

Sistemas de apoyo a la toma de decisiones que usan inteligencia artificial en la agricultura de precisión: un mapeo sistemático de literatura

José A. Brenes¹, Alexandra Martínez¹, Christian Quesada-López¹, Marcelo Jenkins¹

joseantonio.brenes@ucr.ac.cr, alexandra.martinez@ucr.ac.cr, cristian.quesadalopez@ucr.ac.cr, marcelo.jenkins@ucr.ac.cr

¹ Universidad de Costa Rica, Escuela de Ciencias de la Computación e Informática, San José, Costa Rica.

Pages: 217–229

Resumen: Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones para la agricultura permiten optimizar los procesos de cultivo, al utilizar la menor cantidad de recursos (tierra, agua y fertilizantes). En esta investigación, se caracterizaron los sistemas de apoyo a la toma de decisiones que usan técnicas de inteligencia artificial (IA) en procesos de agricultura de precisión. Para ello, se realizó un mapeo sistemático de literatura donde se identificaron 39 estudios primarios. Los estudios se analizaron con respecto a las técnicas de IA utilizadas, las variables de entrada, salidas, tipo de procesamiento realizado, y evaluación de las soluciones reportadas. En total se identificaron 12 técnicas de IA y 73 variables de entrada, siendo las variables de clima las más usadas. Adicionalmente, se evidenció que el 57% de los estudios analizados (18) reportan automatización de los procesos mediante el uso de actuadores, mientras que solo el 17% (6) brindan recomendaciones a los agricultores.

Palabras-clave: sistemas de apoyo a la toma de decisiones; inteligencia artificial; agricultura de precisión; invernaderos.

Decision support systems that use artificial intelligence for precision agriculture: a systematic literature mapping

Abstract: Decision support systems for agriculture allow to optimize crop processes by using the least amount of resources (land, water and fertilizers). In this study, we characterized decision support systems that use artificial intelligence (AI) techniques for precision agriculture processes. To this aim, a systematic literature mapping was carried out where 39 primary studies were identified. Studies were analyzed based on the AI techniques used, the reported input variables, outputs, type of processing, and solution evaluation. A total of 12 artificial intelligence techniques and 73 input variables were identified, with climate variables being the most used. In addition, it was evidenced that 57% of the solutions (18) automate the process through the use of actuators, while only 17% (6) offer recommendations to farmers.

Keywords: decision support systems; artificial intelligence; precision agriculture; greenhouses.

1. Introducción

El crecimiento poblacional y los problemas asociados al cambio climático, tales como la reducción de la tierra cultivable y el difícil acceso a recurso hídrico, han generado gran preocupación en la población mundial en los últimos años. Estudios recientes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2017) han arrojado proyecciones alarmantes: la población mundial alcanzará los 10 mil millones de habitantes para el año 2050 y esto representará una demanda adicional de más del 50% de los alimentos que se consumen hoy en día. Ante esta situación, el sector productivo y la industria han estado trabajando en mejorar los sistemas de producción, de manera que se pueda incrementar la producción optimizando los procesos productivos. En el campo de la agricultura, desde hace varias décadas se ha estado trabajando en la agricultura de precisión, método que busca producir más alimentos con menos recursos agua y fertilizantes (van Evert, Gaitán-Cremaschi, Fountas y Kempenaar, 2017).

Resulta estratégico entonces que el sector tecnológico apoye al sector productivo en la creación de herramientas que permitan a los agricultores alcanzar altos rendimientos para poder así lidiar con los problemas proyectados a futuro. Una forma de lograr esto es a través de la implementación de técnicas de inteligencia artificial (IA) en los procesos de toma de decisiones. Al respecto, en la literatura podemos encontrar esfuerzos reportados en esta área (Madushanki, Halgamuge, Surangi y Syed, 2019), muchos de los cuales hacen uso de tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) y las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), para obtener datos relevantes sobre los cultivos.

El objetivo de esta investigación fue caracterizar los sistemas de apoyo a la toma de decisiones que usan técnicas de inteligencia artificial en procesos de agricultura inteligente, específicamente en el contexto de agricultura de precisión bajo invernadero. Para ello, se realizó un mapeo sistemático de literatura que identificó un total de 39 estudios primarios. Los estudios se analizaron con respecto a las técnicas de IA utilizadas en los sistemas, así como las variables de entrada, salidas, tipo de procesamiento realizado, y evaluación empleadas.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se describen los trabajos relacionados. En la sección 3 se definen los conceptos más relevantes del área de estudio. En la sección 4 se explica la metodología usada para realizar el mapeo sistemático. En la sección 5 se muestran los resultados, en la sección 6 se discuten dichos resultados, y en la sección 7 se presentan las conclusiones.

2. Marco teórico

La *agricultura de precisión* puede ser definida como una estrategia amigable con el ambiente, que permite variar las entradas o insumos utilizados en la producción para aprovechar las condiciones del medio en el que se cultiva y optimizar el desarrollo de los cultivos (Srinivasan, 2006). Gemtos, Fountas y Aggelopoulou (2011) y Dholu y Ghodinde (2018) indican que en la agricultura de precisión se nutre a los cultivos con la cantidad de recursos óptima requerida en el momento preciso y con una duración exacta, de acuerdo con los requerimientos de la fase de cultivo actual.

La *fase de cultivo* se refiere a la etapa de crecimiento de un cultivo y representa un factor importante al segmentar y analizar el crecimiento, y las condiciones del cultivo (Di et al., 2015). Li y Chen (2011) consideran que la fase de cultivo es un factor crítico en la estimación y predicción del rendimiento, por lo que se debe censar en todo momento. Para realizar un censado correcto y preciso de las variables que afectan el crecimiento de un cultivo, resulta útil considerar los conocimientos del área de la *agrometeorología*. Esta se encarga de censar y buscar relaciones entre las distintas variables físicas que intervienen en los procesos agronómicos, con el fin de acelerar la producción y evitar el abuso irreversible de recursos (MacKerron, 2005).

En agricultura, los *invernaderos* juegan un papel importante, pues son ambientes de producción que permiten controlar las condiciones para el crecimiento de los cultivos (Durmus, Günes y Kirci, 2016). Dan, Jianmei, Yang y Jianqiu (2016) y Heidari y Khodadadi (2017) describen los invernaderos como espacios designados para recrear un ambiente en el cual la temperatura, la humedad y la iluminación son monitoreados y ajustados para optimizar las condiciones de crecimiento de los cultivos. La medición y el control de datos asociados a los cultivos bajo invernadero se considera una tarea de la *agrometeorología*, a través del uso de las WSN (Liu, Jin, Shen, Fu y Linge, 2016). Las WSN consisten en dispositivos de censado de variables físicas que se pueden desplegar de manera distribuida en ubicaciones remotas (Narmada y Rao, 2012).

Contar con sistemas de apoyo a la toma de decisiones que monitoreen y controlen las variables físicas que afectan el rendimiento de los cultivos, puede ayudar a los agricultores a incrementar la producción y reducir los recursos requeridos (Rathinam, Surendran, Shilpa, Santhiya y Sherin, 2019). El uso de técnicas de inteligencia artificial en el modelado de variables físicas se ha incrementado en los últimos años, permitiendo resolver problemas más complejos (Chen, Jakeman y Norton, 2008). Uno de estos problemas es precisamente la optimización de las decisiones que se toman en los procesos de cultivo en la agricultura de precisión.

3. Trabajo relacionado

En los últimos años, se han dado grandes avances en el uso de las TIC (incluyendo el Internet de las Cosas) para el monitoreo y control de los parámetros que afectan los cultivos. Al respecto, Madushanki, Halgamuge, Surangi y Syed (2019) realizaron un análisis de las soluciones propuestas en la literatura para el monitoreo y el control de variables físicas. En dicho estudio, se lograron detectar alrededor de 28 variables físicas que fueron censadas mediante el uso de las WSN. Entre las principales variables físicas medidas se encuentran la temperatura del aire, la humedad del ambiente o humedad relativa, la humedad y la acidez del suelo o pH.

Otros investigadores se han enfocado en desarrollar sistemas de apoyo a la toma de decisiones que ayuden a reducir el impacto de los procesos de agricultura en el deterioro del ambiente. Ejemplo de lo anterior es el estudio presentado por Ahmed et al. (2013), en el cual los autores realizan un análisis de este tipo de sistemas y concluyen además que a través del censado constante y la agricultura de precisión, es posible reducir la contaminación por fertilizantes y los gases de efecto invernadero, siendo el último el que más afecta al cambio climático.

En la literatura existe un gran número de estudios primarios enfocados en monitorear y controlar las técnicas de agricultura existentes con el objetivo de aumentar la producción, reduciendo el consumo de recursos o contribuyendo a disminuir el deterioro del medio ambiente. Sin embargo, no encontramos estudios secundarios que realizaran un análisis de las soluciones propuestas en agricultura que utilicen técnicas de inteligencia artificial para mejorar el proceso de toma de decisiones. Por ello, nuestra revisión de literatura presenta un análisis de dichas soluciones, con el objetivo de caracterizarlas y conocer cómo se han evaluado. Esto podría ayudar a otros investigadores en el área a identificar oportunidades de mejora en la optimización de los procesos de cultivo mediante una toma de decisiones más inteligente, tomando en cuenta el conocimiento que se obtiene de los datos censados de los cultivos.

4. Metodología

Para llevar a cabo este mapeo sistemático de literatura se siguieron los lineamientos de la metodología propuesta por Petersen, Vakkalanka y Kuzniarz (2015). A continuación, se describe el proceso realizado.

El objetivo de este estudio, formulado con el modelo GQM (Basili, Caldiera, y Rombach, 1994), fue *analizar* sistemas de apoyo a la toma de decisiones que usan técnicas de inteligencia artificial *con el propósito de* caracterizarlos *con respecto a* sus entradas, salidas, tipo de procesamiento y evaluación, *desde el punto de vista del* investigador *en el contexto de* procesos de agricultura de precisión bajo invernadero. Para esto definimos las siguientes preguntas de investigación:

- RQ1. ¿Cuáles técnicas de inteligencia artificial se han utilizado en sistemas de apoyo a la toma de decisiones para la agricultura de precisión bajo ambientes protegidos?
- RQ2. ¿Cómo se caracterizan los sistemas de apoyo a la toma de decisiones que utilizan técnicas de inteligencia artificial en el contexto de la agricultura de precisión bajo ambientes protegidos?
- RQ3. ¿Cómo se han evaluado los sistemas de apoyo a la toma de decisiones que utilizan técnicas de inteligencia artificial en el contexto de la agricultura de precisión bajo ambientes protegidos?

4.2. Estrategia de búsqueda y proceso de selección de los estudios primarios

Inicialmente se realizó una búsqueda exploratoria en bases de datos de texto completo para identificar estudios relevantes en la temática de análisis, los cuales fueron usados como artículos de control (Burchi et al., 2018) (Nawandar & Satpute, 2019) (Park, Na & Cho, 2019). Dicha búsqueda se basó en el objetivo, las preguntas de investigación, y en términos utilizados en estudios secundarios relacionados. Con los datos recopilados, definimos la siguiente cadena de búsqueda para ejecutar en las bases de datos de texto completo:

(“decision support” OR “decision making” OR “decision-making”) AND (“greenhouse”) AND (“agriculture” OR “agricultural process”)*

Las búsquedas automatizadas se realizaron en las bases de datos *Scopus* (áreas de agricultura, computación e ingeniería), *IEEE Xplore*, *Science Direct*, *ACM Digital Library*, *Springer Link* y *Web of Science*. El protocolo del mapeo se desarrolló durante el primer semestre del año 2019. Por su parte, la búsqueda automatizada se ejecutó en el mes de junio del 2019, y los estudios se analizaron entre junio y setiembre del 2019.

Se obtuvo un conjunto de 405 estudios primarios de la búsqueda automatizada. Sobre estos estudios se aplicaron 3 criterios de inclusión y 3 criterios de exclusión (Tabla 1), con el objetivo de seleccionar solo aquellos estudios que estuviesen relacionados directamente con el área de estudio y las preguntas de investigación. El proceso de inclusión y exclusión se hizo con base en el título, resumen y palabras claves de los artículos (en caso de duda, se realizó lectura completa). Se excluyeron publicaciones que cumplieran con la fórmula (E1 OR E2 OR E3) y se incluyeron los estudios no excluidos que cumplieran además con la fórmula (I1 AND I2 AND I3).

A partir de la estrategia de búsqueda y el proceso de selección realizados, se obtuvo un total de 39 artículos, tal como se muestra en la Figura 1.

Criterio de inclusión	Criterio de exclusión
I1. Estudios que reporten técnicas de inteligencia artificial.	E1. Estudios que no hayan sido escritos en idioma inglés.
I2. Estudios que reporten como objetivo mejorar los procesos de agricultura.	E2. Estudios que no estén disponibles en texto completo.
I3. Estudios que reporten sistemas de apoyo a la toma de decisiones.	E3. Estudios secundarios y terciarios.

Tabla 1 – Criterios de inclusión y exclusión

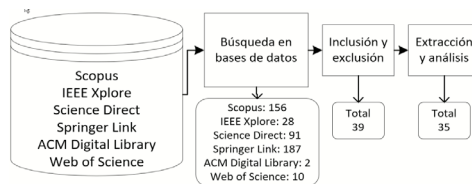


Figura 1 – Proceso de búsqueda y selección de estudios.

4.4. Criterios de calidad

Para evaluar la calidad de los estudios seleccionados, se definieron cuatro criterios sobre aspectos de interés para el análisis: (Q1) ¿El estudio detalla con claridad las técnicas de inteligencia artificial utilizadas? (Q2) ¿El estudio identifica las variables de entrada utilizadas en el proceso de análisis, así como las salidas generadas? (Q3) ¿El estudio sigue o define una metodología de evaluación rigurosa? (Q4) ¿El estudio explicita el estado de implementación de la solución e identifica trabajo futuro? El puntaje de cada criterio de calidad se asignó en una escala de 0 a 1, donde 0=No cumple el criterio en lo absoluto, 0,5=Cumple con el criterio parcialmente, 1=Cumple con el criterio totalmente.

La calificación final de calidad de cada estudio se obtuvo sumando el puntaje asignado a cada criterio Q1 a Q4. Estas calificaciones de calidad variaron entre 0 y 4 para los estudios analizados. Se excluyeron cuatro estudios cuya calidad fue menor a 2. De esta manera, la calidad de los estudios resultantes varió entre 2 y 4 con una media de 2,96 y una mediana de 3, lo cual indica que los estudios analizados ofrecen un nivel de detalle aceptable de acuerdo a los criterios de calidad definidos. Después del proceso de evaluación de calidad, quedaron incluidos 35 estudios para la extracción y el análisis.

4.5. Extracción de datos y análisis de resultados

Para cada estudio seleccionado, se extrajeron 102 datos relevantes. Los elementos del formulario de extracción asociados a cada pregunta de investigación se muestran en la Tabla 2. La extracción de los datos fue ejecutada por el primer autor del estudio. Para el análisis y síntesis de la información, se tabularon los datos extraídos en MS Excel, se elaboraron tablas de frecuencias y se usó un análisis narrativo para exponer los principales hallazgos y la evidencia extraída.

Categoría	Elementos de datos extraídos
Información general	Identificador, Código de referencia, Referencia, Año, Título, Autores, Palabras claves, DOI, URL, Tipo de documento, Tipo de estudio, Base(s) de datos donde fue encontrado.
Técnicas de inteligencia artificial utilizadas (RQ1)	Redes neuronales artificiales, Sistemas de lógica difusa, Aprendizaje de máquina, Big Data, Sistemas inferenciales, Simulación, Minería de datos, Análisis predictivo, Algoritmos genéticos, Otros.
Variables de entrada (RQ2)	Variables de clima, variables de planta, variables de suelo, otras variables.
Salidas (RQ2)	Visualización de datos (datos planos o indicadores), Instrucciones a actuadores, Recomendaciones al agricultor, Otro tipo de salida.
Tipo de procesa-miento (RQ2)	En tiempo real, En sitio (<i>on premise</i>), Remoto (<i>cloud</i>), Otro tipo de procesamiento.
Almacenamiento de información (RQ2)	Temporal, En Archivos, Remoto, Utilizando bases de datos: relacionales tradicionales, no-SQL, de series de tiempo, Otro tipo de almacenamiento, No específica tipo de almacenamiento.
Evaluación (RQ3)	Tipo de evaluación, Tipo de cultivo de prueba, Nivel de implementación.

Tabla 2 – Resumen de los datos extraídos por estudio.

La lista completa de los estudios seleccionados y el formulario de extracción completo con los resultados del proceso de extracción (incluyendo los puntajes de calidad), están disponibles en el siguiente enlace: <https://tinyurl.com/yyh45sug>. Los identificadores que en adelante se utilizarán para referenciar los estudios, se encuentran detallados en el formulario de extracción disponible en el enlace anterior.

4.6. Amenazas a la validez

Para la identificación de estudios primarios, la cadena de búsqueda fue definida a partir de un conjunto de estudios de control y piloteada en varias pruebas con el objetivo de reducir el ruido. Por su parte, la selección de las bases de datos se basó en

el reconocimiento con que cuentan estas por la gran cobertura de estudios publicados en áreas como la Computación e Informática, Ingeniería y Agronomía. Ante dudas relacionadas con la inclusión de un estudio, se realizó la lectura completa del mismo.

El error en la extracción de información de los estudios por parte del investigador que lo ejecuta se minimizó al incorporar en el equipo de análisis a varios investigadores los cuales colaboraron con la validación y verificación del proceso de análisis realizado. Para la extracción de información se diseñó un formulario que guía el proceso y que puede ser revisado. La aplicación de los criterios de calidad fue ejecutada por un solo investigador basándose en criterio experto y en lo reportado por los autores. Por su parte, el análisis final y la generación de resultados se realizaron con base en los estudios resultantes del mapeo solamente.

5. Resultados

En esta sección presentamos los resultados del mapeo de los 35 estudios primarios analizados, respondiendo a las preguntas de investigación planteadas. Los estudios analizados presentaron soluciones de sistemas de apoyo a la toma de decisiones con diferentes niveles de desarrollo. El 9% de los estudios (3 de 35) presentó propuestas de soluciones, mientras que el 14% (5 de 35) reportó además los diseños. El 77% de las soluciones encontradas (27 de 35) llegaron a un nivel de implementación, siendo algunas de estas evaluadas mediante cultivos, como se detalla más adelante.

5.1. Técnicas de inteligencia artificial utilizadas

La identificación de técnicas de inteligencia artificial en los estudios se realizó basado en Chen, Jakeman y Norton (2008) y Kumbhar (2014). Además, se realizó una clasificación de tales técnicas de acuerdo con el mapa propuesto por Corea (2018). Así, en total identificamos 12 técnicas de inteligencia artificial reportadas (Tabla 3) las cuales fueron clasificadas por paradigma (Tabla 4). Es importante notar que algunos de los estudios reportan combinaciones de técnicas por ejemplo mediante la combinación de lógica difusa con redes neuronales (S230, S270) o aprendizaje de máquina (S276).

Categoría de la técnica de Inteligencia Artificial	Estudios que la reportan	Conteo
<i>Machine learning</i>	S2, S12, S29, S35, S42, S54, S78, S94, S97, S104, S125, S131, S154, S159, S165, S230, S235, S270, S276	19
<i>Logic based</i>	S51, S58, S60, S97, S141, S152, S229, S230, S235, S254, S258, S270, S276, S291	14
<i>Embodied intelligence</i>	S42, S90, S119, S159, S164, S241	6
<i>Search and optimization</i>	S6, S12, S83, S147	4
<i>Knowledge based</i>	S51, S78, S141	3
<i>Probabilistic methods</i>	S94, S343	2
<i>Not clasified</i>	S34, S142, S202	3

Tabla 3 – Técnicas de inteligencia artificial utilizadas.

Las técnicas de inteligencia artificial más reportadas son los sistemas de análisis predictivo y lógica difusa. Esto tiene sentido pues la lógica difusa permite combinar variables de entrada, para producir uno o varios valores de salida, justo lo que se busca en la agricultura de precisión; y en el segundo caso, debido a que los sistemas de apoyo a la toma de decisiones en agricultura de precisión buscan predecir el comportamiento del crecimiento de las plantas o de las condiciones de los invernaderos, para tomar medidas de control y optimizar el crecimiento y la producción.

5.2. Caracterización de los sistemas que utilizan técnicas de IA

Se identificaron en total 73 variables de entrada, las cuales se clasificaron en cuatro grandes grupos, a saber: variables de clima, variables de planta, variables de suelo y otras. En la Tabla 4 se muestran los estudios que reportan el uso de las variables de entrada que presentan mayor frecuencia de uso. Es posible notar un gran número de estudios que reportan variables de clima, datos que son posibles de obtener de una manera más sencilla en comparación con otro tipo de variables como la temperatura de las hojas de las plantas.

Tipo	Variable	Estudios que la reportan	Conteo
Clima	Temperatura	S2, S6, S12, S29, S34, S35, S42, S54, S58, S60, S78, S83, S90, S94, S97, S119, S125, S147, S152, S154, S159, S164, S165, S202, S254, S258, S270, S276, S291, S343	30
Clima	Humedad relativa	S2, S12, S29, S34, S35, S42, S54, S58, S60, S78, S83, S94, S97, S119, S125, S147, S154, S159, S202, S254, S258, S270, S276, S291	24
Clima	Radiación neta	S2, S29, S42, S54, S58, S78, S83, S94, S147, S152, S159, S202, S235, S241, S343	15
Clima	Intensidad de la luz	S12, S29, S35, S60, S78, S90, S125, S202, S270, S276, S291	11
Clima	Concentración de CO ₂	S6, S58, S78, S83, S119, S125, S154, S235, S270, S276, S343	11
Suelo	Humedad del sustrato	S2, S94, S97, S104, S164, S165, S229, S235, S254, S258, S343	11
Suelo	Temperatura	S29, S35, S51, S83, S119, S165, S202, S235, S291, S343	10
Suelo	Conductividad eléctrica	S51, S78, S83, S147, S159, S235	6
Suelo	Acidez (pH)	S51, S78, S83, S147, S159, S235	6
Planta	Crecimiento del cultivo	S2, S12, S159, S202, S343	5
Planta	Temperatura de la hoja	S29, S34, S83, S97	4

Tabla 4 – Variables de entrada más reportadas.

En la Tabla 5, se detallan las salidas reportadas, siendo el uso de actuadores y la visualización de datos las reportadas con mayor frecuencia. El primer caso debido a

la automatización de los procesos que se busca en la agricultura de precisión y en el segundo caso debido al fácil acceso a plataformas de visualización de datos en línea y al uso de dispositivos móviles hoy en día.

Tipo de salida	Estudios que la reportan	Conteo
Visualización de datos	S2, S35, S42, S54, S60, S78, S83, S90, S97, S119, S142, S147, S152, S154, S159, S165, S229, S235, S276	19
Instrucciones a actuadores	S2, S6, S29, S35, S58, S60, S83, S97, S104, S125, S159, S229, S230, S235, S254, S270, S276, S291	18
Recomendaciones al agricultor	S6, S12, S34, S51, S54, S147	6
Otro tipo de salida	S58, S131, S343	3
No definida	S141, S164, S202, S241, S258	5

Tabla 5 – Salidas reportadas.

5.3. Evaluación de los sistemas que utilizan técnicas de IA

Se evidencia que muchos de los sistemas y soluciones reportadas no han sido evaluados de manera rigurosa. Cuando sí se reporta una metodología de evaluación, esta se llevó a cabo mediante la evaluación de los cultivos (13 estudios) o por medio de evaluación en laboratorio con pruebas controladas (9 estudios). En la Tabla 6 se detallan las técnicas de evaluación reportadas por los estudios.

Tipo de evaluación	Estudios que la reportan	Conteo
Evaluación con cultivo	S2, S6, S12, S35, S51, S54, S58, S94, S97, S104, S254, S291, S343	13
Evaluación en laboratorio	S29, S51, S60, S83, S90, S104, S142, S152, S154	9
Evaluación de precisión	S12, S78, S125, S154, S165, S230	6
Evaluación de expertos	S51, S159, S276	3
Evaluación de rendimiento	S2, S60, S343	3
Otro tipo de evaluación	S42, S141	2
No definida	S34, S119, S131, S147, S164, S202, S229, S235, S241, S258, S270	11

Tabla 6 – Tipo de evaluación reportada.

Además, en los casos en los que se reportó la evaluación mediante un cultivo, se identificaron los cultivos específicos utilizados, siendo las hortalizas las más reportadas: hortalizas (S2, S6, S12, S29, S34, S35, S51, S54, S58, S83, S90, S104, S141, S159, S165, S202, S229, S276, S343), frutas (S78, S90, S97, S164, S254), hidropónicos (S78, S147, S154), flores (S42, S291), otros (S94, S152), ornamental (S159). Lo anterior se puede deber a que la mayor parte de los cultivos que se producen bajo invernadero son los vegetales.

6. Discusión

La mejora de procesos de cultivos mediante la implementación de tecnologías emergentes es un campo de estudio activo. En el mapeo de literatura realizado se puede evidenciar como los parámetros de entrada relacionados con variables físicas de clima están siendo ampliamente utilizados por los sistemas de apoyo a la toma de decisiones mientras que los parámetros de suelo son utilizados en menor medida, esto puede deberse a la facilidad de acceso a hardware de medición, a los costos de dicho hardware o inclusive a que en muchas ocasiones un sensor permite realizar la medición de varias variables físicas de clima a la vez.

En cuanto a los parámetros de entrada relacionados con variables de las plantas, es evidente el escaso monitoreo reportado por los autores, quienes indican que es difícil construir o acceder a hardware para medir este tipo de variables. Por otro lado, en la mayoría de los casos las soluciones reportadas recurren a la visualización de datos solamente, mientras que en segundo lugar se hace uso de actuadores para controlar variables específicas censadas en los invernaderos, automatizando de esta manera el proceso de cultivo. Es importante destacar que son pocos los autores que muestran recomendaciones o alertas a los agricultores (6 de 35) para que estos realicen alguna intervención en los procesos de cultivo. Lo anterior resulta de gran importancia a analizar desde una perspectiva social pues la adopción de la tecnología por parte de las personas en muchas ocasiones se ve violentada por el temor al reemplazo.

Por su parte, resulta interesante la manera en la que están siendo evaluados los sistemas, sobre todo por la variabilidad de los cultivos que se utilizan cuando la evaluación se realiza de esta manera. Para las evaluaciones realizadas en laboratorio, se esperaría que en algún momento las soluciones puedan ser probadas con los cultivos para validar su precisión y correctitud. En cuanto a las mejoras obtenidas por el uso de técnicas de IA, los autores reportan, entre otros beneficios, que es posible optimizar el rendimiento de los cultivos, realizar un manejo adecuado de pestes y enfermedades, reducir la cantidad de recursos requeridos para la producción agrícola, optimizar las dosis de nutrientes, entre otros aspectos.

7. Conclusiones

En este documento se reportan los resultados obtenidos del mapeo sistemático de literatura realizado para analizar los sistemas de apoyo a la toma de decisiones que usan técnicas de inteligencia artificial en procesos de agricultura de precisión bajo invernadero. La cantidad de estudios primarios analizados luego de aplicar el proceso de búsqueda expuesto fue de 39 estudios.

En particular, se identificaron las técnicas de inteligencia artificial utilizadas en los sistemas de apoyo a la toma de decisiones. Adicionalmente, se caracterizaron estos sistemas mediante el análisis de sus variables de entrada, las salidas generadas, tipo de procesamiento realizado, y evaluación reportada.

Entre los principales resultados están que las variables de entrada más utilizadas son las de clima y en menor medida, las variables de la planta. Asimismo, se encontró que las

salidas más comunes en estos sistemas son indicaciones a actuadores o visualización de resultados, siendo pocos los estudios que brindan recomendaciones al agricultor.

Como trabajo futuro se recomienda explorar las técnicas reportadas por los autores para medir variables físicas de plantas e identificar la utilidad de tales variables en la obtención de resultados. Asimismo, se podría analizar de manera comparativa técnicas de aprendizaje de máquina para identificar aquella que mayor aporta mayor beneficio en la mejora del proceso de toma de decisiones y optimización de la producción agrícola.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Escuela de Ciencias de la Computación e Informática (ECCI), y el Centro de Investigaciones en Tecnología de la Información y la Comunicación (CITIC) en el marco de los proyectos 736-B8-016 y 834-B9-189.

Referencias

- Ahmed, Mukhtar; Asif, Muhammad; Sajad, Muhammad; Khattak, Jabar Zaman Khan; Ijaz, Waqas; Wasaya, Allah and Chun, Jong Ahn. Could agricultural system be adapted to climate change?: A review [online]. *Australian Journal of Crop Science*, Vol. 7, No. 11, Oct 2013: 1642-1653.
- Basili, V. R., Caldiera, G. & Rombach, D. H. (1994). The Goal Question Metric Approach. En *Encyclopedia of Software Engineering*.
- Burchi, G., Chessa, S., Gambineri, F., Kocian, A., Massa, D., Milazzo, P., Ruggeri, A. (2018). Information technology controlled greenhouse: A system architecture. In 2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iot-tuscany.2018.8373044>
- Chen, S. H., Jakeman, A. J., & Norton, J. P. (2008). Artificial Intelligence techniques: An introduction to their use for modelling environmental systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78(2-3), 379-400.
- Corea, F. (2019). Ai knowledge map: How to classify ai technologies. In F. Corea, *An Introduction to Data* (Vol. 50, pp. 25-29). https://doi.org/10.1007/978-3-030-04468-8_4
- Dan, L., Jianmei, S., Yang, Y., & Jianqiu, X. (2016). Precise Agricultural Greenhouses Based on the IoT and Fuzzy Control. In 2016 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). IEEE.
- Dholu, M., & Ghodinde, K. A. (2018). Internet of Things (IoT) for Precision Agriculture Application. In 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icoei.2018.8553720>
- Di, L., Yu, E. G., Yang, Z., Shrestha, R., Kang, L., Zhang, B., & Han, W. (2015). Remote sensing based crop growth stage estimation model. In 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE.

- Durmus, H., Gunes, E. O., & Kirci, M. (2016). Data acquisition from greenhouses by using autonomous mobile robot. In 2016 Fifth International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). IEEE. <https://doi.org/10.1109/agro-geoinformatics.2016.7577696>
- FAO. (2017). The future of food and agriculture: trends and challenges. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gemtos, T. A., Fountas, S., & Aggelopoulou, K. (2011). Precision Agriculture Applications In Horticultural Crops In Greece and Worldwide. In HAICTA.
- Handbook of Precision Agriculture. (2006). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482277968>
- Heidari, M., & Khodadadi, H. (2017). Climate control of an agricultural greenhouse by using fuzzy logic self-tuning PID approach. In 2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC). IEEE. <https://doi.org/10.23919/iconac.2017.8082074>
- Li, Z., & Chen, Z. (2011). Remote sensing indicators for crop growth monitoring at different scales. In 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE. <https://doi.org/10.1109/igarss.2011.6050124>
- Liu, Q., Jin, D., Shen, J., Fu, Z., & Linge, N. (2016). A WSN-based prediction model of microclimate in a greenhouse using extreme learning approaches. In 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icact.2016.7423608>
- MacKerron, D. K. L. (2005). Agrometeorology. Principles and Application of Climate Studies in Agriculture. By H. S. Mavi and G. J. Tupper. Binghamton, NY, USA: Haworth Press (2004), pp. 364, US \$95.95. ISBN 1-56022-972-1. Experimental Agriculture, 41(2), 267–267. <https://doi.org/10.1017/s0014479704212613>
- Madushanki, A. A. R., N, M., A., W., & Syed, A. (2019). Adoption of the Internet of Things (IoT) in Agriculture and Smart Farming towards Urban Greening: A Review. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 10(4). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0100402>
- Narmada, A., & Rao, P. S. (2012). Zigbee Based WSN with IP Connectivity. In 2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation. IEEE. <https://doi.org/10.1109/cimsim.2012.39>
- Nawandar, N. K., & Satpute, V. R. (2019). IoT based low cost and intelligent module for smart irrigation system. Computers and Electronics in Agriculture, 162, 979–990. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.027>
- Park, Y., Na, M. H., & Cho, W. (2019). Determination on environmental factors and growth factors affecting tomato yield using pattern recognition techniques. Multimedia Tools and Applications, 78(20), 28815–28834.

- Ramesh Kumbhar, S. (2014). An Overview on Use of Artificial Intelligence Techniques in Effective Security Management. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2(9).
- Rathinam D, D. K., D, S., A, S., A, S. G., & J, S. (2019). Modern Agriculture Using Wireless Sensor Network (WSN). In *2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)*. IEEE.
- Sallis, P. (2011). Keynote 1: Food for the World -- GeoComputation Meeting the Challenge. (2011). In *2011 Uksim 13th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/uksim.2011.10>
- van Evert, F., Gaitán-Cremaschi, D., Fountas, S., & Kempenaar, C. (2017). Can Precision Agriculture Increase the Profitability and Sustainability of the Production of Potatoes and Olives? *Sustainability*, 9(10), 1863. <https://doi.org/10.3390/su9101863>