 41: Pantalla de Recomendación - Actividad Agrícola

Paso 1 Cultivo Paso 2 Actividad Agrícola Paso 3 Suelo Paso 4 Clima Paso 5 Tecnología

Cultivo: Arroz

Factores del Suelo

¿Qué factor(es) del suelo se deben considerar?

NOMBRE	
Contenido Nutrientes	<input checked="" type="checkbox"/>
Estructura	<input type="checkbox"/>
Materia Orgánica	<input type="checkbox"/>
pH	<input type="checkbox"/>
Profundidad	<input type="checkbox"/>
Textura	<input type="checkbox"/>
Topografía y Pendiente	<input checked="" type="checkbox"/>

Previous Next Finish

Figura 42: Pantalla de Recomendación - Factores del Suelo

Paso 1 Cultivo Paso 2 Actividad Agrícola Paso 3 Suelo Paso 4 Clima Paso 5 Tecnología

Cultivo: Arroz

Factores Climáticos

¿Qué factor(es) climático(s) se deben considerar?

NOMBRE	
Humedad	<input checked="" type="checkbox"/>
Precipitación	<input checked="" type="checkbox"/>
Radiación Solar	<input type="checkbox"/>
Temperatura	<input type="checkbox"/>
Viento	<input type="checkbox"/>

Previous Next Finish

Figura 43: Pantalla de Recomendación - Factores Climáticos

En la Figura 44, se agrega el paso de Tecnología como un filtro para reducir el número de tecnologías a recomendar. Para esto utiliza los subcriterios objetivo o función que desarrolla, prerequisites, nivel de conocimiento y eficiencia, previamente explicados en la Sección 5.1.2.1.2 como propiedades de la tecnología.

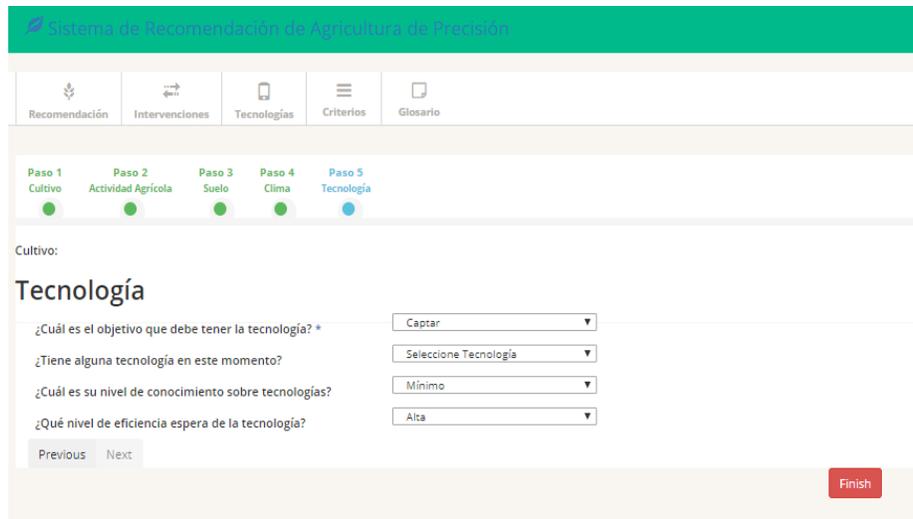


Figura 44: Pantalla de Recomendación - Tecnología

Una vez respondidas las preguntas, al usuario se le entrega el resultado, es decir, la(s) tecnologías adecuadas según las condiciones específicas que fueron entregadas. La Figura 45 muestra un ejemplo de resultado de recomendación. Por cada tecnología se entrega los factores con los que se relaciona. Además, en caso de que no exista una recomendación para esas condiciones, también se indicará.



Figura 45: Resultado de la Recomendación

Segundo, la opción de Intervenciones ofrece todas las combinaciones o relaciones posibles entre las propiedades de los criterios de Cultivo, Actividad Agrícola, Suelo, Clima y Tecnología. Además, se permite agregar nuevas combinaciones. Se puede visualizar en la Figura 46.

Lista de Combinaciones de Propiedades

+ Agregar Combinación de Propiedades

	CULTIVO	TIPO DE ACTIVIDAD AGRÍCOLA	TIPO DE SUELO	TIPO DE CLIMA	ESTADO	
1	Aceite de Palma	Adecuación de Suelos	-	Precipitación	Activo	🔍 ✎ 🔄
2	Aceite de Palma	Adecuación de Suelos	-	Viento	Activo	🔍 ✎ 🔄
3	Aceite de Palma	Adecuación de Suelos	Contenido Nutrientes	-	Activo	🔍 ✎ 🔄
4	Aceite de Palma	Adecuación de Suelos	Profundidad	-	Activo	🔍 ✎ 🔄
5	Aceite de Palma	Adecuación de Suelos	Textura	-	Activo	🔍 ✎ 🔄
6	Aceite de Palma	Adecuación de Suelos	Topografía y Pendiente	-	Activo	🔍 ✎ 🔄
7	Aceite de Palma	Siembra	-	Humedad	Activo	🔍 ✎ 🔄
8	Aceite de Palma	Siembra	-	Precipitación	Activo	🔍 ✎ 🔄
9	Aceite de Palma	Siembra	-	Temperatura	Activo	🔍 ✎ 🔄
10	Aceite de Palma	Siembra	-	Viento	Activo	🔍 ✎ 🔄

Figura 46: Pantalla Intervenciones

En la Figura 47 se muestra la tercera opción de Tecnologías. Donde se puede visualizar todas las TI identificadas, junto con sus propiedades. Además, por cada una existe una ficha que ofrece más detalles, por ejemplo, fortalezas, debilidad y enlaces donde adquirirla. Junto con la visualización de los datos, es posible actualizar su actualización y agregar nuevas tecnologías. De esta forma, no queda obsoleta la herramienta.

Lista de Tecnologías

Gestionar Características Tecnologías + Agregar Tecnología

	NOMBRE	NIVEL DE CONOCIMIENTO REQUERIDO	EFICIENCIA	ESTADO	
1	Autoguidar	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄
2	Geographic Information System (GIS)	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄
3	Remote Sensor (RS)	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄
4	Sensor	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄
5	Unmanned Aerial System (UAS)	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄
6	Unmanned Aerial Vehicle (UAV)	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄
7	Unmanned Ground Vehicle (UGV)	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄
8	Variable Rate Fertilization (VRF)	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄
9	Wireless Sensor Network (WSN)	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄
10	Yield Map	Medio	Alta	Activo	🔍 ✎ 🔄

Figura 47: Pantalla Tecnologías

Cuarto, se muestran los criterios establecidos, los que son Cultivo, Actividad Agrícola, Suelo y Clima. En la Figura 48, se ve el cultivo junto con sus atributos. Cada criterio se presenta con el mismo formato, primero indicando los elementos creados, junto con sus atributos. Además, cada uno permite gestionar o actualizas las características y agregar nuevas instancias.

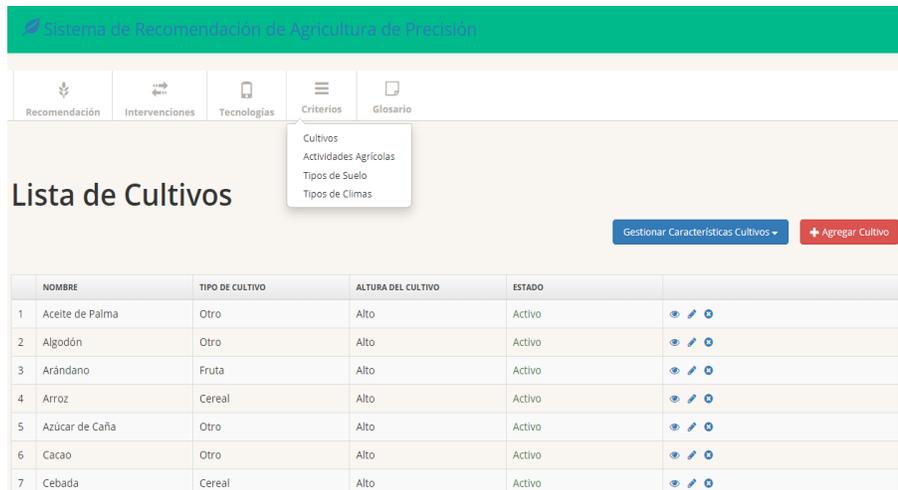


Figura 48: Pantalla Criterios - Cultivos

Finalmente, se encuentra la pantalla de glosario, como se muestra en la Figura 49. Se definen los conceptos más importantes del Framework como los criterios y tecnología para que los usuarios puedan aprender más acerca de ellos.

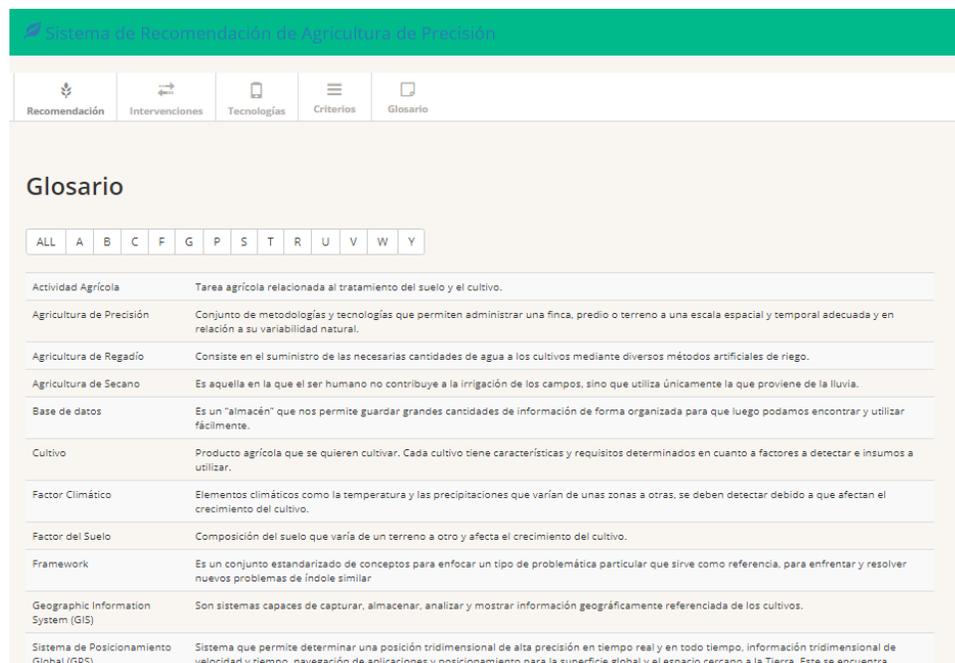


Figura 49: Pantalla Glosario

Cabe destacar que solo se presentan las pantallas más importantes, por lo que existen otras funcionalidades generales que no han sido mostradas, por ejemplo, los formularios de Agregar o Editar alguna instancia de un criterio, así como las fichas de las tecnologías.

Capítulo 6

Validación por Medio de Prueba de Concepto

Después de crear el Framework para la comparación y selección de tecnologías usadas en una implementación y construido el prototipo de la herramienta que permite mayor facilidad de utilización, se requiere validar que las recomendaciones entregadas por el Framework sean acordes a la realidad de las aplicaciones.

Este Capítulo aborda la validación de las respuestas entregadas por el Framework, versus aquellas que entregaría un experto para un conjunto de características predefinidas. Esta validación fue realizada a través de una prueba de concepto, donde se entregan características de casos de estudio hipotéticos a los expertos y, basándose en estas, se consulta cuál tecnología recomendaría. Cabe destacar que se realizó con el objetivo de verificar las tecnologías recomendadas, no implica ponerlas en funcionamiento. Además, los casos de estudio hipotéticos fueron diseñados basándose en implementaciones existentes de AP, que consideran casos a los que puede verse enfrentado el Framework.

La Sección 6.1 detalla los casos de estudios formulados. Mientras que la Sección 6.2, se entregan las conclusiones respecto de la realización de los casos de estudio.

6.1 Casos de Estudio hipotéticos

Se formularon cuatro casos de estudio hipotéticos para la prueba de concepto. La confección de estos fue asesorada por un ingeniero agrónomo, experto en el cultivo de arroz. A partir de la ayuda brindada en el caso de estudio 1 aplicado en el arroz, se construyeron los siguientes. Posteriormente, los directores de tesis revisaron y validaron los casos antes de su envío. Después de la validación se hicieron los cambios necesarios y resultó en un cuestionario dividido en dos secciones. En la primera sección se preguntaba por los datos demográficos de los encuestados, mientras que la segunda se especificaba los 4 casos de estudio de dos preguntas cada uno. El cuestionario puede ser encontrado en el Anexo D.

Se envió la encuesta a 75 personas, específicamente quienes fueron parte del grupo de expertos a los que se les envió la primera encuesta de ratificación de criterios. Como resultado, se obtuvieron solo 5 respuestas, es decir, un 6,67%. Estimamos que la escasa participación o falta de interés por parte de los expertos se debe a la contingencia por la pandemia del COVID-19. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

En la Figura 50 se puede observar los años de experiencia indicados por los encuestados. El 60%, es decir, 3 expertos han usado 5 años o menos herramientas de la Agricultura de Precisión, mientras que otro tiene 10 años de experiencia, por último, existe un experto que ha utilizado las tecnologías por 20 años.

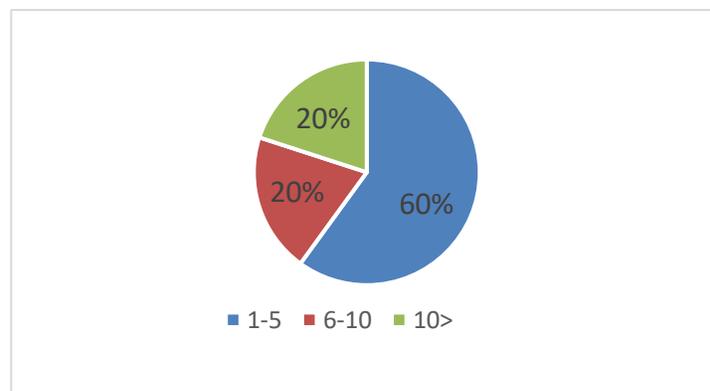


Figura 50: Años de experiencia con AP de los encuestados

6.1.1 Caso de Estudio 1

Para el primer caso de estudio, se consideró a una empresa arrocera, que desea mejorar el rendimiento de su producción, para cumplir este objetivo decidió incorporar nuevas tecnologías a sus procesos. Ellos consideran que se requiere monitorear aspectos como la humedad y la temperatura durante la etapa de crecimiento de las plantas, de esta manera se logrará una mejor cosecha. Bajo esas circunstancias, se les consultó a los encuestados sobre cuál(es) tecnología(s) recomendarían y por qué.

En la Tabla 15 se puede observar la comparación entre las respuestas de los encuestados y el Framework. El Framework recomendó 6 de las 8 opciones posibles, fueron las siguientes según el porcentaje de coincidencia: Red de Sensores Inalámbricos, SIG, Mapa de Rendimiento, Sensores Remotos, Tecnologías de Tasa Variable y Drone.

Como se puede observar cada tecnología recomendada tuvo el apoyo de mínimo un experto, sin embargo, en ningún caso fue apoyada al 100% por los expertos. Las que fueron más apoyadas fueron la Red de Sensores Inalámbricos y el Sistema de Información Geográfica. El primero permite recopilar datos del ambiente y del suelo, mientras que el segundo los almacena para realizar un seguimiento en el futuro.

Cabe destacar, que existió una discrepancia de un 20%, debido a que se agregó el Monitor de Rendimiento, posiblemente para medir y calcular el rendimiento de la cosecha específicamente.

Tecnologías	Framework	Expertos	% Coincidencia	% Discrepancia
Mapa de Rendimiento	X	3	60%	
Monitor de Rendimiento	-	1		20%
Red de Sensores Inalámbricos	X	4	80%	
Sensores Remotos	X	3	60%	
SIG	X	4	80%	
Tecnologías de Tasa Variable	X	1	20%	
Drone	X	1	20%	
Vehículo Terrestre No Tripulado	-	0	100%	-

Tabla 15: Comparación de las respuestas - Caso Estudio 1

En general, las respuestas del caso de estudio 1 por parte de los encuestados se asemejan con la recomendación que entregó el Framework, pues hay más de un 60% de coincidencia con 5 de las 8 tecnologías consideradas. Por otro lado, solo existió una discrepancia de un 20% en una de las tecnologías.

6.1.2 Caso de Estudio 2

En el segundo caso de estudio, se consideró a un agricultor que posee un terreno, donde se cultivan manzanas. Al parecer, en los últimos años se han visto afectados por muchas plagas y enfermedades provocando pérdida de la fruta. Por lo que se requiere aumentar el rendimiento y evitar pérdidas prematuras, han decidido que una opción es mediante la incorporación de tecnologías en sus procesos. Se considera necesario monitorear aspectos como los nutrientes del suelo que influyen en el estado de salud del cultivo. Bajo esas circunstancias, se les consultó a los encuestados sobre cuál(es) tecnología(s) recomendarían y por qué.

En la Tabla 16 se observa la comparación entre las respuestas de los encuestados y el Framework. El Framework recomendó 4 de las 8 opciones posibles, fueron las siguientes según el porcentaje de coincidencia: SIG, Mapa de Rendimiento, Red de Sensores Inalámbricos y Sensores Remotos.

Como se puede observar cada tecnología recomendada tuvo el apoyo de mínimo un 20% de los expertos, sin embargo, en ningún caso fue apoyada al 100% por los expertos. La más apoyada fue el Sistema de Información Geográfica con el fin de almacenar históricamente datos como los nutrientes del suelo.

Aparte, existió un porcentaje de discrepancia en tres tecnologías, son las siguientes: Tecnología de Tasa Variable, Monitor de Rendimiento y Drone. Aunque, no es un porcentaje menor, una de las razones puede ser un análisis diferente del contexto en el que fue inserto el caso de estudio.

Tecnologías	Framework	Expertos	% Coincidencia	% Discrepancia
Mapa de Rendimiento	X	3	60%	
Monitor de Rendimiento	-	2		40%
Red de Sensores Inalámbricos	X	3	60%	
Sensores Remotos	X	1	20%	
SIG	X	4	80%	
Tecnologías de Tasa Variable	-	3		60%
Drone	-	1		20%
Vehículo Terrestre No Tripulado	-	0	100%	-

Tabla 16: Comparación de las respuestas - Caso Estudio 2

En general, las respuestas de este caso de estudio por parte de los encuestados se asemejan con la recomendación que entregó el Framework. En la mayoría de las tecnologías que el Framework recomendó hubo sobre el 60% de coincidencia.

6.1.3 Caso de Estudio 3

En el tercer caso de estudio, se consideró a un cliente poseedor de un terreno de arándanos. Se considera que es necesario vigilar la velocidad del viento con el objetivo de tomar medidas para evitar pérdidas. Es importante realizar este monitoreo, especialmente durante la cosecha del cultivo. Se piensa que mediante la incorporación de tecnología se puede mejorar el rendimiento. Bajo esas circunstancias, se les consultó a los encuestados sobre cuál(es) tecnología(s) recomendarían y por qué.

En la Tabla 17 se observa la comparación entre las respuestas de los encuestados y el Framework. De las 8 tecnologías posibles el Framework recomendó 3, estas fueron: Red de Sensores Inalámbricos, Sensores Remotos y Sistema de Información Geográfica.

Como se puede observar cada tecnología recomendada tuvo el apoyo de mínimo el 60% de los expertos, sin embargo, en ningún caso fue apoyada en su totalidad. Los sensores pueden recopilar los datos necesarios del ambiente o el suelo, mientras que el SIG permite almacenarlos, con el objetivo de monitorear las variables.

De igual forma que el caso anterior, existe un porcentaje de discrepancia en tres tecnologías, son las siguientes: Mapa de Rendimiento, Monitor de Rendimiento y Drone. Según los comentarios de los expertos, ellos agregaron el mapa y monitor para obtener la pérdida de rendimiento por el viento. Mientras, que en la consulta del Framework solo se consideró captar la velocidad del viento.

Tecnologías	Framework	Expertos	% Coincidencia	% Discrepancia
Mapa de Rendimiento	-	2		40%
Monitor de Rendimiento	-	1		20%
Red de Sensores Inalámbricos	X	3	60%	
Sensores Remotos	X	3	60%	
SIG	X	3	60%	
Tecnologías de Tasa Variable	-	1		20%
Drone	-	0	-	-
Vehículo Terrestre No Tripulado	-	0	100%	-

Tabla 17: Comparación de las respuestas - Caso Estudio 3

En general, las respuestas de este caso de estudio por parte de los encuestados se asemejan con la recomendación que entregó el Framework, debido a que en todas las tecnologías que el Framework recomendó hubo un 60% de coincidencia.

6.1.4 Caso de Estudio 4

Por último, en el cuarto caso de estudio, se consideró a una empresa productora de maíz, que desea implementar tecnologías en sus procesos. Han realizado análisis dando como resultado una deficiencia en cuanto a nutrientes. Por esta razón, se considera necesario monitorear el contenido de nutrientes en todas las actividades agrícolas, desde la siembra hasta la cosecha. Bajo esas circunstancias, se les consultó a los encuestados sobre cuál(es) tecnología(s) recomendarían y por qué.

En la Tabla 18 se observa la comparación entre las respuestas de los encuestados y el Framework. De las 8 tecnologías posibles el Framework recomendó 4, estas fueron: Tecnologías de Tasa Variable, Mapa de Rendimiento, SIG y Red de Sensores Inalámbricos.

Cada tecnología recomendada tuvo el apoyo de mínimo 2 expertos, además, una fue apoyada en su totalidad, esta fue la Tecnología de Tasa Variable. Debido a que el caso se enfoca en la necesidad de aumentar los nutrientes, se puede utilizar la Fertilización de Tasa Variable para aumentar la dosis en las zonas necesarias.

Por otro lado, hubo discrepancia en dos tecnologías, estas fueron: Drone y Monitor de Rendimiento. Más de la mitad de los encuestados agregó el Drone, mientras que el Framework no lo recomendó. Esto se debe a que la pregunta de este caso era la siguiente: “¿Cuál tecnología recomendaría para complementar el Drone?”, de modo que ya se encontraba incluida esta tecnología, no era necesario recomendarla de nuevo.

Tecnologías	Framework	Expertos	% Coincidencia	% Discrepancia
Mapa de Rendimiento	X	4	80%	
Monitor de Rendimiento	-	2		40%
Red de Sensores Inalámbricos	X	2	40%	
Sensores Remotos	-	0	100%	-
SIG	X	4	80%	
Tecnologías de Tasa Variable	X	5	100%	
Drone	-	3		60%
Vehículo Terrestre No Tripulado	-	0	100%	-

Tabla 18: Comparación de las respuestas - Caso Estudio 4

En general, las respuestas de este último caso de estudio por parte de los encuestados se asemejan con la recomendación que entregó el Framework, cada tecnología es respaldada por 40% de los expertos o más.

6.2 Conclusiones

Se realizó una prueba de concepto, mediante el desarrollo de 4 casos de estudio hipotéticos con el fin de validar el Framework. Estos se enviaron mediante una encuesta, como resultado se logró obtener un total de 5 respuestas. Como se mencionó, el pequeño grupo de participante puede ser resultado de la contingencia por la pandemia del COVID-19. La encuesta se envió aproximadamente una semana después de haber sido detectado el primer caso de coronavirus en Chile y los casos fueron aumentando rápidamente. Debido a esto, se entiende que no era una prioridad para los expertos responderla.

En general, las recomendaciones que entrega el Framework son similares a las que respondieron los expertos, pues todas las tecnologías recomendadas por el Framework fueron apoyadas por algún porcentaje de los encuestados. Aunque, otras tecnologías fueron añadidas por los encuestados, esto se puede deber a que se abordó de forma diferente el problema, o a que un experto normalmente opta por utilizar las tecnologías que mejor conoce, sin realizar un proceso de comparación y selección para elegir la que realmente sería la más adecuada.

Como se pudo observar, el Vehículo Terrestre no tripulado no fue seleccionado por el Framework ni por los expertos en ninguno de los casos de estudio. Esto se debe a que no es una tecnología muy investigada, por ejemplo, en la RSL solo 2 publicaciones la abordaron. Además, el precio para adquirirla es muy alto.

Cabe destacar, que las respuestas entregadas por el Framework se hicieron con la base de datos inicial, y puede que existan más asociaciones entre tecnologías, factores, cultivos y actividades que se puedan insertar en el futuro. Se espera que cuando el prototipo esté disponible en la plataforma, los interesados puedan colaborar agregando las relaciones existentes, de esa forma el Framework recomendará soluciones más actualizadas y precisas.

Los resultados de la prueba de concepto no implicaron cambios en el Framework, aunque se aplicó a una pequeña muestra de expertos por la baja participación, las tecnologías recomendadas fueron apoyadas y solucionan las problemáticas descritas. Además, las tecnologías a recomendar dependen de la región en se implemente la Agricultura de Precisión u otros factores como preferencia de los expertos.

Se validó que el Framework busca apoyar y facilitar la toma de decisiones de las empresas agrícolas que se vean enfrentadas a la necesidad de escoger que tecnología implementar.

Capítulo 7

Conclusiones

7.1 Análisis de los Objetivos Propuestos/Cumplidos

Esta investigación buscó cubrir una brecha existente en la literatura, la cual es la falta de un método adecuado para la comparación y selección de tecnologías en una implementación de Agricultura de Precisión. Como resultado, en esta tesis se presenta un Framework para la comparación de tecnologías en una implementación de Agricultura de Precisión, dadas circunstancias y restricciones específicas, que cubre la brecha anterior.

En el primer capítulo, se expuso el siguiente objetivo general: “Construir un Framework que funcione como referencia respecto de las Tecnologías de Información que pueden usarse en una implementación de AP, dadas ciertas condiciones y restricciones específicas”. Para su cumplimiento, se buscó cumplir con un conjunto de objetivos específicos. A continuación, se presenta un análisis del cumplimiento de cada uno de ellos.

Objetivo 1, 2. *“Realizar una Revisión Sistemática de la Literatura y búsqueda de sitios Web dedicados sobre implementaciones de Agricultura de Precisión que permitan identificar variables de implementación como: TI usada, datos capturados, información generada, beneficios, decisiones apoyadas, entre otros”. “Identificar y definir reglas de generalización respecto de las relaciones existentes entre las variables de implementación encontradas en el objetivo anterior”.*

Se realizó una Revisión Sistemática de la Literatura para obtener el conocimiento existente sobre implementaciones de Agricultura de Precisión, detallada en el Capítulo 3. Esta RSL permitió encontrar 259 publicaciones útiles, de las cuales 257 entregan tecnologías usadas en la Agricultura de Precisión. Además, 122 describen implementaciones de AP y 19 presentan criterios para la comparación y selección de tecnologías. Finalmente, no se encontró ninguna publicación que ofreciera un Framework de decisión de tecnologías. Lo que demostró la falta de un Framework que funcione como guía al momento de escoger que tecnología implementar según circunstancias y restricciones específicas.

En cuanto a la búsqueda de sitios Web, se realizó una Revisión de la Industria, especificada en la Sección 3.7. Se caracterizó por investigar en profundidad los criterios ya identificados, junto con definir sus relaciones.

De esta forma, se logró identificar Tecnologías de Información actualmente usadas en una implementación de Agricultura de Precisión. Además de criterios de generalización, especificados en la Sección 4.1. Estos criterios fueron identificados por medio del conocimiento de la academia como de la experiencia en la industria.

Objetivo 3. *“Construir un Framework que permita comparar las Tecnologías de Información y que refleje las relaciones entre variables de implementación identificadas anteriormente.”*

Basándose en el conocimiento adquirido por medio de la Revisión Sistemática de la Literatura, junto con la experiencia obtenida en la industria, se formuló una propuesta inicial de un Framework para escoger la Tecnología de Información más adecuada a implementar, dadas ciertas condiciones y restricciones específicas. Consecutivamente, se ratificaron los criterios y relaciones a través de una encuesta a expertos en el área. Finalmente, se realizaron ajustes a la propuesta del Framework según la retroalimentación obtenida de los expertos. El proceso de creación del Framework es detallado en el Capítulo 4.

Objetivo 4. *Crear un prototipo que permita usar el Framework interactivamente, como guía de implementación de un proyecto de Agricultura de Precisión.*

Para usar el Framework más interactivamente, se construyó un prototipo como un Sistema de Recomendación basado en Conocimiento que facilite su utilización. Esta herramienta permite obtener los criterios de forma más sencilla para el usuario, luego entrega como resultado las tecnologías más adecuadas y sus características. Cabe destacar, este prototipo fue desarrollado para mantenerse actualizado a través del tiempo, por lo que permite ingresar nuevas combinaciones y modificarlas. El diseño y construcción del prototipo se especifican en el Capítulo 5.

Objetivo 5. *Validar el Framework a través de una prueba de concepto que compruebe su correcto uso.*

Solo se logró parcialmente este objetivo. De acuerdo con los casos estudiados y las respuestas de los expertos, el Framework presentó un alto nivel de coincidencia durante la realización de una prueba de concepto. Se generaron casos donde se les consultó a los expertos sobre que tecnología implementarían y se compararon sus respuestas con aquellas que entrega el Framework, pero existió una baja tasa de respuestas. Los detalles se muestran en el Capítulo 6.

7.2 Principal Aporte

Como principal aporte de esta tesis podemos mencionar la investigación de criterios que influyen en una implementación de Agricultura de Precisión, basándose en el conocimiento existente tanto en la literatura como en la industria. Además, de la creación de un Framework de recomendación que permita a los interesados implementar una tecnología de Agricultura de Precisión, proveedores de tecnologías y estudiantes obtener la tecnología adecuada según las circunstancias específicas en una implementación de Agricultura de Precisión.

7.3 Limitaciones del estudio

En cuanto a las limitaciones del presente estudio se encuentra, la validación del prototipo desarrollado. Debido a la contingencia actual, se entiende que no era prioridad para los expertos el responder la encuesta, por lo que, solo se analizaron las 5 respuestas obtenidas. Sin embargo, en el futuro se puede agregar una sección de comentarios en el prototipo para que los expertos o interesados puedan también validarlo.

Por otro lado, se encontraron algunas dificultades durante el transcurso del trabajo. Principalmente se encuentra el integrarse al mundo de la agronomía. La Agricultura de Precisión aborda las áreas de la agronomía y la informática, por lo que se debió dedicar tiempo exclusivo a entender aspectos relacionados con la agricultura.

7.4 Trabajos Futuros

A modo de trabajo futuro, se han planteado una serie de tareas con el objetivo de complementar los resultados obtenidos en esta investigación, las cuales son.

- Para ampliar el alcance del Framework, se podría seguir alimentando la base de conocimiento con nuevos cultivos, actividades, factores y tecnologías.
- Refinar el prototipo de herramienta, para obtener un producto de Software final del Framework.

- Como mejora del prototipo, se pretende agregar la recomendación personalizada, es decir, el usuario defina el orden de los criterios. Debido a que en los resultados de la encuesta no se encontró un orden que liderara sobresalientemente, sino que depende de cada experto.
- Se podrían crear cuentas de usuarios con diferentes perfiles, para que puedan modificar criterios o combinaciones.
- Se podría agregar una sección en el prototipo en la que los usuarios puedan ingresar su opinión acerca de los resultados de la recomendación. De forma, de obtener su retroalimentación y seguir mejorando la herramienta.
- Revisar en profundidad empresas que provean alternativas tecnologías de Agricultura de Precisión y vincularlas con el prototipo.

7.5 Contraste de Resultados

Se participó en la III Conferencia Internacional en Agro BigData y Sistema de Soporte de Decisiones, realizado por la Universidad Técnica Federico Santa María durante el año 2019, donde se presentaron los resultados obtenidos en la Revisión Sistemática de la Literatura. Lo anterior por medio de una exposición oral. Adicionalmente, el mismo tema se encuentra aceptado en modalidad oral en el VIII Encuentro de Investigación de Estudiantes de Postgrado.

Se participó como expositora en el VIII Encuentro de Mujeres en Computación, realizado por la Universidad de los Andes durante el año 2019. Se presentó el avance de la tesis junto con los resultados obtenidos hasta el momento.

Se redactó un artículo detallando la realización de la Revisión Sistemática de la Literatura y los hallazgos obtenidos. Dicho artículo fue enviado y se encuentra en proceso de revisión en la revista Computers and Electronics in Agriculture de Elsevier.

Referencias

La lista con las referencias de los 259 artículos aceptados durante la revisión sistemática de la literatura puede ser encontrada en <http://colvin.chillan.ubiobio.cl/mcaro/cisternas/>. A continuación, se presenta la bibliografía referenciada directamente en este informe, la cual puede o no estar también presente en el enlace anterior.

- Alves, Gabriel M., and Paulo E. Cruvinel. 2016. "Big Data Environment for Agricultural Soil Analysis from CT Digital Images." In *Proceedings - 2016 IEEE 10th International Conference on Semantic Computing, ICSC 2016*, 429–31. IEEE.
- Antonacci, Amina, Fabiana Arduini, Danila Moscone, Giuseppe Palleschi, and Viviana Scognamiglio. 2018. "Nanostructured (Bio)Sensors for Smart Agriculture." *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. Elsevier.
- Ashwini, R. 2017. "A Study on Precision Agriculture and Its Technologies."
- Babu, Satish. 2013. "A Software Model for Precision Agriculture for Small and Marginal Farmers." In *Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS), 2013 IEEE*, 352–55. IEEE.
- Bacco, Manlio, Andrea Berton, Erina Ferro, Claudio Gennaro, Alberto Gotta, Stefania Matteoli, Fabio Paonessa, Massimiliano Ruggeri, Giuseppe Virone, and Alberto Zanella. 2018. "Smart Farming : Opportunities , Challenges and Technology Enablers." In *2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany)*, 1–6. IEEE.
- Bendre, M. R., R. C. Thool, and V. R. Thool. 2015. "Big Data in Precision Agriculture: Weather Forecasting for Future Farming." In *2015 1st International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT)*, 744–50. IEEE.
- Best, Stanley, and Inés Zamora. 2008. *Tecnologías Aplicable En Agricultura de Precisión. Uso de Tecnología de Precisión En Evaluación, Diagnóstico y Solución de Problemas Productivos*. Vol. 1.
- Biqing, Li, Ling Yongfa, Tian Miao, and Zheng Shiyong. 2018. "Design and Implementation of Sugarcane Growth Monitoring System Based on RFID and ZigBee." *Design and Implementation of Sugarcane Growth Monitoring System Based on RFID and ZigBee* 14.
- Burlacu, George, Ruben Costa, Joao Sarraipa, Ricardo Jardim-Golcalves, and Dan Popescu. 2014. "A Conceptual Model of Farm Management Information System for Decision Support." In *Technological Innovation for Collective Awareness Systems*, edited by Luis M Camarinha-Matos, Nuno S Barrento, and Ricardo Mendonça, 47–54. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Demattê, José Alexandre Melo, José Luiz Ioratte Demattê, Evandro Roberto Alves, Roberto Negrão, and Jorge Luis Morelli. 2014. "Precision Agriculture for Sugarcane Management: A Strategy Applied for Brazilian Conditions." *Acta Scientiarum. Agronomy* 36: 111–17.
- Echeverría Llumipanta, Neptalí. 2015. "Desarrollo de Un Sistema de Información Geográfica Que Permita

- La Gestión Integral de Los Cultivos de Palma Aceitera a Través de La Aplicación de Sistemas de Agricultura de Precisión.” Quito: USFQ, 2015.
- Fan, Chun-Chieh, Rong-Hou Wu, Liang-Lin Jau, and Yu-Ming Li. 2014. “Wireless Sensor and Mobile Application of an Agriculture Security System” 2: 77–85.
- Far, Somayeh Tohidyan, and Kurosh Rezaei-Moghaddam. 2018. “Impacts of the Precision Agricultural Technologies in Iran: An Analysis Experts’ Perception & Their Determinants.” *Information Processing in Agriculture* 5 (1): 173–84.
- Felfernig, A, and R Burke. 2008. “Constraint-Based Recommender Systems- Technologies.” *Constraint-Based Recommender Systems- Technologies*, 3.
- Felfernig, Alexander. 2005. “Koba4MS: Selling Complex Products and Services Using Knowledge-Based Recommender Technologies.” *Proceedings - Seventh IEEE International Conference on E-Commerce Technology, CEC 2005* 2005: 92–100.
- Felfernig, Alexander. 2007a. “Knowledge-Based Recommender Technologies Supporting the Interactive Selling of Financial Services.” *Mass Customization Information Systems in Business*, 122–34.
- Felfernig, Alexander. 2007b. “Reducing Development and Maintenance Efforts for Web-Based Recommender Applications.” *International Journal of Web Engineering and Technology* 3 (3): 329–51.
- Felipe, Julio A Berdegué, and Rojas Pizarro. 2014. “La Agricultura Familiar En Chile.” *Rimisp*. www.rimisp.org.
- Fisch, Christian, and Joern Block. 2018. “Six Tips for Your (Systematic) Literature Review in Business and Management Research.” *Management Review Quarterly* 68 (2): 103–6.
- Gago, J., C. Douthe, R. E. Coopman, P. P. Gallego, M. Ribas-Carbo, J. Flexas, J. Escalona, and H. Medrano. 2015. “UAVs Challenge to Assess Water Stress for Sustainable Agriculture.” *Agricultural Water Management*. Elsevier.
- Gemtos, Theofanis, S. Fountas, A. Tagarakis, and V. Liakos. 2013. “Precision Agriculture Application in Fruit Crops: Experience in Handpicked Fruits.” *Procedia Technology* 8 (January): 324–32.
- Genero Bocco, Marcela, José Antonio Cruz-Lemus, and Mario Plattini Velthuls. 2014. *Métodos de Investigación En Ingeniería de Software*.
- Griffin, Terry W., Noah J. Miller, Jason Bergtold, Aleksan Shanoyan, Ajay Sharda, and Ignacio A. Ciampitti. 2017. “Farm’s Sequence of Adoption of Information-Intensive Precision Agricultural Technology.” *Applied Engineering in Agriculture* 33 (4): 521–27.
- Griffin, Terry Wayne, Noah J Miller, Christian Torrez, I Ciampitti, and A Sharda. 2016. “Precision Agriculture Technology Adoption and Obsolescence.” *Kansas State University Department of Agricultural Economics Extension Publication*.
- Hedley, Carolyn. 2015. “The Role of Precision Agriculture for Improved Nutrient Management on Farms.” *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95.
- Hernandez, Andres, Harold Murcia, Cosmin Copot, and Robin De Keyser. 2015. “Towards the Development of a Smart Flying Sensor: Illustration in the Field of Precision Agriculture.” *Sensors*

15: 16688–709.

- Higgins, Vaughan, Melanie Bryant, Andrea Howell, and Jane Battersby. 2017. "Ordering Adoption: Materiality, Knowledge and Farmer Engagement with Precision Agriculture Technologies." *Journal of Rural Studies* 55 (October): 193–202.
- Hunt, E. Raymond, and Craig S. T. Daughtry. 2018. "What Good Are Unmanned Aircraft Systems for Agricultural Remote Sensing and Precision Agriculture?" *International Journal of Remote Sensing* 39.
- Jafari, Mohammad, Ali Tavili, Fatemeh Panahi, Ehsan Zandi Esfahan, and Majid Ghorbani. 2018. *Reclamation of Arid Lands*. Springer International Publishing.
- Jones, T. L., Maj Baxter, and V. Khanduja. 2013. "A Quick Guide to Survey Research." *Annals of the Royal College of Surgeons of England* 95 (1): 5–7.
- Kamilaris, Andreas, Andreas Kartakoullis, and Francesc X. Prenafeta-Boldú. 2017. "A Review on the Practice of Big Data Analysis in Agriculture." *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier.
- Kendall, H, P Naughton, B Clark, James Taylor, Zhenhong Li, C Zhao, G Yang, J Chen, and L J Frewer. 2017. "Precision Agriculture in China: Exploring Awareness, Understanding, Attitudes and Perceptions of Agricultural Experts and End-Users in China." *Advances in Animal Biosciences* 8.
- Kendig, Catherine Elizabeth. 2016. "What Is Proof of Concept Research and How Does It Generate Epistemic and Ethical Categories for Future Scientific Practice?" *Science and Engineering Ethics* 22: 735–53.
- Kitchenham, Barbara, and Stuart Charters. 2007. "Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering Version 2.3." *Engineering* 45 (4ve): 1051.
- Kitchenham, Barbara, and Shari Pfleeger. 2008. "Personal Opinion Surveys." *Guide to Advanced Empirical Software Engineering*, 63–92.
- Kofod-petersen, Anders. 2014. "How to Do a Structured Literature Review in Computer Science." *Researchgate*, no. May 2015: 1–7.
- Koutsos, Thomas, and Georgios Menexes. 2017. "Benefits from the Adoption of Precision Agriculture Technologies. A Systematic Review."
- Kumar, Subramania Ananda, and Paramasivam Ilango. 2018. "The Impact of Wireless Sensor Network in the Field of Precision Agriculture: A Review." *Wireless Personal Communications*. Springer US.
- Li, D., and Z. Chunjiang. 2010. *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Preface*. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Vol. 317.
- Mahmood, Hafiz Sultan, Munir Ahmad, Tanveer Ahmad, Muhammad Azhar Saeed, and Muhammad Iqbal. 2013. "Potentials and Prospects of Precision Agriculture in Pakistan-a Review." *Pakistan Journal of Agricultural Research* 26 (2).
- Markley, J, and J Hughes. 2014. "Understanding the Barriers to the Implementation of Precision Agriculture in the Central Region." *International Sugar Journal* 116 (1384): 278–85.
- Markoski, M, S Arsov, T Mitkova, and S Janeska. 2015. "The Benefit GIS Technologies and Precision Agriculture Principles in Soil Nutrient Management for Agricultural Crop Production." *Bulgarian*

- Journal of Agricultural Science* 21 (3): 554–59.
- Marote, Matías L. 2010. “Agricultura de Precisión,” 143–66.
- Martín, Francisco. 2011. *La Encuesta: Una Perspectiva General Metodológica*. Centro de Investigaciones Sociológicas.
- Mcconnell, Mark D. 2019. “Bridging the Gap between Conservation Delivery and Economics with Precision Agriculture.” *Wildlife Society Bulletin* 43 (3): 391–97.
- Melchiori, Ricardo José M, Susana M Albarenque, and Alejandra Cecilia Kemerer. 2013. “Uso, Adopción y Limitaciones de La Agricultura de Precisión En Argentina.” *Curso Int. Agric. Precisión* 12 (2013): 7.
- Min, Zhang, Wang Bei, Gao Chunyuan, and Shuai Zhao Qian. 2011. “Application Study of Precision Agriculture Based on Ontology in the Internet of Things Environment.” *Communications in Computer and Information Science* 227 CCIS (PART 4): 374–80.
- Mintert, James, David Widmar, Michael Langemeier, Michael Boehlje, Bruce Erickson, and others. 2016. “The Challenges of Precision Agriculture: Is Big Data the Answer.” In *Southern Agricultural Economics Association Annual Meeting, San Antonio, Texas*.
- Morales, Cuichán, and Carlos Augusto. 2013. “Propuesta de Un Modelo de Gestión de Las Tecnologías de Información y Comunicación En Procesos Productivos de Granjas Agrícolas Integrales.” Quito, 2013.
- Mushtaq, S., T. N. Maraseni, and K. Reardon-Smith. 2013. “Climate Change and Water Security: Estimating the Greenhouse Gas Costs of Achieving Water Security through Investments in Modern Irrigation Technology.” *Agricultural Systems* 117 (May): 78–89.
- Nair, Shyam. 2011. “Three Essays on the Economics of Precision Agriculture in Cotton Production.”
- Nugroho, Andri Prima, Takashi Okayasu, Eiji Inoue, Yasumaru Hirai, and Muneshi Mitsuoka. 2013. “Development of Actuation Framework for Agricultural Informatization Supporting System.” *IFAC Proceedings Volumes* 46 (4): 181–86.
- Ogedebe, Peter M, and Babatunde Peter Jacob. 2012. “Software Prototyping: A Strategy to Use When User Lacks Data Processing Experience.” *ARPN Journal of Systems and Software*.
- Oliver, Margaret A. 2013. “Precision Agriculture and Geostatistics: How to Manage Agriculture More Exactly.” *Significance* 10 (2): 17–22.
- Omran, El-Sayed Ewis. 2017. “Will the Traditional Agriculture Pass into Oblivion? Adaptive Remote Sensing Approach in Support of Precision Agriculture.” In *Adaptive Soil Management : From Theory to Practices*, 39–67. Singapore: Springer Singapore.
- Pathak, Hari Sharan, Philip Brown, and Talitha Best. 2019. “A Systematic Literature Review of the Factors Affecting the Precision Agriculture Adoption Process.” *Precision Agriculture* 20 (6): 1292–1316.
- Perea, R González, A Daccache, J A Rodríguez Díaz, E Camacho Poyato, and Jerry W Knox. 2017. “Modelling Impacts of Precision Irrigation on Crop Yield and In-Field Water Management.” *Precision Agriculture*, 1–16.
- Pierpaoli, Emanuele, Giacomo Carli, Erika Pignatti, and Maurizio Canavari. 2013. “Drivers of Precision

- Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review.” *Procedia Technology* 8: 61–69.
- Pignatti, Erika, Giacomo Carli, and Maurizio Canavari. 2015. “What Really Matters? A Qualitative Analysis on the Adoption of Innovations in Agriculture.” *Agrárinformatika/Journal of Agricultural Informatics* 6 (4): 73–84.
- Quebrajo, L., M. Perez-Ruiz, L. Pérez-Urrestarazu, G. Martínez, and G. Egea. 2018. “Linking Thermal Imaging and Soil Remote Sensing to Enhance Irrigation Management of Sugar Beet.” *Biosystems Engineering* 165 (January): 77–87.
- Raghunandan, G H, S Y Namratha, S Y Nanditha, and G Swathi. 2017. “Comparative Analysis of Different Precision Agriculture Techniques Using Wireless Sensor Networks.” In *2017 4th International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*, 129–33. IEEE.
- Ricci, Francesco, Bracha Shapira, and Lior Rokach. 2015. “Recommender Systems: Introduction and Challenges.” *Recommender Systems Handbook, Second Edition*, 1–34.
- Rivera, Andrés Felipe Gómez, and Fabián Velásquez Clavijo. 2016. “Agricultura De Precisión Y Sensores Multiespectrales Aerotransportados.” In .
- Rokhmana, Catur Aries. 2015. “The Potential of UAV-Based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia.” *Procedia Environmental Sciences* 24 (January): 245–53.
- Sabzi, Sajad, Yousef Abbaspour-Gilandeh, and Ginés García-Mateos. 2018. “A Fast and Accurate Expert System for Weed Identification in Potato Crops Using Metaheuristic Algorithms.” *Computers in Industry* 98 (June): 80–89.
- Schieffer, J, and C Dillon. 2015. “The Economic and Environmental Impacts of Precision Agriculture and Interactions with Agro-Environmental Policy.” *Precision Agriculture* 16 (1): 46–61.
- Schimmelpennig, David, and Robert Ebel. 2011. “On the Doorstep of the Information Age: Recent Adoption of Precision Agriculture.”
- Schimmelpennig, David, and Robert Ebel. 2016. “Sequential Adoption and Cost Savings from Precision Agriculture.” *Journal of Agricultural and Resource Economics* 41.
- Schwabe, Kurt, José Albiac-Murillo, Jeffery D. Connor, Rashid Hassan, and Liliana Meza González, eds. 2013. *Drought in Arid and Semi-Arid Regions*. Springer Netherlands.
- Smiljkovikj, Katerina, and Liljana Gavrilovska. 2014. “SmartWine: Intelligent End-to-End Cloud-Based Monitoring System.” *Wireless Personal Communications* 78 (3): 1777–88.
- Sommerville, Ian. 2011. *Software Engineering*.
- Stoorvogel, Jetse J, Lammert Kooistra, and Johan Bouma. 2015. “Managing Soil Variability at Different Spatial Scales as a Basis for Precision Agriculture.” *Soil-Specific Farming: Precision Agriculture; Lal, R., Stewart, BA, Eds*, 37–72.
- Tey, Yeong Sheng, and Mark Brindal. 2012. “Factors Influencing the Adoption of Precision Agricultural Technologies: A Review for Policy Implications.” *Precision Agriculture*. Springer US.
- Tripathi, Rahul, Mohammad Shahid, A K Nayak, R Raja, B B Panda, Sangita Mohanty, K Thilgham, and Anjani Kumar. 2018. “Precision Agriculture in India: Opportunities and Challenges.”
- Wal, T van der, B. Abma, A. Viguria, E Previnaire, P. J. Zarco-Tejada, P. Serruys, E van Valkengoed, and

- P van der Voet. 2013. "Fieldcopter: Unmanned Aerial Systems for Crop Monitoring Services." In *PRECISION AGRICULTURE '13*, 169–75. Wageningen Academic Publishers, Wageningen.
- Wang, Ning, and Zhen Li. 2012. "Wireless Sensor Networks (WSNs) in the Agricultural and Food Industries." In *Robotics and Automation in the Food Industry: Current and Future Technologies*, 171–99. Woodhead Publishing.
- Watcharaanantapong, Pattarawan, Roland K Roberts, Dayton M Lambert, James A Larson, Margarita Velandia, Burton C English, Roderick M Rejesus, and Chenggang Wang. 2014. "Timing of Precision Agriculture Technology Adoption in US Cotton Production." *Precision Agriculture* 15 (4): 427–46.
- Winstead, Amy T, Shannon H Norwood, Terry W Griffin, Max Runge, Anne Mims Adrian, John Fulton, and Jessica Kelton. 2010. "Adoption and Use of Precision Agriculture Technologies by Practitioners." In *Proc. the 10th International Conference on Precision Agriculture*, 18–21.
- Wolfert, Sjaak, Lan Ge, Cor Verdouw, and Marc Jeroen Bogaardt. 2017. "Big Data in Smart Farming – A Review." *Agricultural Systems*. Elsevier.
- Yang, I -Chang, and Suming Chen. 2015. "Precision Cultivation System for Greenhouse Production." In *Intelligent Environmental Sensing*, edited by Henry Leung and Subhas Chandra Mukhopadhyay, 191–211. Cham: Springer International Publishing.
- Yanna, Ren. 2012. "GPS System Application in Farmland Information Management." In , 303–9. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Yost, M. A., N. R. Kitchen, K. A. Sudduth, E. J. Sadler, S. T. Drummond, and M. R. Volkmann. 2017. "Long-Term Impact of a Precision Agriculture System on Grain Crop Production." *Precision Agriculture* 18 (5): 823–42.
- Yousefi, Mohammad Reza, and Ayat Mohammad Razdari. 2015. "Application of GIS and GPS in Precision Agriculture (a Review)." *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 3 (1): 7–9.
- Zhou, Xia, Burton C English, James A Larson, Dayton M Lambert, Roland K Roberts, Christopher N Boyer, Margarita Velandia, Lawrence L Falconer, and Steve W Martin. 2017. "Precision Farming Adoption Trends in the Southern U.S." *Journal of Cotton Science* 21 (2): 143–55.

Anexos

Anexo A. Planificación de la Revisión Sistemática de la Literatura

Se presenta la planificación previa a la realización de la Revisión Sistemática de la Literatura. El proceso puede ser observado en la Figura 51.

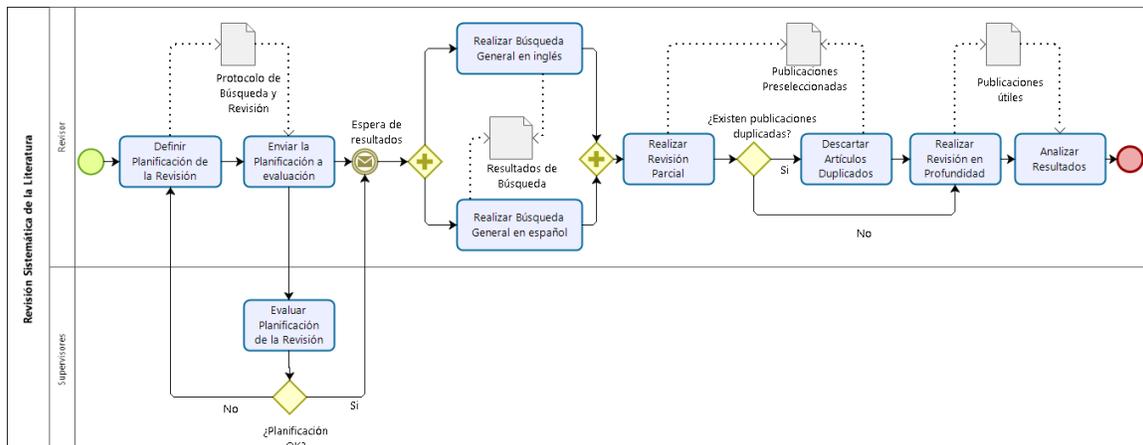


Figura 51: Proceso de Revisión Sistemática de la Literatura aplicada la investigación

Primero, se realizó la planificación de la revisión, la cual consideró el establecer la necesidad de investigación, así como la definición de los protocolos de búsqueda y revisión. Dos supervisores analizaron esta planificación y evaluaron su pertinencia. Posteriormente, se realizó una búsqueda general en las diferentes fuentes especificadas durante la planificación. Se resalta que esta búsqueda fue realizada tanto en inglés como en español, con el objetivo de conseguir un mayor alcance. Tomando los resultados generales, se llevó a cabo una revisión parcial de éstos, obteniendo una lista de publicaciones potencialmente útiles. Aquellas publicaciones que se encontraran duplicadas fueron posteriormente removidas. Finalmente, las publicaciones restantes fueron analizadas en profundidad, obteniendo así la lista de publicaciones útiles para esta investigación.

Los detalles de la planificación de la revisión se especifican a continuación, mientras que los resultados de la realización del proceso de búsqueda y revisión se encuentran documentados en el capítulo 3.

A.1 Identificación de la Necesidad de Revisión

El objetivo de la revisión fue el de identificar las propuestas de uso de TI en el contexto de la Agricultura de Precisión propuestas en la literatura, junto con detectar criterios para la comparación y selección de estas. Además, la existencia de Framework que utilicen dichos criterios. Basándose en este objetivo, las siguientes Preguntas (P) fueron formuladas para definir más detalladamente la necesidad de investigación:

- P1: ¿Qué tecnologías de información se utilizan en la agricultura?
- P2: ¿Qué implementaciones de la Agricultura de Precisión registra la literatura?
- P3: ¿Qué criterios existen para compararlas y seleccionarlas las tecnologías usadas?
- P4: ¿Existe algún Framework que guíe la implementación de la Agricultura de Precisión?

A.2 Recursos para la Realización de la Revisión Sistemática de la Literatura

Para poder realizar la RSL, se utilizaron fuentes que se relacionan al tema a tratar, específicamente. Scopus (<https://www.scopus.com/>), Springer (<http://link.springer.com/>), Science Direct (<http://www.sciencedirect.com/>) y National Agricultural Library (<https://www.nal.usda.gov/>).

Adicionalmente, se utilizó Google Scholar (<https://scholar.google.com/>) para extender la búsqueda a aquellas publicaciones potencialmente útiles que no estuvieran indexadas en alguna de las fuentes mencionadas anteriormente.

A.3 Protocolo de Búsqueda

Se define el protocolo que fue utilizado para realizar la búsqueda en las fuentes definidas anteriormente. Se definen los Términos (T) usados para la revisión, junto con sus Combinaciones (C) en la Tabla 19.

Términos	T1: Intelligent Agriculture	T4: Implementation	T7: Analysis
	T2: Precision Agriculture	T5: Comparison	T8: Decision
	T3: Technologies	T6: Selection	T9: Framework
Combinaciones	C1: "T1" OR "T2"		
	C2: ("T1" OR "T2") AND (T3 OR T4)		
	C3: ("T1" OR "T2") AND (T3 OR T4) AND (T5 OR T6 OR T7 OR T8)		
	C4: ("T1" OR "T2") AND (T3 OR T4) AND (T5 OR T6 OR T7 OR T8) AND T9		

Tabla 19: Términos y combinaciones usados en la RSL.

Se definieron algunas guías generales para la realización de la búsqueda en concordancia con cada una de las fuentes. En algunos casos, los términos de búsqueda pueden ser ingresados de forma escalada, restringiendo los resultados de una búsqueda anterior.

- Por cada búsqueda realizada, los primeros 200 resultados deben ser revisados.
- Si los resultados de búsqueda tienen acceso restringido, el documento debe ser buscado por medios alternativos (por ejemplo, en los sitios personales de los autores).

- Solo se deben considerar publicaciones del año 2010 en adelante.

El gestor de referencias Mendeley fue utilizado para facilitar el registro de los resultados de búsqueda y sus fuentes. Adicionalmente, los resultados de cada búsqueda fueron registrados en una tabla conteniendo, por cada búsqueda, la fuente, la combinación de términos, la cantidad de publicaciones encontradas y la fecha de búsqueda. Además, por cada entrada en la tabla anterior, se utilizó otra tabla para registrar la referencia de cada publicación revisada, su aceptación o rechazo y, en el caso de las publicaciones aceptadas, una breve descripción y las preguntas de investigación que aborda.

A.4 Protocolo de Revisión

A continuación, se describe el protocolo utilizado para la revisión de las publicaciones. Primero, se realizó una revisión parcial para identificar publicaciones que fueran potencialmente útiles para esta investigación. Esto se llevó a cabo leyendo el resumen de cada publicación. Solo si era necesario, también se leyó la introducción y conclusiones, así como parte del cuerpo de la publicación, para casos específicos. Una vez realizada la revisión de cada publicación se tomó la decisión de incluirla o no como una potencialmente útil, considerando los criterios de este protocolo. Se mantuvo un control de las publicaciones aceptadas y rechazadas por medio del registro de su información en tablas.

Se definió que cualquier publicación que estuviera relacionada a alguna de las preguntas de investigación sería incluida. En caso contrario, se excluyó cualquier publicación que contuviera los términos o combinaciones de ellos, pero que no poseyera información relevante para esta investigación. Posteriormente se realizó un análisis en profundidad de estas publicaciones potencialmente útiles, leyendo la totalidad de la publicación y, así, definiendo si respondía a alguna de las preguntas de investigación o no. Cuando era aplicable, se extrajo la información relevante de la publicación, como la TI discutida, el cultivo y los datos capturados por la TI, entre otros. Cabe destacar que la revisión parcial y en profundidad de las publicaciones solo fue realizada por la estudiante.

Anexo B. Relaciones entre los criterios identificados

A partir de los criterios identificados se procedió a establecer las relaciones entre sus instancias. Estas relaciones se establecieron utilizando el conocimiento existente en la literatura, en la industria y de entrevistas con expertos en el área. En la Tabla 20 se establecen las relaciones entre las tecnologías identificadas en la RSL con las actividades encontradas en la RSL y en la industria. Si la tecnología se puede utilizar en la actividad se encontrará marcada con una X.

	Tecnología\ Actividad Agrícola	Adecuación de Suelos	Siembra	Fertilización	Control de Crecimiento	Control de Malezas	Control de Plagas	Control de Enfermedades	Riego	Cosecha
TI	GPS	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Multimedia				x					x
	Nanosensor	x	x	x	x	x	x	x	x	
	UAS	x	x	x	x	x	x	x	x	
	UAV	x	x	x	x	x	x	x	x	
	UGV									x
	Remote Sensing	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Sensor	x	x	x	x	x	x	x	x	
	WSN	x	x	x	x	x	x	x	x	
Software	GIS	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Yield Map									x
	Yield Monitor									x
	VR Application				x	x	x	x	x	
	VR Fertilizer			x						
	VR Irrigation								x	

Tabla 20: Relaciones entre Tecnología y Actividad Agrícola

En la Tabla 21 y Tabla 22 se encuentra las relaciones entre las actividades agrícolas y los factores de clima y suelo identificados en la literatura. Las relaciones se establecieron a partir de la industria y entrevistas con un ingeniero agrónomo especializado.

Actividad Agrícola / Clima	Humedad	Precipitación	Radiación Solar	Temperatura	Viento
Adecuación de Suelos		x			x
Siembra	x	x		x	x
Fertilización	x	x		x	x
Control de crecimiento	x	x	x	x	x
Control de Malezas	x	x	x	x	x
Control de Plagas	x	x	x	x	x
Control de Enfermedades	x	x	x	x	x
Riego	x	x	x	x	x
Cosecha	x	x	x	x	x

Tabla 21: Relaciones entre Actividad Agrícola y Clima

Actividad Agrícola / Suelo	Contenido Nutrientes	Estructura	Materia Orgánica	pH	Profundidad	Textura	Topografía y pendiente
Adecuación de Suelos	x	x			x	x	X
Siembra	x	x	x	x	x	x	x
Fertilización	x	x	x	x	x	x	x
Control de crecimiento	x	x		x	x	x	x
Control de Malezas	x			x	x	x	x
Control de Plagas	x						
Control de Enfermedades	x					x	
Riego	x	x	x	x	x	x	x
Cosecha							x

Tabla 22: Relaciones entre Actividad Agrícola y Suelo

En la Tabla 23 y Tabla 24 se encuentran las relaciones entre las TI y los factores del clima y suelo identificados. Las relaciones establecidas son específicas, la tecnología puede tener la función de captar datos, analizar los datos, aplicar un insumo o almacenar los datos en una base de datos.

	Tecnología\ Clima	Humedad	Precipitación	Radiación Solar	Temperatura	Viento
TI	GPS					
	Multimedia					
	Nanosensor	Capta	Capta	Capta	Capta	Capta
	UAS	Capta			Capta	
	UAV	Capta			Capta	
	UGV	Capta			Capta	
	Remote Sensing	Capta	Capta	Capta	Capta	Capta
	Sensor	Capta	Capta	Capta	Capta	Capta
	WSN	Capta	Capta	Capta	Capta	Capta
Software	GIS	Almacena	Almacena	Almacena	Almacena	Almacena
	Yield Map				Analiza	
	Yield Monitor				Analiza	
	VR Application					
	VR Fertilizer					
	VR Irrigation					

Tabla 23: Relaciones entre TI y Clima

	Tecnología\ Suelo	Contenido Nutriente	Estructura	Materia Orgánica	pH	Profundidad	Textura	Topografía y pendiente
TI	GPS							
	Multimedia							
	Nanosensor	Capta		Capta	Capta			
	UAS							Analiza
	UAV							
	UGV							
	Remote Sensing	Capta		Capta	Capta			
	Sensor	Capta		Capta	Capta			
	WSN	Capta		Capta	Capta			
Software	GIS	Almacena	Almacena	Almacena	Almacena	Almacena	Almacena	Almacena
	Yield Map	Analiza			Analiza			Analiza
	Yield Monitor							
	VR Application							
	VR Fertilizer							
	VR Irrigation							

Tabla 24: Relaciones entre TI y Suelo

La Tabla 25 y Tabla 26 establecen las relaciones entre las instancias de cultivo y los factores climáticos y del suelo. Esta información se recopiló a partir de la revisión de la industria. Cabe destacar que si no está marcada la celda no significa que no influya, si no que no se encontró la referencia que lo indique.

Cultivo/ Clima	Humedad	Precipitación	Radiación Solar	Temperatura	Viento
Aceite de Palma	x	x		x	
Algodón	x	x			x
Arándano	x		x	x	x
Arroz	x		x	x	
Cacao	x	x	x	x	x
Azúcar de caña	x		x	x	
Cebada	x				
Cebolla	x	x			
Girasol	x				
Maíz	x				
Maní			x	x	
Manzana	x				
Olivo	x				
Plátano	x	x	x	x	x
Papa	x				
Sandía	x		x	x	x
Soya	x		x	x	
Tomate	x				
Trigo	x				
Uva	x	x		x	

Tabla 25: Relaciones entre cultivo y clima

Cultivo/ Suelo	Contenido Nutrientes	Estructura	Materia Orgánica	pH	Profundidad	Textura	Topografía y pendiente
Aceite de Palma	x			x	x	x	
Algodón			x		x	x	
Arándano	x		x	x	x	x	x
Arroz	x		x	x	x	x	
Cacao			x			x	
Azúcar de caña	x				x	x	
Cebada	x					x	
Cebolla	x	x	x	x	x	x	
Girasol	x		x			x	
Maíz	x					x	
Maní			x	x		x	
Manzana	x						
Olivo	x		x	x	x	x	
Plátano			x		x	x	x
Papa	x	x				x	
Sandía	x	x	x	x		x	
Soya				x			
Tomate	x		x	x	x	x	
Trigo			x	x		x	
Uva				x	x		

Tabla 26: Relaciones entre Cultivo y Suelo

Anexo C. Diseño de las Preguntas de la Encuesta

Las preguntas incluidas en la encuesta son similares a las realizadas en el piloto, pues éstas fueron desarrolladas a modo de validar que la encuesta estuviera correctamente formulada. La encuesta fue diseñada y enviada en formato formulario pdf por vía correo electrónico, por motivo del tipo de preguntas relacionadas.

El cuestionario está dividido en dos secciones. La primera contiene dos preguntas demográficas sobre los encuestados, mientras que la segunda sección es específica en cuanto a los criterios a considerar en una implementación de AP. Además, se presentan preguntas abiertas y preguntas cerradas de tipo ranking, dicotómicas y politómicas. A continuación, se presenta en la Figura 52 las preguntas según cómo fueron presentadas.

En el marco de mi tesis de magister se ha elaborado un modelo que recoge condiciones de entrada y restricciones específicas en base a las cuales se puede definir una implementación de Agricultura de Precisión. El modelo se realizó través de una Revisión Sistemática de la Literatura donde se abordaron 3.949 artículos con el fin de obtener diferentes criterios a considerar en una implementación de Agricultura de Precisión. La presente encuesta tiene como objetivo la ratificación de los criterios identificados, además, de la posible integración de nuevos. La encuesta solo le tomará diez minutos y sus respuestas son totalmente anónimas.

I. INFORMACIÓN PERSONAL

1. ¿De qué país es usted?

2. ¿Cuántos años de experiencia tiene con agricultura de precisión?

II. IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS RELEVANTES

1. Al momento de implementar Agricultura de Precisión, cuál(es) de estos criterios se debe(n) considerar, aquellos seleccionados enumérelos según su importancia. Siendo 1 el de mayor importancia.

Cultivo

Actividad Agrícola

Tecnología

Factores Climáticos

Factores del Suelo

Otros:

2. Respecto del cultivo, cuál(es) características se debe(n) identificar previamente a la implementación de Agricultura de Precisión:

- Altura
- Tipo de agricultura según agua
- Tipo de cultivo
- Densidad de siembra
- Duración del ciclo
- Otros:

3. Respecto de la tecnología, cuál(es) características se debe(n) considerar en una implementación de Agricultura de Precisión:

- Tipo de tecnología: Hardware o Software
- Datos que captura
- Función que desarrolla
- Prerrequisitos
- Nivel de conocimiento necesario
- Costo de implementación
- Tasa de retorno
- Otros:

4. Según su experiencia, ¿Cuántos años aproximadamente ha trabajado con las siguientes tecnologías de información?

- GPS:
- Drones:
- Sensores:
- Mapas de rendimiento:
- Monitor de rendimiento:
- Tecnologías de tasa variable:
- Otra tecnología:

5. Según su experiencia, ¿Cuánto es la tasa de retorno de siguientes tecnologías de información?

- GPS:
- Drones:
- Sensores:
- Mapas de rendimiento:
- Monitor de rendimiento:
- Tecnologías de tasa variable:
- Otra tecnología:

6. Se han identificado las siguientes actividades agrícolas que pueden ser parte de una implementación de Agricultura de Precisión:

- Adecuación de suelos
- Siembra
- Fertilización
- Control de crecimiento
- Control de malezas
- Control de plagas
- Control de enfermedades
- Riego
- Cosecha

¿Existe alguna otra actividad agrícola que se deba tener en cuenta en relación a una implementación de Agricultura de Precisión?

No

Si,

7. Se han identificado los siguientes factores climáticos que pueden ser parte de una implementación de Agricultura de Precisión:

- Humedad
- Precipitación
- Radiación Solar
- Temperatura
- Viento

¿Existe algún otro factor climático que se deba tener en cuenta en relación a una implementación de Agricultura de Precisión?

No

Si,

8. Se han identificado los siguientes factores del suelo que pueden ser parte de una implementación de Agricultura de Precisión:

- Contenido de nutrientes
- Estructura
- Materia Orgánica
- pH
- Profundidad
- Textura
- Topografía

¿Existe algún otro factor del suelo que se deba tener en cuenta en relación a una implementación de Agricultura de Precisión?

No

Si,

9. Al momento de elegir una tecnología para una implementación de Agricultura de Precisión. ¿En qué orden se deberían solicitar los criterios?

- Cultivo, Actividad Agrícola, Factor Climático, Factor del Suelo
- Cultivo, Actividad Agrícola, Factor del Suelo, Factor Climático
- Actividad Agrícola, Cultivo, Factor Climático, Factor del Suelo
- Actividad Agrícola, Cultivo, Factor del Suelo, Factor Climático
- Cultivo, Factor del Suelo, Actividad Agrícola, Factor Climático
- Cultivo, Factor del Suelo, Factor Climático, Actividad Agrícola
- Otro:

Si hay otros aspectos que son relevantes para una implementación de Agricultura de Precisión que no se hayan reflejado en las preguntas en esta encuesta, agregue sus comentarios en el espacio que se proporciona a continuación.

Figura 52: Presentación del motivo y preguntas de la encuesta

Anexo D. Diseño de los Casos de Estudio

La encuesta fue diseñada y enviada a través de la herramienta Google Forms. El cuestionario se encuentra dividido en dos secciones. La primera contiene dos preguntas demográficas sobre los encuestados, mientras que la segunda sección es específica los casos de estudio a analizar. Cabe destacar, se presentan preguntas abiertas y preguntas cerradas de tipo politómicas. A continuación, se presenta en la Figura 53 las preguntas según cómo fueron presentadas.

Framework para la implementación de Agricultura de Precisión

Hoy en día, el suelo y el agua no se consideran recursos infinitos o abundantes. Por lo tanto, con el objetivo de aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos; y proteger el medio ambiente, se han empezado a utilizar la Agricultura de Precisión.

Se ha observado que, aunque el uso de la Agricultura de Precisión es una gran ayuda para los agricultores que deben optimizar recursos, sin embargo, su tasa de adopción aún resulta baja. La elección de la tecnología a utilizar para implementar resulta ser una decisión compleja. Además, hay que tener en cuenta que una decisión incorrecta conlleva pérdida de recursos y tiempo que son indispensables para una producción eficiente.

Debido a esto, en el marco de una tesis de magister, se decidió estudiar las Tecnologías de Información usadas en la Agricultura de Precisión junto con criterios de comparación y selección. Además de los contextos en los que han sido utilizadas.

Primero, se realizó una Revisión Sistemática de la Literatura y búsqueda de sitios Web dedicados sobre implementaciones de Agricultura de Precisión con el objetivo de identificar variables de implementación como: tecnologías usadas, datos capturados, beneficios, entre otros.

A partir del conocimiento adquirido se elaboró un Framework con el objetivo de funcionar como referencia para la implementación de Agricultura de Precisión y que en base a él puedan generarse sugerencias respecto a la TI más adecuada según las circunstancias particulares de una implementación como el cultivo, área del suelo, necesidad del terreno, entre otros.

Para validar el framework creado estamos solicitando la colaboración de expertos. Una vez validado se dejará disponible a la comunidad un prototipo de una herramienta basada en él.

Le quedamos muy agradecidos por su atención y colaboración.

Preguntas demográficas

Nombre *

Tu respuesta

Profesión *

Tu respuesta

Años de experiencia en Agricultura de Precisión *

Tu respuesta

Casos de Estudio 1

Una empresa arrocera posee cinco predios contiguos donde se cultiva dicho producto. Estos terrenos suman 500 hectáreas y se encuentran ubicados en la zona centro – sur de Chile. En esta zona existe una transición hacia los climas más fríos y lluviosos, en donde la influencia de las bajas presiones provenientes del polo provoca altos niveles de precipitaciones.

Se desea mejorar el rendimiento de la producción y se piensa que la forma es hacerlo mediante la incorporación de tecnología en sus procesos.

Existen factores que afectan el rendimiento del cultivo. Por ejemplo, las altas y bajas temperaturas por encima y por debajo de los límites críticos afectan el rendimiento de grano ya que inciden sobre el macollaje, la formación de espiguillas y la maduración. Las bajas temperaturas limitan la duración del período y la tasa de crecimiento y el desarrollo de las plantas de arroz. Las altas temperaturas causan estrés térmico sobre las plantas de arroz.

Otro factor es el agua, el nivel recomendado de agua o de humedad en el suelo es esencial para mantener un adecuado manejo de los nutrientes, de las malezas y de las plagas y enfermedades. Bajo condiciones de sequía la lluvia es un factor crítico, de lo contrario el cultivo sufre por falta o exceso de agua.

Se considera que aspectos como la humedad y la temperatura deberían ser controlados en la etapa de crecimiento de las plantas para lograr una mejor cosecha.

Hasta ahora la empresa no usa ninguna tecnología para su proceso agrícola, sin embargo, varios de sus empleados tienen conocimientos básicos para emplear algún tipo de ellas.

¿Cuál tecnología recomendaría? *

- Mapa de Rendimiento
- Monitor de Rendimiento
- Red de Sensores Inalámbricos
- Sensores Remotos
- Sistema de Información Geográfica (SIG)
- Tecnologías de Tasa Variable
- Vehículo Aéreo No Tripulado (Drone)
- Vehículo Terrestre No Tripulado
- Otro: _____

¿Por qué escogió esta(s) tecnologías?

Tu respuesta _____

Casos de Estudio 2

Un agricultor posee un predio de 10.000 metros cuadrados, en este terreno se cultivan manzanas. En el clima de esta predomina el clima mediterráneo y continental, con inviernos templados y lluviosos. En cambio, los veranos son secos y calurosos.

Este huerto se plantó hace 10 años, por lo que se encuentra actualmente en producción. En los últimos años los manzanos se han visto afectados por muchas plagas y enfermedades provocando que en la mayoría de los casos se pierda la fruta incluso antes que madure.

Se requiere aumentar el rendimiento y evitar pérdidas prematuras. Una opción es mediante la incorporación de tecnología en sus procesos.

El agricultor dada su experiencia previa, considera que es necesario monitorear los nutrientes del suelo que influirán en el estado de salud del cultivo.

Hasta ahora no se ha utilizado ninguna tecnología en el proceso agrícola. Aunque, varios de sus empleados poseen los conocimientos mínimos para emplear algún tipo de tecnología.

¿Cuál tecnología recomendaría? *

- Mapa de Rendimiento
- Monitor de Rendimiento
- Red de Sensores Inalámbricos
- Sensores Remotos
- Sistema de Información Geográfica (SIG)
- Tecnologías de Tasa Variable
- Vehículo Aéreo No Tripulado (Drone)
- Vehículo Terrestre No Tripulado
- Otro: _____

¿Por qué escogió esta(s) tecnologías?

Tu respuesta

Casos de Estudio 3

El cliente posee un terreno de 5 hectáreas en las cuales cultiva arándanos. Dicho terreno está situado en la zona centro – sur de Chile. En el clima de esta predomina el clima mediterráneo y continental, con inviernos templados y lluviosos. En cambio, los veranos son secos y calurosos.

El clima, el suelo y la planta resultan fundamentales para lograr una fruta de buen calibre, color, firmeza, madurez adecuada y sin daños mecánicos ni cicatrices. Manejos erróneos en el predio, por su parte, pueden gatillar problemas de calidad y condición que, una vez que se presentan, son imposibles de revertir (deshidratación, pudrición, hongos y partidura, entre otros).

Existen condiciones climáticas que afectan el desarrollo de la planta, en especial en los momentos claves del desarrollo fenológico como la floración, el crecimiento del fruto y la cosecha, uno de estos es el viento. Vientos permanentes sobre los 10 km/hora o ráfagas de viento fuerte pueden afectar en distintas formas, dependiendo del estado fenológico de la planta. Los efectos que puede generar son: Deshidratación de la planta, Dificultad de polinización, Caída de la fruta madura, Daño en la baya por golpes y Disminución de la tasa de crecimiento.

Se piensa que mediante la incorporación de tecnología se puede mejorar el rendimiento. Se considera que es necesario vigilar la velocidad del viento con el objetivo de tomar medidas para evitar pérdidas. Es importante realizar este monitoreo, especialmente durante la cosecha del cultivo.

Hasta ahora no usa ninguna tecnología para su proceso agrícola, sin embargo, varios de sus empleados tienen conocimientos básicos para emplear algún tipo de ellas.

¿Cuál tecnología recomendaría? *

- Mapa de Rendimiento
- Monitor de Rendimiento
- Red de Sensores Inalámbricos
- Sensores Remotos
- Sistema de Información Geográfica (SIG)
- Tecnologías de Tasa Variable
- Vehículo Aéreo No Tripulado (Drone)
- Vehículo Terrestre No Tripulado
- Otro: _____

¿Por qué escogió esta(s) tecnologías?

Tu respuesta

Casos de Estudio 4

Una empresa productora, que posee 20 hectáreas de maíz, desea incorporar tecnologías en sus procesos. Esta empresa se encuentra ubicada en la zona sur de Chile, tiene 10 años de experiencia en el rubro. El clima en esta zona es templado húmedo, con precipitaciones durante todo el año, y temperaturas más frescas.

Los últimos análisis han demostrado deficiencias de nutrientes, es probable que la disponibilidad de uno o más de los elementos en el suelo haya caído por debajo del nivel con el cual se obtienen rendimientos rentables. Las deficiencias de nutrientes que se presentan en el maíz pueden ser corregidas por medio de una aplicación de fertilizante en cobertera.

Para mantener controlada la situación se considera necesario monitorear el contenido de nutrientes en todas las actividades agrícolas, desde la siembra hasta la cosecha.

Los miembros de la empresa tienen conocimientos de tecnologías, especialmente en el uso de drones.

¿Cuál tecnología recomendaría? *

- Mapa de Rendimiento
- Monitor de Rendimiento
- Red de Sensores Inalámbricos
- Sensores Remotos
- Sistema de Información Geográfica (SIG)
- Tecnologías de Tasa Variable
- Vehículo Aéreo No Tripulado (Drone)
- Vehículo Terrestre No Tripulado
- Otro: _____

¿Por qué escogió esta(s) tecnologías?

Tu respuesta _____

Comentarios

Si hay otros aspectos que son relevantes para un caso de estudio de implementación de Agricultura de Precisión que no se hayan reflejado en las preguntas en esta encuesta, agregue sus comentarios en el espacio que se proporciona a continuación.

Tu respuesta _____

Figura 53: Presentación del motivo y casos de estudio