

Revisión bibliográfica LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS COMO HERRAMIENTA DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Daniel-----, Osmel Rodríguez..... y René Florido Bacallao(correspondencia)

Resumen

Se realizó una revisión bibliográfica sobre el uso de los modelos de simulación de cultivos como herramienta de inteligencia artificial, con el objetivo de dar a conocer la importancia del uso de los mismos, los diferentes modelos que se pueden utilizar, sus ventajas y desventajas, así como los impactos económicos, social y ambiental. Se presenta un resumen de algunos conceptos relacionados con la inteligencia artificial y los modelos de simulación de cultivos. Los resultados de esta revisión avizoran sobre el impacto de estas tecnologías para contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes y sostenibles. Este trabajo ofrece un marco teórico referencial que puede ser útil para orientar investigaciones futuras y orientar a productores hacia prácticas resilientes frente al cambio climático.

Palabras claves: modelos de simulación de cultivos, Inteligencia artificial, DSSAT

Introducción

La Inteligencia artificial ha surgido como una herramienta revolucionaria para el desarrollo tecnológico, en sus inicios estuvo relacionada con la comunidad científica y la ciencia ficción, en la actualidad se evidencia su creciente aplicación a todas las actividades humanas, lo que avizora un futuro más exitoso de esta disciplina en todos los sectores de la sociedad. (Mario melgar, 2021)

La IA se ha utilizado para predecir el clima, proporcionando información a los agricultores decidir cuándo sembrar, protegerlos de condiciones meteorológicas adversas, permite el seguimiento en tiempo real de los cultivos, detectando enfermedades y carencias de nutrientes. Asimismo, estas tecnologías ayudan a los agricultores a tomar acciones preventivas para obtener los mayores rendimientos y los más económicos, permite definir la cantidad de riego y fertilizante, así como el momento más oportuno para aplicarlo

El sector agrícola ha sufrido cambios con el desarrollo de las tecnologías de la Información y las comunicaciones que favorece la utilización de los términos como: sistemas de información para la toma de decisiones, modelación de cultivos, agricultura de precisión e inteligencia artificial. (hover, 2022)

Estas herramientas permiten que la agricultura sea más eficiente y eficaz. Entre las principales aplicaciones de la Inteligencia Artificial en este sector se encuentra el manejo general del cultivo como el riego, la fertilización, información del suelo y clima, rendimiento y sus componentes (gomez 2020)(Mario melgar, 2021)

La inteligencia artificial y su aplicación en el sector agrícola

La inteligencia artificial (IA) ha emergido como una tecnología disruptiva con aplicaciones en numerosos sectores, desde la salud [1], [2] y la educación hasta la industria y el transporte [3], [4], de esta forma se puede decir que está transformando la forma en que se abordan los desafíos globales [5](Cristian Andrés, 2024)

El aspecto más importante que define a la IA es la capacidad de procesar grandes volúmenes de datos e información, identificar patrones complejos y optimizar procesos; de forma similar a un comportamiento inteligente que abarca por lo general aspectos de razonamiento, el aprendizaje y la creatividad para predecir o planear; lo antes expuesto demuestra sus potencialidades ya que este sistema informático propicia simular características que son propias de la inteligencia humana como es la toma de decisiones.(María Pérez-Ugena, DOI: <https://doi.org/10.18543/ed7212024>), [5](Cristian Andrés, 2024)

El desarrollo tecnológico en los últimos años ha revolucionado el sector agrícola, se incrementan las innovaciones en la recolección de información que resultan de gran interés para comprender la condición de las áreas agrícolas y los cultivos. Estas herramientas proporcionan información detallada para optimizar el uso de productos fitosanitarios, fertilizantes, necesidad de riego, densidad de siembra momento ideal de cosecha, manejo de plagas. (Pérez et al. (2019).

La IA para la recopilación de datos requiere de máquinas, sensores, dispositivos de monitoreo o computadoras capaces de ejecutar tareas con alta precisión, esta tecnología puede ser utilizada para determinar qué cultivos plantar, su ubicación, el momento de siembra, rendimiento y sus componentes. Estas herramientas pueden facilitar la producción de cultivos más saludables con seguimiento en tiempo real, el control de plagas y con un seguimiento continuo del estado del suelo.

Uno de los aspectos más aplicados de la IA en la agricultura es el análisis predictivo, que contribuye a mantener una producción agrícola eficiente. Ejemplo de ellos lo constituyen las técnicas de reconocimiento de patrones, el estudio de las variaciones en las hojas de cultivos saludables y enfermas para determinar dónde aplicar herbicidas. Estos algoritmos también ayudan a identificar brotes de enfermedades que mediante el procesamiento y análisis de imágenes obtenida de los drones o satélites a través de fotos aéreas, las técnicas de IA pueden evaluar el estado de los cultivos, la presencia de malezas y elaborar mapas que identifican áreas con diferentes niveles de humedad, lo que facilita la optimización de la cantidad de riego necesaria para cada área (Rambauth, 2021).

La IA requiere de un gran volumen de información que también está presente en los modelos de simulación de cultivos o sistemas de Información para la Toma de Decisiones, los cuales proporcionan información valiosa a productores y decisores para optimizar recursos.

Definición de modelos de simulación de cultivos

Es de gran importancia el uso de modelos en la agricultura ya que como plantea Gormley y Sinclair (2003), en el desarrollo científico se han diseñado y aplicado durante siglos los modelos en diferentes disciplinas; aunque los vinculados a los procesos agrícolas y ambientales se han implementado en las últimas décadas. Lo antes mencionado evidencia que es más fácil trabajar con los modelos de simulación que con los sistemas reales, ya que estos últimos requieren de más recursos humanos y económicos.

Es una práctica habitual el uso de modelos de simulación, sustentada en la información en información científica disponible, para la planificación agrícola en diferentes procesos, estos modelos son útiles para proporcionar resultados en situaciones específicas y tomar alternativas tempranas por parte de los decisores.

Bernardino Candelaria Martínez, 2011 plantea que un modelo es una representación conceptual, numérica o gráfica de un objeto, sistema, proceso, actividad o pensamiento; se utilizan para analizar cada una de sus relaciones e interacciones, con base en su análisis, predecir posibles escenarios futuros, de igual forma considera que un modelo puede describirse como una representación simplificada de un sistema real y es en esencia, una descripción de entidades y la relación entre ellas

(Bernardino Candelaria Martínez, 2011).

De forma similar autores como Naivy, 2009, García, 2008, esbozan que Un modelo se describe como una representación simplificada de un sistema real y es en esencia, una descripción de relación entre ellas, para explicar mejor la realidad, cuando es difícil trabajar directamente en la realidad en sí.

Los modelos de simulación son un conjunto de ecuaciones matemáticas que representa procesos, variables y relaciones entre variables de un fenómeno del mundo real y que proporciona conjeturas aproximadas de su comportamiento con diferentes variaciones de sus variables. (**Bernardino Candelaria Martínez, 2011**)

Lo antes expuesto permite evidenciar que los modelos de simulación de cultivo, permiten ayudar a comprender mejor la interacción genética-fisiológica- ambiental, con una integración interdisciplinaria.

La agricultura es una actividad con múltiples implicaciones: sociales, biológicas, económicas, culturales, humanas, políticas y de mercado; por lo que obtener modelos que logren abarcarlas, representarlas y relacionarlas totalmente como sistema, es una tarea difícil de conseguir, pero con gran implicación para complementar los esfuerzos realizados en diferentes campos y lograr el desarrollo agrícola. Estos modelos de simulación de cultivos ofrecen grandes ventajas para los sistemas productivos como se muestran a continuación (Sinclair y Seligman (1996)) **Bernardino Candelaria Martínez, 2011** Florido

- Permite estudiar sistemas reales que no se pueden evaluar analíticamente. En la práctica, la mayoría de los sistemas reales se estudian mediante simulación. De hecho la simulación es la técnica de Investigación Operativa más utilizada.
- Hace posible estimar el comportamiento de un sistema existente si se modifican algunas de las condiciones de funcionamiento actuales. Además para probar si esos cambios producen mejoras, no es necesario interrumpir el funcionamiento del sistema real.
- Se pueden comparar distintas alternativas de diseño (o de formas de operar de un sistema), antes de construirlo, para ver cual se comporta mejor.
- Permite estudiar en poco tiempo la evolución de un sistema en un periodo largo de tiempo: se pueden evaluar años de experiencia en el sistema real en unos pocos minutos

de simulación. Alternativamente también permite lo contrario: estudiar los trabajos detallados de un sistema en un periodo de tiempo extendido.

- Los modelos permiten definir estrategias de producción en la etapa de planificación de un cultivo futuro o ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo tales como: prácticas culturales, fertilización, riego y el uso de plaguicidas
- Permiten evaluar diferentes planteos productivos, o analizar un factor manteniendo los otros constantes, por ejemplo la variación del rendimiento por efecto del clima sin modificar el manejo, el genotipo y el suelo.

Otros aspectos importantes a destacar de los modelos de simulación son los fenómenos meteorológicos como el ENOS (El Niño Oscilación del Sur) que analizan de forma interactiva el impacto de la variabilidad climática y las decisiones de manejo sobre la productividad de los cultivos

Los modelos de simulación de cultivos, al igual que cualquier herramienta empleada para procesar información resulta una actividad compleja y presenta limitaciones para su aplicación en los sistemas productivos. (Ortega et al., 1999) Florido

1. No produce resultados exactos, sino estimaciones. Esto hará necesario utilizar las técnicas estadísticas para saber, por ej., cuantas veces hay que ejecutar la simulación (número de muestras), para cada conjunto de datos de entrada y realizar estimaciones fiables de los parámetros de interés.
2. Desarrollar un modelo de simulación suele ser caro y lleva tiempo.
3. Es difícil demostrar la validez del modelo. Si el modelo no es válido, los resultados son poco útiles, ya que la información que estamos obteniendo del modelo de simulación no es representativa del sistema real que nos interesaba estudiar.

Diferentes de modelación de simulación de cultivos

En la actualidad se utilizan varios modelos de simulación de cultivos con propósitos deferentes, entre ellos se destacan los siguientes: AquaCrop (modelo de crecimiento de cultivos para mejorar la productividad hídrica, desarrollado por la FAO, CropSyst (Cropping Systems simulator), InfoCrop (modelo dinámico de rendimiento de cultivos desarrollado por la Universidad de Wageningen en Holanda) y WOFOST (WORLD FOOD STUDIES, desarrollado por la Universidad de Wageningen en Holanda), CropWat (Crop Water Productivity Model), DSSAT-CERES-Maize (Decision Support System for Agrotechnology Transfer-Crop Environment Resource Synthesis)

El modelo de simulación de cultivos CropSyst permite realizar simulaciones de cultivos durante varios años, simula el balance de N y agua en el suelo, fenología del cultivo, absorción de nitrógeno y agua; el crecimiento y desarrollo del área foliar, la producción de biomasa, el rendimiento final, así como la producción y descomposición de residuos de cultivo y la erosión del suelo.

Este modelo incorpora los efectos sobre estos procesos en dependencia de las variables climáticas, tipo de suelo y características del cultivo, de igual forma incluye variedad de opciones agronómicas de manejo (riego, fertilización, manejo de residuos, elección varietal y rotación), un aspecto importante de este modelo es la posibilidad de realizar análisis de impacto ambiental (erosión, lixiviación y cambio climático). (F. FERRER)

En la actualidad se ha incrementado el uso del modelo AquaCrop de la FAO, debido a que es un software de libre acceso, requiere una menor cantidad de detalles y especificaciones de las variables de entrada, por lo que es de gran utilidad donde no existe abundante acceso a datos de entrada de clima, suelo o del cultivo y que éstos sean de buena calidad y en cantidad suficiente para realizar las simulaciones.

El modelo CropWat de la FAO, es muy poco utilizado con fines de simulación del cambio climático, es más utilizado para estudios de riego, el consumo de agua del cultivo y su consecuente lámina de riego.

El modelo WOFOST (Universidad de Wageningen), tiene la ventaja de ser un programa abierto, de acceso libre, permite modificar el código fuente de su estructura, lo que facilita realizar ajustes para condiciones particulares por parte del usuario.

El Sistema de Apoyo para Decisiones de Transferencia de Agrotecnología (DSSAT) desarrollado en Universidades de Georgia y Florida, es una plataforma que incluye 42 modelos y se ha aplicado para simular los efectos que tienen en el rendimiento diferentes condiciones de manejo: fechas de siembra ([Tofa et al. 2020](#) y [Shen et al. 2020](#)), niveles de riego, fertilización nitrogenada ([Marek et al. 2017](#) y [Abedinpour y Sarangi 2018](#)) y densidad de siembra ([Ren et al. 2020](#)). En la literatura consultada al respecto se destaca el potencial de DSSAT para estimar el crecimiento y rendimiento de cultivos en diferentes condiciones ambientales y de manejo.

El modelo DSSAT requiere ser calibrado y validado para poder realizar simulaciones de la respuesta del cultivo a diferentes factores. En la calibración, los parámetros en la base de datos del modelo se ajustan: (i) mediante varios escenarios de simulación hasta obtener un ajuste aceptable entre valores simulados y observados en experimentos de campo, y también (ii) a partir de datos experimentales de la literatura para la región en la que se validará.

La validación del modelo es el procedimiento mediante el cual se mide el desempeño del modelo, contrastando los valores simulados de una determinada variable con datos reales obtenidos en experimentos de campo. El objetivo principal al evaluar el desempeño de un modelo de simulación de cultivos es valorar su utilidad práctica como herramienta de investigación o apoyo en la toma de decisiones acerca del manejo y planificación a nivel de áreas o nacional ([Soto-Bravo y González-Lutz 2019](#)).

La modelación posibilita investigar las consecuencias de posibles escenarios futuros y permite prepararse para los cambios antes de que ocurran. La influencia del cambio climático en la agricultura representa un reto para decidir las políticas a partir de modelos cuantitativos, que consideran la agricultura en su contexto específico ([Hernández et al. 2017](#) y [Tian et al. 2020](#)).

Conclusiones

Las aplicaciones de Inteligencia Artificial en la agricultura están avanzando rápidamente, lo que le propicia a los agricultores hacer un uso más eficiente y sostenible de todos los recursos.

La IA permite a los agricultores tener información de cultivos y maquinaria en tiempo real para facilitar la toma de decisiones, lo cual ayuda a la sostenibilidad.

El avance de los sistemas de información en la agricultura, unido al desarrollo de la computación, ha permitido un desarrollo acelerado de la modelación de cultivos agrícolas. Estos constituyen una herramienta útil para poder predecir el comportamiento de los cultivos en condiciones específicas; integrando conocimientos de fisiología, ciencias del suelo y datos meteorológicos. Además, permiten el desarrollo de una agricultura eficiente.

Osmel

Los modelos de simulación de cultivos basados en procesos fisiológicos se han desarrollado para evaluar el impacto del cambio climático en la producción de alimentos y la adaptación al clima, así como para desarrollar estrategias en el marco de trabajo agrícola ([Tatsumi 2016](#)). Estos modelos representan, de manera sencilla y sintética, los procesos fisiológicos y ecológicos más importantes que gobiernan el crecimiento mediante la utilización de ecuaciones matemáticas ([Guevara 2007](#), [Gouache et al. 2015](#), [Dias et al. 2016](#) y [Rodríguez et al. 2018](#)).

Jone

Antes del desarrollo del DSSAT, existían modelos de cultivos, pero estos se utilizaban principalmente en los laboratorios donde se creaban. Por ejemplo, los modelos de cultivos originales implementados en el DSSAT —los modelos CERES para maíz (Jones y Kiniry, 1986) y trigo (Ritchie y Otter, 1985), así como los modelos SOYGRO para soja (Wilkerson et al., 1983) y PNUTGRO para cacahuete (Boote et al., 1986)— ya estaban cosechando éxitos iniciales. Estos modelos requerían diferentes estructuras de archivos y datos, y tenían distintos modos de operación. Dado que el proyecto IBSNAT tenía como objetivo proporcionar un marco para el análisis de sistemas de cultivo, estos modelos de cultivos tuvieron que revisarse para que fueran compatibles en cuanto a la entrada de datos y los modos de aplicación. La decisión de compatibilizar estos modelos condujo al diseño del DSSAT y al desarrollo de modelos compatibles para cultivos adicionales, como la papa, el arroz, el frijol seco, el girasol y la caña de azúcar (Hoogenboom et al., 1994a, Jones et al., 1998, Hoogenboom et al., 1999). En el DSSAT v3.5, la versión más reciente al momento de redactarse este artículo, se incluyen modelos para 16 cultivos diferentes y una simulación de barbecho desnudo.

•

Revista Europea de Agronomía

[Volumen 18, números 3 y 4](#), enero de 2003, páginas 235-265

El modelo del sistema de cultivo DSSAT

Los enlaces del autor abren el panel superpuesto [JW Jones^a](#)

, [G Hoogenboom^b](#), [C.H Porter^a](#), [K.J Boote^a](#), [W.D Batchelor^c](#), [L.A Hunt^d](#), P. W. Wilkens^y, [U Singh^y](#), AJ Gijssman^a, [JT Ritchie^f](#)

Mostrar másAñadir a Mendeley

Compartir

Citar

[https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

[Obtener derechos y contenido](#)

Abstracto

El sistema de soporte de decisiones para la transferencia [de agrotecnología](#) (DSSAT) ha sido utilizado durante los últimos 15 años por investigadores de todo el mundo. Este paquete incorpora modelos de 16 cultivos diferentes con software que facilita su evaluación y aplicación para diversos fines. En los últimos años, el mantenimiento de los modelos DSSAT se ha vuelto cada vez más difícil, en parte debido a la existencia de diferentes conjuntos de código informático para cada cultivo y a la escasa atención al diseño del software a nivel de los propios modelos. Por ello, los modelos DSSAT se han rediseñado y programado para facilitar la incorporación de nuevos avances científicos, aplicaciones, documentación y mantenimiento. El diseño del nuevo modelo de sistema de cultivo DSSAT (CSM) se basa en una estructura modular en la que los componentes se separan según las disciplinas científicas y están estructurados para facilitar la sustitución o adición de módulos. Incluye un módulo de Suelo, un módulo de Plantilla de Cultivo que permite simular diferentes cultivos mediante la definición de archivos de entrada de especies, una interfaz para agregar modelos de cultivo individuales si comparten el mismo diseño e interfaz, un módulo de Clima y un módulo para gestionar la competencia por la luz y el agua entre el suelo, las plantas y la atmósfera. También está diseñado para su incorporación en diversos paquetes de aplicaciones, desde aquellos que ayudan a los investigadores a adaptar y probar el CSM hasta aquellos que operan el DSSAT–CSM para simular la producción a lo largo del tiempo y el espacio con diferentes propósitos. En este documento, describimos este nuevo diseño del DSSAT–CSM, así como los enfoques utilizados para modelar los componentes científicos primarios (suelo, cultivo, clima y gestión). Además, el documento describe los requisitos de datos y los métodos utilizados para la evaluación del modelo. Ofrecemos una visión general de los cientos de estudios publicados en los que se han utilizado los modelos de cultivos DSSAT para diversas aplicaciones. Los beneficios del nuevo DSSAT–CSM rediseñado brindarán oportunidades considerables a sus desarrolladores y a otros miembros de la comunidad científica para una mayor cooperación en la investigación interdisciplinaria y en la aplicación del conocimiento para resolver problemas en el campo, la explotación agrícola y a niveles superiores.

Introducción

Las necesidades de información para la toma de decisiones agrícolas a todos los niveles están aumentando rápidamente debido a la mayor demanda de productos agrícolas y a las mayores presiones sobre la tierra, el agua y otros recursos naturales. La generación de nuevos datos mediante métodos tradicionales de investigación agronómica y su publicación no son suficientes para satisfacer estas crecientes necesidades. Los experimentos agronómicos tradicionales se

llevan a cabo en puntos específicos en el tiempo y el espacio, lo que hace que los resultados sean específicos del sitio y la temporada, que consuman mucho tiempo y sean costosos. A menos que los nuevos datos y hallazgos de investigación se presenten en formatos que sean relevantes y de fácil acceso, es posible que no se utilicen eficazmente. El sistema de soporte de decisiones para la transferencia de agrotecnología (DSSAT) fue desarrollado originalmente por una red internacional de científicos, que cooperaban en el proyecto de la Red Internacional de Sitios de Referencia para la Transferencia de Agrotecnología (IBSNAT, 1993, Tsuji, 1998, Uehara, 1998, Jones et al., 1998), para facilitar la aplicación de modelos de cultivos en un enfoque de sistemas para la investigación agronómica. Su desarrollo inicial estuvo motivado por la necesidad de integrar el conocimiento sobre el suelo, el clima, los cultivos y la gestión para tomar mejores decisiones sobre la transferencia de tecnología de producción de un lugar a otros con suelos y climas diferentes (IBSNAT, 1993, Uehara y Tsuji, 1998). El enfoque de sistemas proporcionó un marco en el que se lleva a cabo la investigación para *comprender* cómo funcionan el sistema y sus componentes. Esta comprensión se integra posteriormente en modelos que permiten *predecir* el comportamiento del sistema en condiciones dadas. Una vez que se está seguro de que los modelos simulan adecuadamente el mundo real, se pueden realizar experimentos informáticos cientos o incluso miles de veces en entornos determinados para determinar la mejor manera de *gestionar* o *controlar* el sistema. DSSAT se desarrolló para operacionalizar este enfoque y ponerlo a disposición de aplicaciones globales. El DSSAT ayuda a los tomadores de decisiones al reducir el tiempo y los recursos humanos necesarios para analizar decisiones alternativas complejas (Tsuji et al., 1998). También proporciona un marco para la cooperación científica a través de la investigación para integrar nuevos conocimientos y aplicarlos a las preguntas de investigación.

Antes del desarrollo del DSSAT, existían modelos de cultivos, pero estos se utilizaban principalmente en los laboratorios donde se creaban. Por ejemplo, los modelos de cultivos originales implementados en el DSSAT —los modelos CERES para maíz (Jones y Kiniry, 1986) y trigo (Ritchie y Otter, 1985), así como los modelos SOYGRO para soja (Wilkinson et al., 1983) y PNUTGRO para cacahuete (Boote et al., 1986)— ya estaban cosechando éxitos iniciales. Estos modelos requerían diferentes estructuras de archivos y datos, y tenían distintos modos de operación. Dado que el proyecto IBSNAT tenía como objetivo proporcionar un marco para el análisis de sistemas de cultivo, estos modelos de cultivos tuvieron que revisarse para que fueran compatibles en cuanto a la entrada de datos y los modos de aplicación. La decisión de compatibilizar estos modelos condujo al diseño del DSSAT y al desarrollo de modelos compatibles para cultivos adicionales, como la papa, el arroz, el frijol seco, el girasol y la caña de azúcar (Hoogenboom et al., 1994a, Jones et al., 1998, Hoogenboom et al., 1999). En el DSSAT v3.5, la versión más reciente al momento de redactarse este artículo, se incluyen modelos para 16 cultivos diferentes y una simulación de barbecho desnudo.

El DSSAT es un conjunto de programas independientes que operan en conjunto; los modelos de simulación de cultivos son su núcleo (Fig. 1). Las bases de datos describen el clima, el suelo, las condiciones y mediciones experimentales, así como información sobre el genotipo para aplicar los modelos a diferentes situaciones. El software ayuda a los usuarios a preparar estas bases de datos y a comparar los resultados simulados con las observaciones para que confíen en los modelos o determinen si es necesario realizar modificaciones para mejorar su precisión (Uehara, 1989, Jones et al., 1998). Además, los programas incluidos en el DSSAT permiten a los usuarios simular

opciones de manejo de cultivos a lo largo de varios años para evaluar los riesgos asociados a cada opción. El DSSAT se publicó por primera vez (v2.1) en 1989; se publicaron versiones adicionales en 1994 (v3.0) (Tsuji et al., 1994) y 1998 (v3.5) (Hoogenboom et al., 1999).

El DSSAT se encuentra actualmente en proceso de revisión importante, no en su objetivo, sino en su diseño. Una de las principales razones de este rediseño es que cada modelo de cultivo individual en el DSSAT v3.5 contaba con sus propios componentes de modelo de suelo. Si bien la simulación de rotaciones de cultivos era posible en esa versión, el enfoque empleado presentaba numerosos problemas de programación, compatibilidad de los modelos de suelo y posibles errores en diferentes conjuntos de código. La base de las revisiones del DSSAT es un nuevo modelo de sistema de cultivo (DSSAT–CSM), que integra todos los cultivos como módulos utilizando un único modelo de suelo. Esto se logró mediante el rediseño completo de los modelos de cultivo, comenzando con CROPGRO, utilizando una estructura modular (Jones et al., 2001). Este diseño se basó principalmente en las características modulares de APSIM (McCown et al., 1996), pero utiliza el enfoque desarrollado por van Kraalingen (1990, 1991, 1995 y 2003) en el software FSE/FST para programar el comportamiento de cada módulo. El nuevo CSM ahora contiene modelos de 16 cultivos derivados de los antiguos modelos DSSAT CROPGRO y CERES (maíz, trigo, soja, cacahuete, arroz, patata, tomate, frijol seco, sorgo, mijo, pasto, garbanzo, caupí, frijol terciopelo, pasto brachiaria y haba).

Los objetivos del DSSAT-CSM son (1) simular sistemas de producción de monocultivos considerando el clima, la genética, el agua, el carbono y el nitrógeno del suelo, y la gestión en una o varias temporadas y en rotaciones de cultivos en cualquier ubicación donde se proporcionen insumos mínimos; (2) proporcionar una plataforma para incorporar fácilmente módulos para otros factores abióticos y bióticos, como el fósforo del suelo y las enfermedades de las plantas; (3) proporcionar una plataforma que permita comparar fácilmente módulos alternativos para componentes específicos a fin de facilitar la mejora, la evolución y la documentación del modelo; y (4) proporcionar una capacidad para introducir fácilmente el CSM en programas de aplicación adicionales de forma modular y bien documentada. El propósito de este documento es describir el DSSAT-CSM, su diseño, los requisitos de datos, la evaluación y las aplicaciones.

Ejemplo de modelos de simulación de cultivos

Una herramienta más integradora es el paquete denominado Sistema de Apoyo para Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT), que agrupa modelos de simulación de clima, suelo, agua y nutrientes, y permite simular el desarrollo de 16

cultivos en cualquier región, el efecto de su rotación a largo plazo y diferentes sistemas de manejo de los cultivos. Presenta cuatro niveles de simulación. En el primero, se asume que la disponibilidad de radiación, temperatura y el potencial genético son los limitantes del desarrollo del cultivo; el agua y los nutrientes no limitan, es una estimación del rendimiento potencial. El segundo considera que el desarrollo del cultivo es limitado por la disponibilidad del agua, pero la disponibilidad de nutrientes no es limitante. En el tercero, la disponibilidad de nitrógeno representa una posible limitación. En el cuarto nivel se considera a la disponibilidad de fósforo, además de las restricciones de los niveles anteriores (Bowen y Jaramillo, 2001). Posee una herramienta de procesamiento de datos climáticos y con modelos específicos para cada tipo de cultivo, los cuales son de fácil adquisición e interpretación, aunque requiere grandes cantidades de información de suelos tienen la capacidad de contar con una base de datos para estimar los datos faltantes. Por su parte Giraldo et al., 2007 mencionan que el DSSAT es capaz de organizar y archivar bases de datos sobre clima, suelos, cultivos, experimentos y precios, simular producciones de cultivos en una o varias épocas en secuencia, también permite analizar resultados y representar simulaciones de manera grafica; así como evaluar diferentes practicas de manejo especificas a una explotación o parte de ella

Desventajas de la Modelación de Cultivos

¿Pero qué ha posibilitado este cambio sustancial en el desarrollo de la IA? El auge actual de esa tecnología avanzada de procesamiento de datos es el resultado de diversos factores. En primer lugar, se debe a la informatización de la sociedad, lo que ha permitido la generación y almacenamiento masivo de información de diversa procedencia y tipo en prácticamente todos los campos de actividad humana. Por otro lado, el desarrollo de la infraestructura informática, que posibilita la generación, captura, almacenamiento y procesamiento de esta información, así como la implementación de sistemas de análisis de información y algoritmos de alta complejidad. Finalmente, el avance de nuevos y potentes métodos en el campo de la IA, que han mejorado considerablemente su eficiencia y eficacia

El término “Inteligencia Artificial” (IA) fue acuñado por el científico estadounidense John McCarthy en la década de 1950 (Moor, 2006). Durante muchos años, esta disciplina de la informática estuvo principalmente relacionada con la comunidad científica y la ciencia ficción. Sin embargo, en tiempos recientes, se ha vuelto tan popular que prácticamente cualquier persona puede estar familiarizada con el término y discutirlo. En la actualidad, los artículos sobre IA no se limitan a revistas y sitios científicos. Periódicos, revistas, portales web, blogs y otros medios de comunicación populares publican sistemáticamente artículos y noticias sobre esta disciplina

Más recientemente, una comisión de la Unión Europea presentó una definición, en la cual la IA se asocia a sistemas de software —y posiblemente también de hardware— diseñados por humanos que, frente a objetivos complejos, operan en el ámbito físico o digital. Estos sistemas son capaces de percibir Rafael E. Bello Pérez y María M. García Lorenzo 18 su entorno mediante la adquisición e interpretación de datos estructurados o no estructurados, razonar sobre el conocimiento, procesar información derivada de estos datos y tomar decisiones para lograr el objetivo especificado (High-Level Expert Group on Artificial Intelligence, 2018)

Capítulo 1. Elementos básicos y aplicaciones de la inteligencia artificial 25 Como se aborda en la investigación de Fouquet (2021), es esencial contar con métodos efectivos para identificar, gestionar y detectar enfermedades en la agricultura con el fin de garantizar una producción sostenible y productiva. Tradicionalmente, el diagnóstico de enfermedades se ha realizado mediante inspección visual, un proceso que es tanto laborioso como subjetivo. Con el propósito de automatizar este procedimiento, se ha trabajado en el desarrollo de técnicas de visión artificial respaldadas por IA. Ese enfoque implica la detección de enfermedades utilizando imágenes y la identificación de características distintivas en estas. No obstante, en este tipo de aplicaciones, se ha observado que se requiere una cantidad significativa de ejemplos, tanto positivos como negativos, para crear un clasificador de reconocimiento de hojas eficaz. Sin embargo, la necesidad de un conjunto de datos extenso puede dificultar la aplicación de esas técnicas en la identificación y el conteo de plagas en otros tipos de cultivos. De acuerdo con el Instituto Tecnológico de Santo Domingo, INTEC (2023), la agricultura y la ganadería de precisión, respaldadas por la IA, son tendencias líderes en innovación en el sector agroalimentario a nivel global. Se ha observado un

aumento del 30 % en la inversión en este campo durante el año 2023. Además, la financiación de nuevas empresas o startups en el ámbito de las tecnologías agroalimentarias experimentó un crecimiento del 45 % en 2021 en comparación con el año anterior. En Agronet (2021, 16 de noviembre) se muestra que, la combinación de la IoT y la IA ha posibilitado la creación de una aplicación destinada a mejorar la productividad en la agricultura, aumentar la eficiencia durante la cosecha, rastrear el origen de los productos alimentarios y reducir el consumo de combustible de las máquinas, idea que en alguna medida fue referida antes por Montoya et al. (2017). Rafael E. Bello Pérez y María M. García Lorenzo 26 Esa herramienta de vanguardia tiene como objetivos la optimización de los rendimientos agrícolas, la eficiencia en la cosecha, la trazabilidad de los productos alimentarios y la reducción del consumo de combustible de las máquinas agrícolas. Igualmente proporciona información detallada sobre diversos indicadores, como la humedad de los cultivos, el rendimiento por metro cuadrado y la calidad del grano en términos de valor nutricional; incorpora funciones de seguridad, alertando al conductor cuando una persona se acerca al vehículo. Una vez que la cosechadora inicia su trabajo, la IA toma el control. Un modelo algorítmico —entrenado con miles de imágenes de granos que se etiquetaron manualmente desde el inicio del proceso de aprendizaje supervisado— cuenta los granos que quedan en el suelo a partir de una foto tomada desde la parte trasera del vehículo. El conductor tiene la opción de aceptar o rechazar los resultados, que también se utilizan para mejorar el modelo de IA. La aplicación rastrea las ubicaciones en el campo mediante geolocalización de los vehículos y modelización espacial, lo que mejora significativamente la trazabilidad de los productos alimentarios. Además, proporciona recomendaciones al conductor, como ajustes de velocidad o configuraciones de la cosechadora, basadas en datos en tiempo real. En la literatura especializada se refiere la integración de la IA y la IoT, resaltándose los notables avances de su uso con el objetivo de mejorar diversos aspectos de la agricultura (Ramón, 2020; Segovia et al. , 2021; Zha, 2020). Se destaca el papel crucial que han tenido los sensores en esta área en los últimos años; estos se utilizan en todo tipo de equipos, coches, máquinas, etc. También, a nivel climatológico, con estaciones meteorológicas situadas en puntos clave de las explotaciones, y para indicar tanto la humedad como otros factores claves en la fertilidad del suelo

Los sensores se han empleado para optimizar la conducción de tractores, herramientas agrícolas y equipos utilizados en aplicaciones específicas. Ellos permiten un control más preciso y eficiente de las operaciones agrícolas, lo que se traduce en un uso más efectivo de los recursos y una mayor productividad. Asimismo, se utilizan en aplicaciones relacionadas con la climatología. Se han instalado estaciones meteorológicas en ubicaciones estratégicas dentro de las explotaciones agrícolas, junto con sensores de suelo que monitorean la humedad y otros factores decisivos para evaluar la fertilidad del suelo. Estos datos son esenciales para tomar decisiones informadas sobre la gestión agrícola, como la programación de riego y la aplicación de fertilizantes de manera más precisa. A la aplicación de la IA en la agricultura se le reconocen tanto ventajas como desventajas. Entre las primeras, se ubican las siguientes:

- **Datos Mejorados:** Permite la recopilación y análisis de datos detallados, lo que proporciona a los agricultores una base sólida para tomar decisiones informadas en situaciones específicas. Cuanta más información esté disponible, mayor control y capacidad de toma de decisiones tendrán.
- **Sostenibilidad Ambiental y Económica:** Permite ajustar las dosis de siembra, riego y productos fitosanitarios, lo que conduce a un uso más eficiente de estos insumos. Además, no solo tiene un impacto económico positivo en las explotaciones agrícolas, sino que también reduce el impacto ambiental al minimizar el uso

excesivo de recursos. • Seguridad Alimentaria: La aplicación de la IA a lo largo de todos los procesos agrícolas, desde la siembra hasta la post cosecha, permite un control exhaustivo de la trazabilidad de los cultivos y su seguridad alimentaria, garantizando la calidad de los productos. Mientras que las desventajas, se centran en los siguientes aspectos: • Costo Económico: La implementación de la IA en la agricultura puede ser costosa, y en algunos casos, los costos pueden superar los beneficios económicos que genera, lo cual puede tener un impacto negativo en las finanzas de las empresas agrícolas. • Mantenimiento Tecnológico: Los sistemas de IA requieren un mantenimiento regular, y en el caso de la agricultura, están expuestos a condiciones climáticas adversas. Eso significa que necesitan una atención y mantenimiento constantes, lo que puede resultar costoso y requerir recursos adicionales. • Requisito de Formación: El uso efectivo de la IA en la agricultura requiere que los agricultores adquieran conocimientos básicos de tecnología, condición que puede representar un desafío para aquellos que no están familiarizados con estas herramientas y tecnologías.

la aplicación de la IA en la agricultura se refiere a todas las habilidades que una máquina, sensor, dispositivo de monitoreo o computadora poseen para ejecutar tareas con una precisión excepcional, al recopilar datos específicos que permiten mejorar y optimizar diversas actividades agrícolas y cultivos. Se trata de una herramienta innovadora que se está implementando en beneficio de agricultores de todo el mundo, especialmente aquellos que se dedican a la agricultura de precisión. Ese enfoque utiliza diversas tecnologías en el campo con el propósito de recopilar la información esencial para que los agricultores puedan tomar decisiones anticipadas. Esta tecnología, a menudo referida como “4.0”, puede ser especialmente útil para determinar qué cultivos plantar, su ubicación, el momento adecuado y, en algunos casos, incluso predecir el volumen de la cosecha. Dado que la agricultura es una industria con una larga historia, es crucial adoptar un enfoque más inteligente y eficiente para satisfacer las crecientes demandas. La aplicación de tecnologías de inteligencia artificial (IA) ofrece la oportunidad de mejorar una amplia variedad de tareas relacionadas con la agricultura, como la producción de cultivos más saludables con seguimiento en tiempo real, el control de plagas y la supervisión continua del estado del suelo (Observatorio para la Innovación Silvoagropecuaria y la Cadena Agroalimentaria, 2023). La industria agrícola ha adoptado la automatización y la precisión como parte fundamental de sus prácticas para lograr una producción más eficiente. La incorporación de tecnologías como la orientación y la detección, así como el análisis de datos, ha llevado a la agricultura basada en datos. Estas tecnologías se aplican en todas las etapas del ciclo agrícola; abarcan desde la gestión de datos hasta la cartografía de cultivos, la cosecha y la planificación, entre otras áreas. Esto ha permitido la predicción y la respuesta rápida a situaciones aparentemente impredecibles en la agricultura.