



<https://eqrcode.co/a/NLT0Tn>

REVISIÓN

ARTÍCULO ORIGINAL

Control de maleza mediante la robótica

Weed control through robotics

Lic. Juan Espinoza-Hernández, Lic. Carlos Juárez-González, Lic. Canek Mota-Delfín,
Dr. Eugenio Romantchik-Kriuchkova*

Universidad Autónoma Chapingo, Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Mecanización Agrícola,
Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

RESUMEN. Las malezas representan pérdidas potenciales en el rendimiento de los cultivos, se han logrado avances significativos en el desarrollo de sistemas robóticos para el control de malas hierbas y métodos de detección basados en inteligencia artificial. Por ello, en este trabajo se realizó una revisión de bibliografía de los distintos métodos desarrollados y aplicados en sistemas robóticos para la eliminación de malezas, que se dividen en cuatro principios de funcionamiento general; mecánico, químico, térmico y eléctrico, así como una descripción de sus ventajas, inconvenientes y requerimientos para un buen funcionamiento. Entender el panorama de la investigación actual es importante para el futuro desarrollo de nuevas tecnologías. El uso de la visión por computadora ha permitido el desarrollo de herramientas selectivas y la detección de malezas en ambientes complejos. Los sistemas de guiado con GPS o sensores pueden dar autonomía a robots desmalezadores, los cuales con la incorporación de la inteligencia artificial y en especial el aprendizaje profundo, podrían hacerse más robustos y adaptables a diversos cultivos y terrenos a campo abierto, mejorando así el control de malezas.

Palabras clave: detección, cultivo, inteligencia artificial, GPS, sensores.

ABSTRACT. Weeds represent potential losses in crop yields, significant advances have been made in the development of robotic systems for weed control and detection methods based on artificial intelligence. For this reason, in this work a bibliography review was made of the methods developed and applied in robotic systems for weed removal, which are divided into four principles of general operation: mechanical, chemical, thermal and electrical, as well as a description of their advantages, inconveniences and requirements for proper operation. Understanding the current research landscape is important for the future development of new technologies. The use of computer vision has allowed the development of selective tools and the detection of weeds in complex environments. Guidance systems with GPS or sensors can give autonomy to weeding robots, which with the incorporation of artificial intelligence and especially deep learning, could become more robust and adaptable to various crops and open fields, thus improving control weed.

Keywords: Detection, Farming, Artificial Intelligence, GPS, Sensors

INTRODUCCIÓN

El control de malezas en los cultivos agrícolas es importante debido a la competencia con las plantas de interés, por agua, nutrientes, luz solar y espacio (Slaughter *et al.*, 2008; Pino, 2013; Arakeri *et al.*, 2017). Se han estimado pérdidas potenciales de rendimiento en los cultivos con maleza en un 43% a escala mundial (Oerke, 2006). Las operaciones manuales de deshierbe por ejemplo en cultivos de lechugas orgánicas representan aproximadamente el 95% de los costos totales de control de malezas y alrededor del 50 y 60% en cultivos tradicionales de

brócoli y lechuga (Pérez *et al.*, 2014).

Las prácticas automatizadas de control de malezas son parte de la Agricultura de Precisión, la cual tiene como objetivo administrar las granjas agrícolas al tiempo que reduce el costo, el tiempo y el uso de recursos (Irrías y Castro, 2019). Minimizar la cantidad de herbicidas utilizados empleando tecnología para realizar el control de malezas en la Agricultura de Precisión tiene un enfoque más sostenible (Gomes y Leta, 2012). Estos sistemas ofrecen un control a nivel de planta, requiriendo de un

*Autor para correspondencia: Eugenio Romantchik-Kriuchkova, e-mail: eugenio.romantchik@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3184-4938>

Recibido: 26/01/2021.

Aprobado: 23/07/2021.

sistema que discrimina entre la planta del cultivo y la maleza, etiquetándolas para poder actuar (Milioto *et al.*, 2018).

Es entonces que entra el control robótico de malezas, el cual depende principalmente de los sistemas de navegación, detección y actuación (Rajaa *et al.*, 2019). Este control robotizado tiene como objetivo detectar las malezas y eliminarlas, utilizando diferentes métodos, mejorando la calidad del cultivo, aumentando el rendimiento, preservando nutrientes del suelo y reduciendo el costo de la aplicación de herbicidas (Sohail *et al.*, 2021).

Algunos agricultores a gran escala han adoptado tecnologías modernas para controlar las malezas, ya que las técnicas más antiguas consumen una gran cantidad de tiempo y requieren costos laborales más altos (Bakhshpour *et al.*, 2017).

Las investigaciones en la robótica, así como en la industria comercial, han trabajado arduamente en la parte agrícola enfrentando el problema de la presencia de las malas hierbas. Es por ello que en la actualidad se encuentran disponibles algunos robots que atacan y dan solución a esta problemática, realizando el deshierbe de manera mecánica como los robots de Naïo Technologies, realizando fumigaciones de precisión para reducir lo más que se pueda el uso de productos químicos (Ecorobotix, 2019), aplicando vapor para inhabilitar la semilla de la maleza antes de que germine según (PotatoPro, 2018) o la destrucción de la maleza mediante la aplicación de un rayo láser (Gbot.AG, 2020).

El objetivo de esta investigación es recopilar los principios de funcionamiento de los sistemas robóticos para el control de malezas y los principales robots que se han o están desarrollando actualmente para reducir o evitar el uso excesivo de productos químicos en la eliminación de malezas en los cultivos.

DESARROLLO DEL TEMA

Sistemas de guiado en robots móviles agrícolas

Se han desarrollado múltiples sistemas robóticos con diferentes aplicaciones. Dependiendo de la necesidad a satisfacer de diferentes funciones en la agricultura los diseños robóticos tienen que cumplir el requerimiento de movilidad en ambientes altamente complejos lo que implica tener en cuenta las cuatro siguientes operaciones (Vougioukas, 2019).

1. Cálculo del diseño espacial para el establecimiento de filas en los cultivos.
2. Planificación de rutas de vehículos
3. Planificación del movimiento del vehículo
4. Orientación automática del vehículo (detección, percepción y control para ejecutar un plan de movimiento).

Lo anterior con el objetivo de poder navegar en un cultivo y así realizar diferentes operaciones agrícolas como, pulverización, fertilización y por su puesto eliminación de malezas (Jiang *et al.*, 2010). Para poder realizar la navegación de los vehículos es necesario que estos se encuentren equipados con una serie de sensores y que estos sirvan como fuentes de información para apoyar a la toma de decisiones y operaciones, activación de actuadores, ejecución de tareas y evaluación del rendimiento del robot. Estos sensores se pueden dividir en categorías según los datos generados (Bechar y Vigneault, 2016; Kushwaha *et al.*, 2016).

1. Medición de movimientos (Contadores (técnicas de odome-

tria), laser/radar, radar de onda milimétrica).

2. Detección de características locales (Sonar, Cámaras digitales).
3. Posicionamiento absoluto (Global Positioning System (GPS), Real-time kinematic positioning (RTK), Differential Global Positioning System (DGPS), balizas activas).
4. Medición de parámetros relacionados al medio ambiente (sensores: Espectroscopia infrarroja cercana (NIR), Sensor infrarrojo (IR), Rayos X, fluorescencia, visión acústica, óptica (2 – D y 3 – D), entre otros).

Para lograr operaciones de control de maleza de manera autónoma utilizando robots es necesario que estos sean guiados con precisión dentro del cultivo, específicamente a través de las filas del cultivo, así mismo deben ser capaces de identificar el fin de una fila, poder girar para hacer cambio de fila según Kanagasingham *et al.* (2020) y contar con un sistema que permita la discriminación de la maleza de las plantas para su eliminación.

Hasta el momento la navegación GPS de alta precisión es más común en los sistemas de navegación de robots en campo abierto, sin embargo, estos sistemas siguen siendo caros y además de requerir un mapa preciso de las ubicaciones de las filas de los cultivos, esto lleva a que la dirección de las investigaciones en este campo tienda a desarrollar sistemas utilizando sensores locales, como lo son los sensores ópticos y/o sistemas laser/radar (English *et al.*, 2015).

Como ejemplo, Kanagasingham *et al.* (2020) en su trabajo proponen un sistema de guiado para que un robot autónomo permita la eliminación de maleza en un campo de arroz, este sistema está guiado por GPS-RTK y enrutamiento en base a una brújula para que el robot pueda girar, entrar en una nueva fila en las cabeceras del cultivo y además cuenta con un sistema de compensación por visión artificial para que este navegue con precisión dentro de las filas. Es de mencionar que el sistema propuesto es altamente preciso mientras el cultivo presente baja densidad de maleza y las condiciones climáticas sean óptimas en cuanto a nubosidad y humedad para el sistema GPS.

Detección de malezas

La detección (ubicación y clasificación) del cultivo, malezas o ambos, es de imperiosa necesidad para la eliminación y control de la maleza de manera precisa, ya que esto permite el movimiento de los actuadores. Diversos trabajos de investigación se enfocan en esta tarea, los cuales se basan en la visión artificial Rasti *et al.* (2019); Jiménez *et al.* (2020); Osorio *et al.* (2020), en dichos trabajos, el empleo de sensores que trabajan en el rango multiespectral o en el espectro visible son altamente empleados, obteniendo resultados más prometedores al usar sensores multiespectrales por la información que estos pueden proporcionar.

El procesamiento de la información para la detección y clasificación de objetos (maleza en este caso) en ambientes altamente complejos como lo es un cultivo sigue siendo un reto debido a problemas de oclusión, similitud en color y textura entre el cultivo – maleza, condiciones de iluminación y diferentes especies de malezas, Hasan *et al.* (2021) por lo anterior se han empleado diversas técnicas como la morfología matemática, en la cual se emplean cálculos de diferentes índices (Exceso de verde (ExG), Exceso de rojo (ExR), Diferencia del exceso de verde con el exceso de rojo (ExGR), Índice de vegetación de

diferencia normalizada (NDVI) en combinación de algoritmos para umbralización Liu *et al.* (2020), la técnica más prometedora debido a la robustez de los algoritmos es el empleo de redes neuronales artificiales (Hasan *et al.*, 2021).

El empleo de sistemas de visión por computadora en robots móviles para la eliminación de maleza es el más empleado, aunque se ha reportado el uso de robots que carecen de este sistema y en su lugar emplean un sistema GPS con RTK para la siembra precisa de cada planta de interés guardando su ubicación, por lo tanto, todo fuera de esa ubicación se considera maleza en el cultivo, tal es el caso del robot Farmdroid (2020).

Métodos usados para la eliminación de malezas

La mayoría de las máquinas usadas convencionalmente para eliminación de malezas contienen mecanismos que se basan en métodos mecánicos y químicos adecuados para el control de las malezas. Sin embargo, existen otros métodos como el térmico y el eléctrico que se encuentran en desarrollo para su automatización. Las prácticas convencionales con métodos químicos y mecánicos, por ejemplo, pueden ser menos adaptables a los cultivos porque a menudo se usan en máquinas grandes, como pulverizadores de brazo grande (Steward *et al.*, 2019).

Los robots se pueden adaptar más a los cultivos, pero la selección del mecanismo apropiado para eliminar la maleza debe ser de consideración principal para su construcción, junto con la facilidad de movimiento del robot dentro del campo y la detección autónoma de la maleza. Estas son las tres consideraciones principales de diseño de robots desmalezadoras de la última década (Pandey *et al.*, 2020).

A continuación, se presentan algunos de los principales métodos de control de malezas basados en los métodos mecánico, químico, térmico y eléctrico.

Método mecánico. Los métodos mecánicos para eliminación de malezas surgieron desde la década de 1960 cuando se comercializaron varios sistemas automáticos de aclareo de cultivos (Slaughter *et al.*, 2008). Estas herramientas utilizan

tres técnicas físicas principales: enterrar, cortar y arrancar Ahmad *et al.* (2014), y son los más comúnmente usados aún por encima del método químico. La mayoría de las herramientas de deshierbe mecánico eliminan la maleza fuera de línea de cultivo y muy pocas entre plantas de la misma hilera debido a que son más difíciles de tratar porque las herramientas no son selectivas, es decir, no puede distinguir entre el cultivo y la maleza. Dentro de la variedad de herramientas convencionales tanto para cultivo entre hileras como entre plantas de la misma hilera, se pueden nombrar las siguientes. Labranza a voleo: rastra de cadenas, rastra de púas flexibles, azadas rotativas; labranza entre hileras: desmalezadoras, azadas de disco, cultivadores rodantes, desmalezadoras de cestas o canastas; labranza en hileras: desmalezadoras de torsión, de dedos y de cepillos (Figura 1) (Ahmad *et al.*, 2014; Osten y Crook, 2016).

Con el uso de las rastras se trata toda el área, tanto cultivo como maleza, la selectividad es limitada y solo las malezas pequeñas se eliminan eficazmente mediante el desgarro, por lo que debe repetirse la labor de deshierbe. En cambio, las desmalezadoras de dedos y de torsión operan desde los lados de la hilera y debajo de las hojas de cultivo, pero necesitan una dirección firme, disminuyendo la velocidad de trabajo. Estas herramientas se pueden usar en la mayoría de los vegetales trasplantados como el frijol, colza de primavera, cebolla sembrada, remolacha roja y azucarera y zanahorias (Van Der Weide *et al.*, 2008). Se pueden combinar estas herramientas en un implemento para control de malezas en líneas de cultivo como entre ellas. En cereales se puede hacer un rastrillado ciego con rastras de dientes elásticos, de cadena o de arrastre después de la siembra, pero antes de la emergencia del cultivo, para darle una ventaja temprana sobre la maleza y ayudar a la selectividad en el deshierbe futuro (Bond *et al.*, 2003). En general, la eficacia del control de malezas con herramientas no selectivas depende de la diferencia en tamaños entre el cultivo y la mala hierba.

El avance en la tecnología ha permitido que algunas máquinas incluyan cierto grado de inteligencia usando información de la escena local del cultivo para activar o desactivar la herramienta de trabajo en presencia de maleza o cultivo.

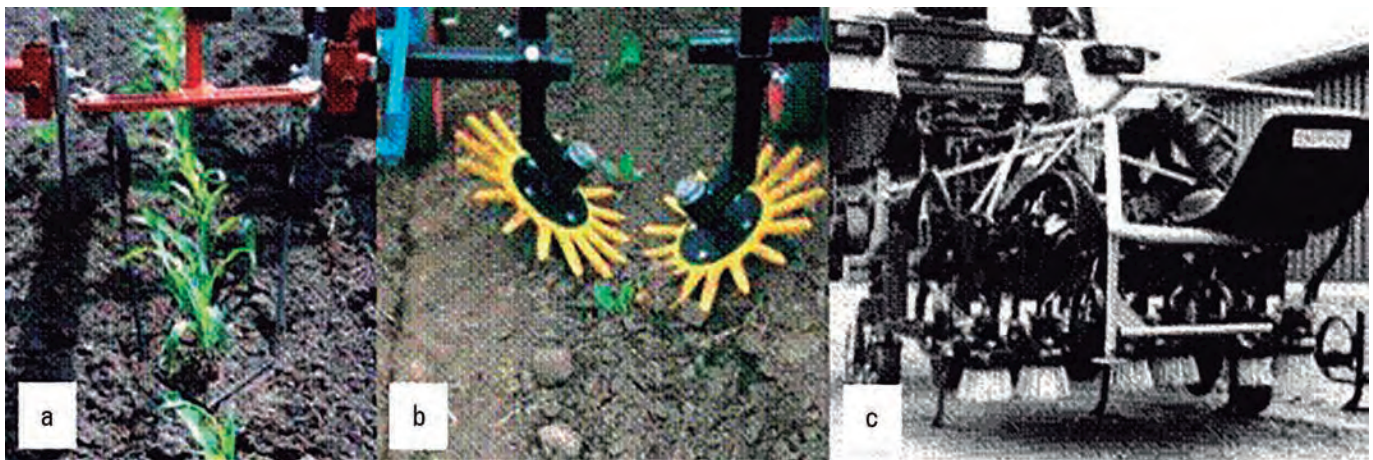


FIGURA 1. Herramientas convencionales para deshierbe en las hileras del cultivo-desmalezadoras: a) de torsión, b) de dedos Van Der Weide *et al.* (2008) y c) de cepillos Paice *et al.* (1996).

Christensen *et al.* (2009), citan numerosos autores que han desarrollado implementos de deshierbe de alta precisión para sistemas inteligentes de manejo de malezas específico del sitio SSWM (guiados), incluidos los siguientes: Cuchillos mecánicos,

azadas giratorias, desbrozadora de cesta giratoria en dirección transversal, platos con chuchillas con resorte, azada cicloide con púas giratorias y disco vertical con secciones recortadas con biseles periféricos que actúan como azada (Osten y Crook, 2016).

El enfoque similar es mover la herramienta dentro o fuera de la línea de cultivo en función de la posición de las plantas de cultivo. Por ejemplo, el desyerbador inteligente de lechugas de la empresa Sarl Radis, usa la interrupción de un haz de luz por las plantas de cultivo para mover una azada dentro y fuera de la hilera, dejando el cultivo intacto (Van Der Weide *et al.*, 2008). Así también el Robovator (2018) es una máquina basada en visión para el deshierbe mecánico en cultivos en hileras que utiliza cuchillas que se mueven dentro y fuera de la hilera cuando pasa una planta de cultivo, para eliminar la maleza (Figura 2a). De manera similar Tillett *et al.* (2008) presentan una máquina basada en una azada comercial con cuchillas para cultivo entre hileras y módulos con un disco impulsado hidráulicamente (Figura 2b), los cuales tienen una sección interior cortada para que las plantas del cultivo pasen sin daños mientras remueve la tierra entre plantas para eliminar las malezas. Esta tecnología se conoce como Robocrop y utiliza visión artificial para identificar las plantas. Una azada cicloide con ocho púas de forma sigmoidea verticales (Figura 2c) que puede bajar en espacios entre plantas y retractarse en presencia de plantas, es otra herramienta inteligente

desarrollada por Nørremark *et al.* (2008), en este caso las plantas deben estar georreferenciadas. El desyerbador Steketee IC es una máquina de cultivo entre plantas (Figura 2d) que calcula la posición de las plantas y las recorre rápidamente con precisión con su amplia variedad de cuchillas de cultivo y otras herramientas desmalezadoras. Las cámaras van montadas debajo del capó delantero y cuentan con iluminación LED (Suttonag, 2015).

Está disponible una amplia gama de desbrozadoras entre hileras y entre plantas con herramientas como las presentadas anteriormente, incluyendo rastras de púas con resorte, mini-ridders, desbrozadoras de alambre rotativo y de acción neumática Korresa *et al.* (2019), como el de nombre comercial *Pneumat weeder*, que usa aire comprimido para expulsar las malezas de las hileras del cultivo (Van Der Weide *et al.*, 2008).

En general, los requisitos para un buen rendimiento de los métodos mecánicos para la eliminación de las malezas entre hileras como en entre plantas de cultivo con herramientas simples, de acuerdo a Slaughter *et al.* (2008), son: una guía precisa de filas para el dispositivo; ajuste de altura (para controlar la profundidad de corte); preparación adecuada del suelo (los terrones libres en el suelo pueden empujar las malezas antes de que puedan ser cortadas); y el tiempo de operación con respecto a la edad de la maleza (algunas especies se vuelven leñosas y la herramienta solo la dobla en lugar de cortarla).

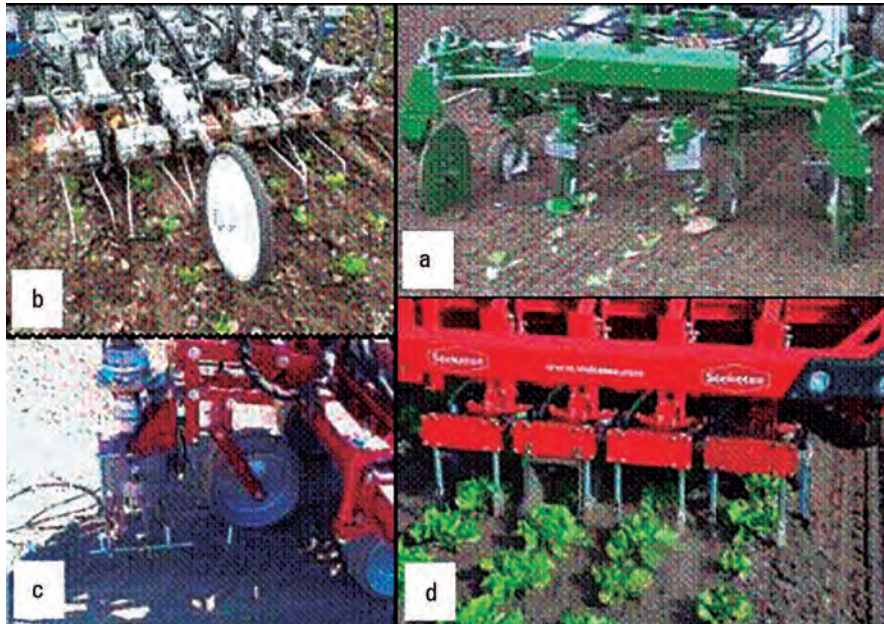


FIGURA 2. Herramientas inteligentes para eliminación de malezas en hileras de cultivo: a) Robovator, b) Robocrop, c) azada cicloide y d) Steketee IC.

En el caso de las herramientas inteligentes, el buen rendimiento del método depende del sistema de detección del cultivo y de velocidades de operación bajas para permitir el buen accionamiento de la herramienta (Van Der Weide *et al.*, 2008).

Método químico. Es el segundo método de control malezas más usado y aunque el uso de herbicidas sigue siendo eficaz y económico, los costes ambientales pueden resultar trágicos. La aplicación selectiva se basa en aplicar productos químicos, pero de manera más precisa, es decir, de manera directa a la maleza, reduciendo el volumen de herbicidas usados por los sistemas convencionales hasta un 95% y permitiendo el uso de herbicidas no selectivos.

Un enfoque de la aplicación selectiva se basa en detectar las plantas de cultivo para apagar y encender las boquillas en función de la presencia del cultivo. Dos técnicas se han desarrollado para detectar y controlar el sistema de pulverización automática en plataformas convencionales:

WeedSeeker (Figura 3a) desarrollado en 1990 en California que funciona evaluando la diferencia de relación de reflectancias roja e infrarroja cercana de la vegetación y el fondo, con fotodetectores. Sus circuitos electrónicos analizan la luz reflejada y

controlan las válvulas solenoides de disparo rápido. Cuando se detectan hojas verdes (malezas) del suelo de diferente color o de los rastros, se desencadena un rociado

puntual dirigido (Baille *et al.*, 2013). Esto reduce hasta un 90% la cantidad de herbicida a aplicar (Trimble Inc, 2019). *WeedIT* desarrollado en países bajos incluye un sensor de luz roja que cambia parcialmente a infrarrojo cercano cuando pasa sobre la clorofila de la planta viva. Un sensor puede controlar cinco solenoides y suelen estar espaciados a 1 m a lo largo de la pluma, y opera a una altura de 1 m sobre el suelo (Baille *et al.*, 2013). Al rociar solo malezas, ayuda a ahorrar hasta un 90% de costos de productos químicos (Weed-It, 2019).

Sin embargo, las salpicaduras del herbicida a la planta pueden generar un daño fitotóxico significativo y una disminución del rendimiento. Para ello, las investigaciones al respecto indican el uso de formulaciones líquidas para aumentar la deposición superficial y polímeros que inhiben las salpicaduras durante la deposición. La eficacia de este método depende en gran medida de la velocidad del desyerbador y la altura de la boquilla, Sabanci y Aydin (2017) indican que el área de superficie cubierta por los herbicidas es inversamente proporcional a la velocidad del desmalezador.

Otro enfoque ha sido la microaspersión en regiones muy pequeñas con el objetivo de tratar plantas individuales, como el sistema descrito por Lee *et al.* (1999), que aplica micro dosis (10 ms de activación de la boquilla) en áreas de 0.9 por 1.27 cm, resultando un caudal de 0.098 L/min. Este sistema usa visión artificial para procesar imágenes de regiones de 116 cm² con 10 plantas. Otro ejemplo es la pulverización en un área rectangular de aproximadamente 0.64 por 1.27 cm con aceite de canola calentado y guiado por un sistema de imágenes hiperespectrales para identificar tomate y dos especies de malezas, desarrollado por Zhang *et al.* (2009).

Basados en la práctica agronómica de estimar la densidad media de malezas en el campo para decidir si se debe fumigar o no, se ha propuesto que se obtuviesen grandes beneficios a largo plazo si se diseña una dosis variable de acuerdo a la densidad y especies de malezas (Paice *et al.*, 1996). Algunos sistemas

de aspersión de precisión utilizan los mapas de malezas para desarrollar planes de aplicación de tasa variable y son usados por pulverizadores diferenciales para aplicar los herbicidas solo en las áreas que se requieran (Peltzer *et al.*, 2009). Por ejemplo, Tian (2002), desarrolló un pulverizador automático controlado por un sistema de visión artificial que usa imágenes de baja resolución de un área de visualización grande para detectar la densidad de malezas. El tamaño de la zona analizada coincide con el tamaño de la barra de pulverización. Se rociaron selectivamente malezas detectadas en tiempo real. Los requisitos clave para el rendimiento de la aplicación espacialmente variable incluyen la presión, la velocidad de respuesta, y las características de reducción del sistema de control de dosis del pulverizador (Paice *et al.*, 1996).

La combinación de los de los diferentes enfoques de la aplicación selectiva y convencional de químicos también se ha realizado para trabajos en hileras de cultivos densos y entre las hileras. Rizzardi *et al.* (2007) estudiaron la efectividad de un sistema de fumigación selectiva y convencional de cacahuete. El sistema se formó por un pulverizador selectivo de altura y el WeedSeeker con capucha para rociado de malezas entre las plantas y entre los callejones, respectivamente (Figura 3b). Su menor control de malezas con su tratamiento se debió a dificultades técnicas y al tipo de herbicida.

Método térmico. La manera convencional del método térmico era la quema del rastrojo para matar la mayor cantidad de semillas de malezas, sin embargo, esa práctica está prohibida debido al humo y otros peligros (Bond *et al.*, 2003). Los métodos térmicos se pueden usar de manera más controlada y tienen la ventaja de una mínima modificación del suelo. Se pueden incluir dentro del control térmico de malezas, los métodos basados en llamas, microondas, infrarrojos, radiación ultravioleta, agua y espuma caliente, y electrocución (Osten y Crook, 2016).

Control con llamas. El uso de llamas se puede aplicar para deshierbe total de malezas o para eliminación selectiva y se necesita de una protección para la planta, ya sea un escudo de aire o agua o una barrera

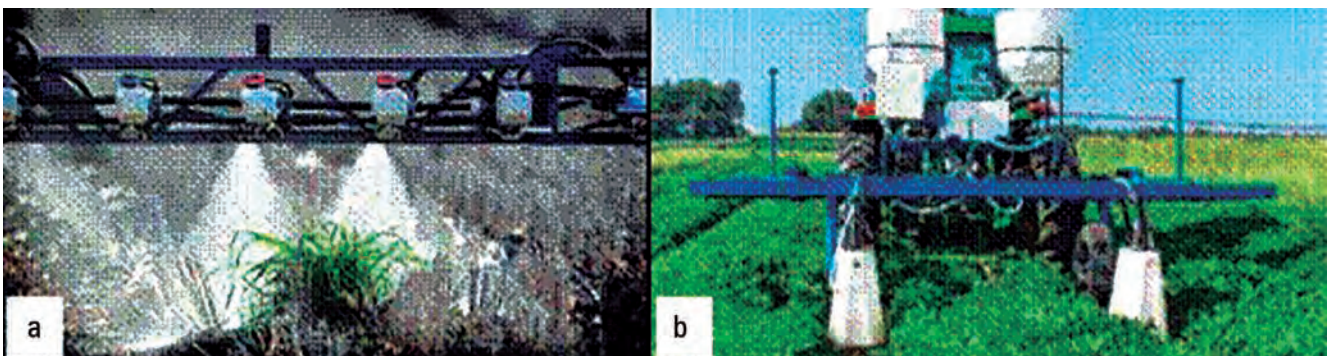


FIGURA 3. a) sistema WeedSeeker y b) sistema de aplicación selectiva y convencional.

térmica. Por ejemplo, el robot de deshierbe térmico de la empresa danesa Robovator Poulsen (2021), utiliza el sistema de visión Robovator para identificar las plantas del cultivo y una serie de chorros de plasma orientados hacia la hilera de cultivo, dispara llamas para matar las malas hierbas (Figura 4a). Algunas especies de malezas son tolerantes a las llamas e influye en la eficacia del método, la precipitación por año en la región. Un sistema que induzca una alta humedad podría proporcionar un mejor control de malezas (Brodie, 2018). En general, un tiempo de exposición de hasta 130 ms es suficiente para matar el tejido foliar y en comparación con otros métodos de control térmico de malezas como el vapor, el uso de flamas es más barato y efectivo (Korres *et al.*, 2019).

Control con vapor y agua caliente. Mediante el uso de agua caliente o vapor de agua se reduce los riegos incendios probables con el uso de fuego. El uso de solo agua caliente es un método no selectivo porque se aplica a toda el área siendo más eficiente en regiones con población densa de malezas (Korres *et al.*, 2019). La temperatura del agua es factor clave para la eliminación de malezas, hongos o parásitos de las plantas, y varios estudios indican que las temperaturas más altas son más efectivas, indicando que los líquidos se deben calentar hasta mínimo a 150° cuando son aceites orgánicos, para que la eficacia fuera confiable. El aplicador de vapor más común es la hoja de vapor, una cubierta de membrana termorresistente sellada en los bordes que cubre solo el área dentro de la hilera y se hace antes de plantar. El vapor se bombea debajo de la cubierta y penetra en el suelo para matar las más hierbas y sus semillas (Gay *et al.*, 2010). Con este enfoque podemos encontrar al robot Steam'R del grupo francés Simon Group Simon's Steam'R or Steam'R, (PotatoPro, 2018). Este es un sistema equipado con calderas para sobrecalentar el vapor a una temperatura de hasta 180°C y este vapor es transportado a unas placas de 3 m x 1.5 m que se superponen al suelo para calentarlo a una temperatura de 80°C a una profundidad de 8 a 9 centímetros, quemando las semillas de malezas antes de brotar (Figura 4b). Así mismo, también está Soil Steam International (2020), empresa noruega con su sistema Soilprep2020, la cual es una máquina de vapor móvil que permite aplicar vapor en profundidad de hasta 30 centímetros, neutralizando del 95% al 100% de todos los hongos, malezas, semillas y nematodos del suelo sin necesidad de aplicar químicos, y que cada tratamiento tiene una duración de 3 a 5 años.

Control criogénico. Otro método térmico llamativo es con material criogénico, ya que la eliminación de malezas se puede lograr de manera instantánea con materiales criogénicos como nieve de dióxido (CO₂ a -78°C) de carbono y nitrógeno líquido (LN₂ a -196°C) (Korres *et al.*, 2019). Cutulle *et al.* (2013) desarrollaron un sistema de control de malezas basado en la aplicación de nitrógeno líquido a la maleza con un rociador modificado y su posterior trituración con un rodillo mecánico (Figura 4c).

Método eléctrico. La electricidad también puede matar malezas a través de descargas de alto voltaje, sin embargo, este método requiere del contacto cercano entre la sonda eléctrica y la maleza (de 1 a 2 cm) para que sea efectiva su eliminación y las plantas pequeñas requieren de un control más preciso de la sonda. Aunque el tiempo de ejecución de la descarga es mucho menor que cualquier otro método, el tiempo de posicionamiento de la sonda compensa debe ser considerado. La fuerza de la descarga eléctrica, la duración del contacto o la exposición, la especie de maleza, sus características morfológicas y su etapa de crecimiento afectan significativamente el éxito de este método (Korres *et al.*, 2019). La tecnología Electroherb de Zasso usa la electrofísica de potencia avanzada para el control de malezas, a través de aplicadores de energía óptima conectados a las baterías del tractor y diseñados específicamente para cada tipo de maleza y el tipo de suelo (Zasso, 2020). La cabina eléctrica se encuentra conectada a la batería del tractor y a los aplicadores como polo positivo, el suelo hace la función de polo negativo (Figura 4d).

Debido a los insatisfactorios efectos y altos costes de energía y mano de obra de los métodos anteriores, la tecnología láser parece ofrecer una alternativa viable. Los factores principales para la eficacia de este método son prácticamente dos: la cantidad de dosis de energía láser necesaria para el daño letal de las malezas detectadas la cual incluye el tamaño óptimo del diámetro del punto, la longitud de onda, potencia y tiempo de exposición, así como el enfoque en el meristemo apical de las plantas el cual es difícil de lograr en términos prácticos, las malezas monocotiledóneas y dicotiledóneas requieren al menos 54 J de potencia para ser dañadas (Marx *et al.*, 2012; Brodie, 2018).

Robots para el control de malezas

Dentro de los robots que aplican con el método mecánico se puede mencionar el AgBot II (Figura 5a) desarrollado por la Universidad Tecnológica de Queensland, el cual es un robot con sistema de visión que no solamente detecta sino también clasifica especies de malezas en tiempo real, lo cual le permite tomar una decisión sobre qué método de manejo de malezas aplicar, ya sea mecánico, químico o una combinación de ambos (Bawden *et al.*, 2017). Consta de herramientas intercambiables diseñadas para diferentes especies de malezas, densidades y tipos de suelo. El Weed Whacker de Odd.Bot (Figura 5b), es un robot holandés pequeño alimentado por batería que cuenta con cámaras y sensores para poder guiarse. Su mecanismo está localizado en el centro del robot que se extiende hacia abajo como una licuadora retráctil con la cual extrae las malas hierbas y las tritura hasta sus raíces mientras se va moviendo (Ecoinventos, 2020). Su uso es principalmente para cultivos hortícolas. El robot colombiano CERES AgroBot (Figura 5c), producto de investigación de la Universidad Militar Nueva Granada y la Universidad Nacional de Colombia va directo a donde se encuentra la maleza previamente detectada para posicionarse y destruirla, además de también aplicar fungicidas. Para ello cuenta con un sistema de tres motores lineales que mediante un posicionamiento cartesiano 3D controla la herramienta tipo taladro para destruir la maleza (Guzmán *et al.*, 2019). Este robot se limita a tareas periódicas de remoción de malezas, en las que la maleza es más pequeña que el cultivo.

La empresa francesa Naïo Technologies (2019) ha desarrollado tres robots, el robot OZ, Ted y Dino. El robot OZ (Figura 6a) lanzado principalmente para productores de espárragos, granjas pequeñas e invernaderos, es un robot pequeño completamente eléctrico equipado con sistema de visión, GPS y sensor LiDAR, con precisión de 2 cm con una autonomía que depende de la herramienta acoplada, entre las cuales pueden ser rejas de arado, rastra de peine, cepillo y además un remolque (Guyonneau *et al.*, 2017; Misse *et al.*, 2019). Por otra parte, el robot Ted (Figura 6b) multifuncional aplicado a viñedos, tiene como principal tarea la labranza mecánica y el deshierbe de maleza. Cuenta con una precisión de 1 cm y entre las herramientas que se le pueden acoplar se encuentran rotores, cuchillas y arado no reversible. El robot Dino (Figura 6c), es un robot completamente autónomo con una precisión de 2 cm lograda por el sistema GPS RTK (Misse *et al.*, 2019). Cuenta con un sistema de visión que detecta las hileras de cultivos y ajusta la posición de las herra-

mientas de deshierbe para permitir un escardado y deshierbe de alta precisión. Dentro de las herramientas se encuentra la reja de arado, rastras con púas y rastras de estrellas. Además, recolecta y mapea el cultivo, enviando información detallada y localizada en tiempo real al agricultor.



FIGURA 4. Métodos térmico y eléctrico de control de malezas: a) disparo selectivo de llamas, b) vapor de agua a través de hoja de vapor, c) con nitrógeno líquido y rodillo compactador de malezas congeladas y d) tecnología Electroherb de Zasso.



FIGURA 5. a) Robot AgBot II, b) Robot Weed Whacker de Odd.Bot c) Robot CERES AgroBot.



FIGURA 6. Robots desmalezadores desarrollados por la empresa francesa Naïo Technologies: a) OZ, b) Ted y c) Dino.

En Alemania la Universidad de Hohenheim desarrolló un implemento desyerbador rotativo probado en el robot eléctrico autónomo Phoenix (Reiser) (Figura 7a) que fue acondicionado para el deshierbe entre hileras en viñedos. Este implemento con ayuda de tres actuadores se puede mover hacia arriba, abajo, izquierda, derecha e inclinarse. Para detectar las posiciones de los tallos utilizaron dos métodos, un palpador mecánico y un sensor sonar (Reiser *et al.*, 2019). El seguimiento de las filas basado en un escáner láser permitió al robot una buena preci-

sión. El Titan FT35 (Figura 7b) de la empresa estadounidense Farmwise Labs (2020), es un tractor sin conductor que utiliza aprendizaje automático y visión por computadora. Entrenado con miles de imágenes para aprender las características de cultivos como brócoli, lechuga, coliflor y tomate, para poder diferenciar entre el cultivo y las malas hierbas (Davenport, 2020). Cuenta con seis desmalezadoras internas con cuchillas que se activan si la planta detectada es una maleza para inmediatamente cortarla y eliminarla con precisión de un centímetro.

La empresa alemana Farming-Revolution (2020) presenta un robot completamente autónomo (Figura 7c) que implementa aprendizaje profundo para diferenciar entre las malezas y el propio cultivo con precisiones de hasta 99% ya sea de día o de noche (Ahmad *et al.*, 2014). Para eliminar las malas hierbas utiliza una picadora mecánica con una precisión de 1 cm. El robot FarmDroid FD20 (Figura 7d) de la empresa danesa Farmdroid (2020), opera con cuatro módulos fotovoltaicos que generan la electricidad para poder moverse y trabajar. Realiza

siembra y el deshierbe en diferentes cultivos como: remolacha azucarera, cebolla, espinaca, col rizada, flores y colza. Debido a que realiza operaciones de siembra, desde este proceso el robot FarmDroid FD20 registra las coordenadas de cada planta, utilizando GPS de alta precisión, y por lo tanto sabe dónde debe limpiar para eliminar malas hierbas, por lo tanto, no necesita de cámaras y sensores para reconocer las plantas y malezas. Se detiene solo y envía un mensaje SMS al agricultor en caso de paradas o desviaciones.



FIGURA 7. a) Phoenix (Reiser), b) Titan FT35, c) Farming Revolution y d) Farmdroid FD20.

Dentro de los robots que aplican el método con microaspersión está el HortiBot (Figura 8a), resultado de investigación de la Universidad de Aarhus en Dinamarca. Funciona con un motor a gasolina, por lo cual hace más ruido que los eléctricos. Es semiautomático, diseñado para la eliminación de maleza ya sea de manera mecánica o con la aplicación de microaspersión de herbicidas de manera directa, dependiendo el apero acoplado. Utiliza un sistema de posicionamiento GPS y puede reconocer veinticinco tipos diferentes de malezas (Jørgensen *et al.*, 2006). Así también, la empresa suiza Ecorobotix (2019) cuenta con el robot autónomo AVO (Figura 8b), el cual detecta malezas mediante visión con cámaras RGB y las rocía con una o más boquillas. Cuenta con GPS, paneles fotovoltaicos, pilas recargables y sistema 4WD. Además, se puede controlar mediante una aplicación móvil (Agriculturers, 2018). El robot Ladybird (Figura 8c) del Centro Australiano de Robótica de Campo (ACFR), es un robot eléctrico que cuenta con paneles solares, y es similar al robot AVO, pero con un brazo de seis ejes para mover la boquilla y apuntar a la maleza (Steward *et al.*, 2019). Así también, otro robot del ACFR es el robot RIPPA (Figura 8d), de pulverización de micro dosis de precisión más pequeño que Ladybird pero con tecnología similar utilizando energía solar. El robot RIPPA hace uso de aprendizaje profundo para la detección de plantas y malezas. Dentro de sus funciones está el mapeo de cultivos, seguimiento automático de filas, remoción y deshierbe mecánico o químico, equipado con un aplicador de inyección inteligente de inyección variable (Bogue, 2016; Misse *et al.*, 2019). La Universidad de Ciencias Aplicadas en Osnabrück de Dinamarca, desarrollo un robot para fines de fenotipado, que posteriormente fue adquirido y mejorado por la empresa alemana Bosch. Dicho robot llamado BoniRob (Figura 8e), identifica malezas basándose en imágenes espectrales y características morfológicas. Consta de un módulo de pulverización que se compone de ocho boquillas controladas individualmente, y además también cuenta con control mecánico de malezas (Misse *et al.*, 2019).

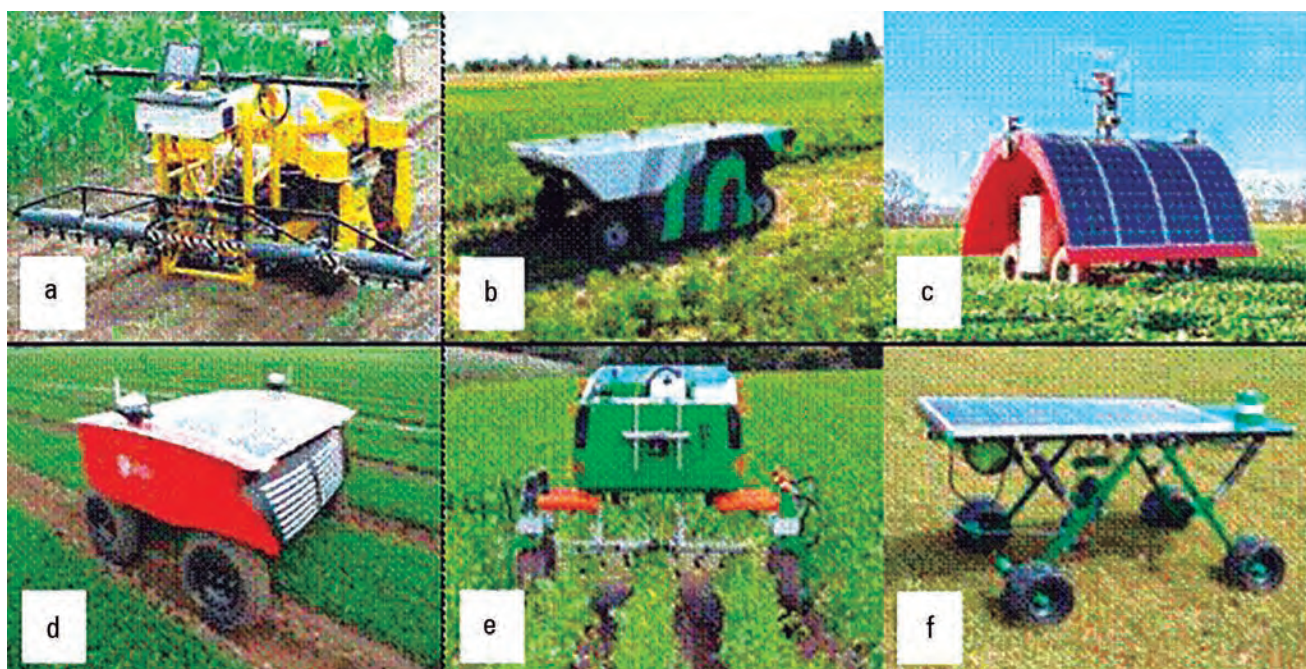


FIGURA 8. a) HortiBot. b) AVO ecoRobotix, c) LadyBird, d) RIPPA, e) BoniRob y f) Gbot.

Finalmente, dentro de los robots con aplicación de fuentes láser, la empresa argentina Mapplics Mobile Solutions cuenta con el robot autónomo Gbot (Figura 8f), con capacidad para monitorear y registrar distintos parámetros que le permiten generar mapas de precisión. Funciona con energía solar y es una opción para reemplazar el uso de glifosato en la agricultura (Gbot.AG, 2020). Su mecanismo para el control funciona por medio de un brazo de tres ejes de libertad que acciona un rayo láser y vapor de agua para controlar las malezas (Reimondo, 2020).

Por otra parte, y en la misma línea se encuentra el proyecto WeLASER, que es un proyecto financiado por la Unión Europea con un presupuesto de 5.4 millones de euros y coordinado por investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) iniciado a finales del 2020, en el cual participan diversos países (CSIC Comunicación, 2020). Utilizará un láser

para eliminar las malas hierbas de los cultivos, centrándose en trigo y maíz, más relevantes del mercado europeo, así también remolacha y zanahoria. WeLASER consistirá en un vehículo robot autónomo con visión e inteligencia artificial para discriminar entre las malas hierbas de los cultivos. Posteriormente detectará la posición de los meristemos de las malezas (responsables de su crecimiento) y aplicará una fuente laser de alta potencia para matarlas y evitar que se propaguen. También estará equipado con un sistema en la nube para un mejor manejo de la información. Se espera poder contar con un prototipo para el año 2023 (CORDIS Europa, 2020).

En la Tabla 1 se muestra una recopilación de los sistemas desarrollados por diversas universidades y empresas mencionados en este artículo, mencionando su país de origen, principio de funcionamiento y es de destacar que en su mayoría están desarrollados para cultivos en hileras.

TABLA 1. Sistemas para el control de malezas recopilados en esta investigación

Sistema / desarrollador	Principio de funcionamiento	Cultivo	País	Referencia
Robocrop / Garford Farm Machinery	Mecánico	Cultivo en hileras	Inglaterra	Tillett <i>et al.</i> (2008).
Robovator / F. Poulsen Engineering ApS	Mecánico	Cultivo en hileras	Dinamarca	Robovator (2018).
Steekee IC Weeder / Machinefabriek Steketee	Mecánico	Cultivo en hileras	Holanda	Suttonag (2015).
AgBot II / Universidad Tecnológica de Queensland	Mecánico/ químico	Cultivo en hileras	Australia	Bawden <i>et al.</i> (2017).
Weed Whacker / Odd.Bot	Mecánico	Cultivo en hileras (hortícolas)	Holanda	Ecoinventos (2020).
Oz / Naïo Technologies	Mecánico	Cultivo en hileras granjas e invernaderos	Francia	Guyonneau <i>et al.</i> (2017). Misse <i>et al.</i> (2019).

Sistema / desarrollador	Principio de funcionamiento	Cultivo	País	Referencia
Ted / Naïo Technologies	Mecánico	Cultivo en hileras (viñedos)	Francia	Naïo Technologies (2019).
Dino / Naïo Technologies	Mecánico	Grandes plantaciones	Francia	Naïo Technologies (2019) . Misse <i>et al.</i> (2019).
CERES AgroBot / Universidad Militar y Universidad de Colombia	Mecánico/ químico	Cultivo en hileras	Colombia	Guzmán <i>et al.</i> (2019).
Phoenix / Universidad de Hohenheim	Mecánico	Cultivo en hileras (viñedos)	Alemania	Reiser <i>et al.</i> (2019).
Titan FT35 / FarmWise Labs, Inc.	Mecánico	Cultivo en hileras	Estados Unidos	Farmwise Labs (2020). Davenport (2020).
Farming Revolution / Farming-revolution	Mecánico	Cultivo en hileras	Alemania	Farming-Revolution (2020).
FarmDroid FD20 / HortiBot / Universidad de Aarhus	Mecánico/ Químico	Cultivo en hileras	Dinamarca	Farmdroid (2020). Jørgensen <i>et al.</i> (2006).
AVO / ecoRobotix	Químico	Cultivo en hileras	Suiza	Ecorobotix (2019). Agriculturers (2018).
LadyBird / Centro Australiano de Robótica	Químico	Cultivo en hileras	Australia	Steward <i>et al.</i> (2019)
RIPPA / Centro Australiano de Robótica de Campo	Mecánico/ Químico	Cultivo en hileras	Australia	Misse <i>et al.</i> (2019). Bogue (2016).
BoniRob / Universidad de Ciencias en Osnabrück	Mecánico/ Químico	Cultivo en hileras	Dinamarca	Misse <i>et al.</i> (2019).
Steam'R / Simon Group	Vapor	Antes de la siembra	Francia	PotatoPro (2018).
soilPrep2020 / Soil Steam International	Vapor	Antes de la siembra	Noruega	Soil Steam International (2020).
Gbot / Mapplics Mobile Solutions	Vapor/láser	Cultivos en hileras	Argentina	Reimondo (2020). Gbot.AG (2020).
Proyecto WeLASER Europea	/ Unión Láser	Cultivos en hileras	Varios países de Europa	CORDIS Europa, (2020). CSIC Comunicación (2020).
Electroherb/ Zasso	Eléctrico	Cultivo entre hileras	Suiza, Brasil, Argentina	Zasso (2020).

CONCLUSIONES

- Este artículo de revisión proporciona una descripción general de algunas investigaciones y productos comerciales de empresas existentes en el campo de los robots agrícolas que ayudan con la labor de control de malezas en los cultivos (Tabla 1).
- Los robots mencionados se pueden caracterizar no solamente por su principio de funcionamiento, sino que también comparten entre ellos algunas otras características similares como lo son: el sistema de visión y detección, posicionamiento y también si cuentan con servicios en la nube para

un mejor manejo de la información en el caso de que tomen datos, con lo cual también pueden realizar mapas de los lotes. Así mismo, algunos robots son completamente autónomos, mientras que otros no, es decir que algunos necesitan de la intervención humana para estar supervisando las labores y su correcto funcionamiento en la parcela. En el futuro será indispensable que los robots agrícolas se desarrollen con el enfoque de completa autonomía, donde además se incluyan tecnologías que permitan disponer de la información adecuada para una mejor gestión de las parcelas.

- Es de destacar que en su mayoría los robots presentados están aplicados para terrenos planos, ya que la detección, el

- guiado y la realización de la labor requiere de la medición de diversos parámetros, para posteriormente tomar acciones utilizando el implemento acoplado al robot para poder trabajar. Esto con el fin de reducir los errores en la precisión que se puedan presentar debido a irregularidades del suelo, condiciones climáticas y el propio cultivo.
- La inteligencia artificial y el uso del aprendizaje profundo cada vez va tomando más fuerza, produciendo un mejor rendimiento, afectando también de manera positiva la manera en la que son diseñados los robots, ya que pueden ser de menor tamaño y por consiguiente tener un menor peso para evitar problemas de compactación de suelo, por ejemplo.
- Se esperan grandes cambios en la robótica agrícola, haciendo de esta una tecnología exitosa y disponible para cualquier agricultor gracias a las inversiones de empresas agrícolas e investigaciones de universidades, organismos y gobiernos

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRICULTURERS: Conoce a EcoRobotix, Red de especialistas en agricultura, [en línea], Agriculturers, 2018, Disponible en: <https://agriculturers.com/conoce-a-ecorobotix/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- AHMAD, M.T.; TANG, L.; STEWARD, B.L.: "Automated mechanical weeding", En: Automation: The future of weed control in cropping systems, Ed. Springer Netherlands, Stephen L. Young y Francis J. Pierce, primera ed., New Delhi, India, pp. 125-137, 2014, ISBN: 978-94-007-7512-1.
- ARAKERI, M.P.; VIJAYA, K.B.P.; BARSAYIYA, S.; SAIRAM, H.V.: "Computer vision based robotic weed control system for precision agriculture", En: 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Ed. IEEE, Udipi, India, pp. 1201-1205, 13 de septiembre de 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2017.8126005>.
- BAILLE, C.; FILLOLS, E.; MCCARTHY, C.; REES, S.; STAIER, T.: "Evaluating commercially available precision weed spraying technology for detecting weeds in sugarcane farming systems", 2013, Disponible en: <https://elibrary.sugarresearch.com.au/handle/11079/14045>, [Consulta: 7 de marzo de 2021].
- BAKSHIPOUR, A.; JAFARI, A.; NASSIRI, S.M.; ZARE, D.: "Weed segmentation using texture features extracted from wavelet sub-images", Biosystems Engineering, 157: 1-12, 2017, ISSN: 1537-5110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.02.002>.
- BAWDEN, O.; KULK, J.; RUSSELL, R.; MCCOOL, C.; ENGLISH, A.; AMIRA, F.Y.; LEHNERT, C.; PEREZ, T.: "Robot for weed species plant-specific management", Journal of Field Robotics, 34(6): 1179-1199, 2017, ISSN: 1556-4959, DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21727>.
- BECHAR, A.; VIGNEAULT, C.: "Agricultural robots for field operations: Concepts and components", Biosystems Engineering, 149: 94-111, 2016, ISSN: 1537-5110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>.
- BOGUE, R.: "Robots poised to revolutionise agriculture", Industrial Robot: An International Journal, 43(5): 450-456, 2016, ISSN: 0143-991X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.01410.1108/IR-05-2016-0142>.
- BOND, W.; TURNER, R.; GRUNDY, A.: A review of non-chemical weed management, [en línea], HDRA, the organic Organisation, UK, 81 p., 2003, Disponible en: <http://www.organicweeds.org.uk>, [Consulta: 8 de marzo de 2021].
- BRODIE, G.: "Chapter 3 - The use of physics in weed control", En: Non-Chemical Weed Control, Ed. Elsevier Academic Press, Khawar Jabran y Bhagirath S. Chauhan, ed., USA, pp. 33-59, 2018, ISBN: 978-0-12-809881-3.
- CHRISTENSEN, S.; SØGAARD, H.T.; KUDSK, P.; NØRREMARK, M.; LUND, I.; NADIMI, E.S.; JØRGENSEN, R.: "Site-specific weed control technologies", Weed Research, 49(3): 233-241, 2009, ISSN: 0043-1737, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2009.00696.x>.
- CORDIS EUROPA: Sustainable weed management in agriculture with laser-based autonomous tools, [en línea], CORDIS, 2020, Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/101000256/es>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- CSIC COMUNICACIÓN: Un proyecto del CSIC utilizará el láser para eliminar malas hierbas de los cultivos sin necesidad de pesticidas, [en línea], CSIC, 2020, Disponible en: https://www.csic.es/sites/default/files/30diciembre2020_laser_malas_hierbas.pdf, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- CUTULLE, M.A.; ARMEL, G.R.; BROSNAN, J.T.; KOPSELL, D.A.; HART, W.E.; VARGAS, J.J.; GIBSON, L.A.; MESSER, R.E.; GONZÁLEZ, A.J.A.; DUNCAN, H.A.: "Evaluation of a cryogenic sprayer using liquid nitrogen and a ballasted roller for weed control", Journal of Testing and Evaluation, 41(6): 869-874, 2013, ISSN: 0090-3973, DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE20120296>.
- DAVENPORT, T.: The future of work now: Digital weeder, [en línea], Forbes, 2020, Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/tomdavenport/2020/03/21/the-future-of-work-now-digital-weeder/?sh=14b940cc2203>, [Consulta: 6 de marzo de 2021].
- ECOINVENTOS: El robot capaz de arrancar malas hierbas amenaza de los herbicidas, [en línea], Ecoinventos, 2020, Disponible en: <https://ecoinventos.com/odd-bot/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- ECOROBOTIX: The autonomous robot weeder from Ecorobotix, AVO - The autonomous robot weeder from Ecorobotix, [en línea], Ecorobotix, 2019, Disponible en: <https://www.ecorobotix.com/en/avo-autonomous-robot-weeder/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- ENGLISH, A.; ROSS, P.; BALL, D.; UPCROFT, B.; CORKE, P.: "Learning crop models for vision-based guidance of agricultural robots", En: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Ed. IEEE, pp. 1158-1163, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353516>, ISBN: 1-4799-9994-6.
- FARMDROID: Product | Farmdroid, [en línea], Farmdroid, 2020, Disponible en: <https://farmdroid.dk/en/product/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- FARMING-REVOLUTION: Farming revolution GmbH, [en línea], Farming-Revolution, 2020, Disponible en: <https://www.farming-revolution.com/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- FARMWISE LABS, I.: FarmWise | Feeding Our World and Our Future, Farmwise.io, [en línea], Farmwise, 2020, Disponible en: <https://farmwise.io/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].

Espinoza-Hernández *et al.*: Control de maleza mediante la robótica

- GAY, P.; ALABANDA, P.; AIMONINO, D.R.; TORTIA, C.: "A high efficacy steam soil disinfestation system, part II: Design and testing", *Biosystems engineering*, 107(3): 194-201, 2010, ISSN: 1537-5110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.07.008>.
- GBOT.AG: Robótica aplicada en la agricultura, GBOT | Fenotipo de alto rendimiento, [en línea], Gbot.AG, 2020, Disponible en: <https://gbot.ag/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- GOMES, F.S.J.; LETA, R.F.: "Applications of computer vision techniques in the agriculture and food industry: a review", *European Food Research and Technology*, 235(6): 989-1000, 2012, ISSN: 1438-2385, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1844-2>.
- GUYONNEAU, R.; BELIN, É.; MERCIER, F.; AHMAD, A.; MALAVAZI, F.B.: *Autonomous robot for weeding*, Inst. System engineering research laboratory of angers University of Angers, Francia, 2 p., 2017.
- GUZMÁN, S.L.E.; ACEVEDO, R.M.; GUEVARA, R.A.: "Weed-removal system based on artificial vision and movement planning by A* and RRT techniques", En: *Acta Scientiarum. Agronomy, Agricultural Engineering International: the CIGR*, vol. 41, 2019, DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v41i1.42687>, ISBN: 1682-1130, 9.
- HASAN, A.S.M.M.; SOHEL, F.; DIEPEVEEN, D.; LAGA, H.; JONES, M.G.K.: "A survey of deep learning techniques for weed detection from images", *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 2021, ISSN: 0168-1699, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106067>.
- IRÍAS, T.A.J.; CASTRO, C.R.: "Algorithm of weed detection in crops by computational vision", En: *2019 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, Ed. IEEE, Cholula, Mexico, pp. 124-128, 27 de marzo de 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2019.8673182>.
- JIANG, G.; ZHAO, C.; SI, Y.: "A machine vision based crop rows detection for agricultural robots", En: *2010 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, Ed. IEEE, pp. 114-118, 2010, ISBN: 1-4244-6531-1.
- JIMÉNEZ, L.A.F.; CAMARGO, P.D.A.; GARCÍA, R.D.Y.: "Intelligent system for weeds management in pineapple crop with precision agriculture concepts.", *Revista Ciencia y Agricultura*, 17(3): 122-136, 2020, ISSN: 0122-8420, DOI: <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.10830>.
- JØRGENSEN, R.N.; SØRENSEN, C.G.; PEDERSEN, J.M.; HAVN, I.; OLSEN, H.; SØGAARD, H.: "HORTIBOT: A System Design of a Robotic Tool Carrier for High-Tech Plant Nursing Automation Technology for Off-road Equipment 2006", En: *Proceedings of the 1-2 September 2006 International Conference, Bonn, Germany, Bonn, Germany, 2006*.
- KANAGASINGHAM, S.; EKPANYAPONG, M.; CHAIHAN, R.: "Integrating machine vision-based row guidance with GPS and compass-based routing to achieve autonomous navigation for a rice field weeding robot", *Precision Agriculture*, 21(4): 831-855, 2020, ISSN: 1573-1618, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09697-z>.
- KORRES, N.E.; BURGOS, N.R.; TRAVLOS, I.; VURRO, M.; GITSOPOULOS, T.K.; VARANASI, V.K.; DUKE, S.O.; KUDSK, P.; BRABHAM, C.; ROUSE, C.E.: "New directions for integrated weed management: Modern technologies, tools and knowledge discovery", *Advances in Agronomy*, 155: 243-319, 2019, ISSN: 0065-2113.
- KORRESA, N.E.; BURGOSA, N.; TROVLOS, I.; VURRO, M.; GITSOPOULOS, T.; VARANASI, V.; DUKE, S.; ALABANDA, P.; BRABHAM, C.; ROUSE, C.: Chapter Six-New directions for integrated weed management: Modern technologies, tools and knowledge discovery, Ed. Academic Press, Donald L. Sparks, *Advances in Agronomy ed.*, vol. 155, 243-319 p., 2019.
- KUSHWAHA, H.L.; SINHA, J.; KHURA, T.; ROGET, D.K.; EKKA, U.; PURUSHOTTAM, M.; SINGH, N.: "Status and scope of robotics in agriculture", [en línea], En: *International Conference on Emerging Technologies in Agricultural and Food Engineering*, vol. 12, p. 163, 2016, Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/312589560_Status_and_Scope_of_Robotics_in_Agriculture, [Consulta: 8 de marzo de 2021].
- LEE, W.S.; SLAUGHTER, D.C.; GILES, D.K.: "Robotic weed control system for tomatoes", *Precision Agriculture*, 1(1): 95-113, 1999, ISSN: 1573-1618, DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009977903204>.
- LIU, H.; SUN, H.; LI, M.; IIDA, M.: "Application of color featurig and deep learning in maize plant detection", *Remote Sensing*, 12(14): 2229, 2020, ISSN: 2072-4292, DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12142229>.
- MARX, C.; BARCIKOWSKI, S.; HUSTEDT, M.; HAFERKAMP, H.; RHAT, T.: "Design and application of a weed damage model for laser-based weed control", *Biosystems Engineering*, 113(2): 148-157, 2012, ISSN: 1537-5110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.07.002>.
- MILIOTO, A.; LOTTES, P.; STACHNISS, C.: "Real-time semantic segmentation of crop and weed for precision agriculture robots leveraging background knowledge in CNNs", En: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Ed. IEEE, Brisbane, QLD, Australia, pp. 2229-2235, 21 de mayo de 2018, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460962>.
- MISSE, M.P.T.E.; ALMOND, P.; WERNER, A.: *Developing automated and autonomous weed control methods on pipfruit orchards in New Zealand*, [en línea], 2019, Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333812494_Developing_Automated_and_Autonomous_Weed_Control_Methods_On_Pipfruit_Orchards_In_New_Zealand, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- NAÏO TECHNOLOGIES: *Multifuncional Vineyard weeding robot – TED*, TED, the vineyard weeding robot, [en línea], Naïo Technologies, 2019, Disponible en: <https://www.naio-technologies.com/en/agricultural-equipment/vineyard-weeding-robot/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].
- NØRREMARK, M.; GRIEPENTROG, H.W.; NIELSEN, J.; SØGAARD, H.T.: "The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops", *Biosystems Engineering*, 101(4): 396-410, 2008, ISSN: 1537-5110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.09.007>.
- OERKE, E.C.: "Crop losses to pests", *The Journal of Agricultural Science*, 144(1): 31-43, 2006, ISSN: 0021-8596, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>.
- OSORIO, K.; PUERTO, A.; PEDRAZA, C.; JAMAICA, D.; RODRÍGUEZ, L.: "A deep learning approach for weed detection in lettuce crops using multispectral images", *AgriEngineering*, 2(3): 471-488, 2020, ISSN: 2624-7402, DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering2030032>.
- OSTEN, V.; CROOK, N.: *A review of technologies that can be enabled by robotics to improve weed control*, [en línea], Inst. Cotton Research and Development Corporation, Australian Cotton Farming Systems, Gindie Queensland, Australia, 30 p., 2016, Disponible en: <http://www.visionweeding.com/thermal-weeding/>, [Consulta: 15 de marzo de 2021].

Revista Ingeniería Agrícola, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761, Vol. 11, No. 4 (octubre-noviembre-diciembre, pp. 54-67), 2021

PAICE, M.E.R.; MILLER, P.C.H.; DAY, W.: "Control requirements for spatially selective herbicide sprayers", *Computers and Electronics in Agriculture*, 14(2): 163-177, 1996, ISSN: 0168-1699, DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1699\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0168-1699(95)00046-1).

PANDEY, P.; NARAYAN, D.H.; YOUNG, S.: A literature review of non-herbicide, robotic weeding: A decade of progress, Inst. Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University, Raleigh NC, USA, 26 p., 2020.

PELTZER, S.C.; HASHEM, A.; OSTEN, V.A.; GUPTA, M.L.; DIGGLE, A.J.; RIETHMULLER, G.P.; DOUGLAS, A.; MOORE, J.M.; KOETZ, E.A.: "Weed management in widerow cropping systems: a review of current practices and risks for Australian farming systems", *Crop and Pasture Science*, 60(5): 395-406, 2009, ISSN: 1836-5795, DOI: <https://doi.org/10.1071/CP08130>.

PÉREZ, R.M.; SLAUGHTER, D.C.; FATHALLAH, F.A.; GLIEVER, C.J.; MILLER, B.J.: "Co-robotic intra-row weed control system", *Biosystems Engineering*, 126: 45-55, 2014, ISSN: 1537-5110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.009>.

PINO, O.R.S.E.: "Efecto de la competencia de malezas y la densidad de siembra en el rendimiento del cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) var. coodetec 405", *Investigación Agraria*, 10(2): 21-28, 2013, ISSN: 2305-0683.

POTATOPRO: Simon's Steam'r or Steam'r, [en línea], PotatoPro, 2018, Disponible en: <https://www.potatopro.com/es/node/98044>, [Consulta: 19 de abril de 2021].

POULSEN, F.: Deshierbe térmico, [en línea], VISIONWEEDING, 2021, Disponible en: <http://www.visionweeding.com/thermal-weeding/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].

RAJAA, R.; SLAUGHTER, D.C.; FENNIMOREB, S.; SIEMENSC, M.: Precision weed control robot for vegetable fields with high crop and weed densities, Inst. 2019 ASABE Annual International Meeting, Boston, Massachusetts, USA, 4 p., 2019.

RASTI, P.; AHMAD, A.; SAMIEI, S.; BELIN, E.; ROUSSEAU, D.: "Supervised image classification by scattering transform with application to weed detection in culture crops of high density", *Remote Sensing*, 11(3), 2019, ISSN: 2072-4292, DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11030249>.

REIMONDO, G.: Robot desmalezador con rayo láser y vapor de agua, ¡Sin agrotóxicos! Tecnología humanizada, [en línea], 2020, Disponible en: <https://humanizationoftechnology.com/robot-desmalezador-con-rayo-laser-y-vapor-de-agua-sin-agrotoxicos/revista/2020/volumen-1-2020/03/2020/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].

REISER, D.; SEHSAH, E.S.; BUMANN, O.; MORHARD, J.; GRIEPENTROG, H.W.: "Development of an autonomous electric robot implementation for intra-row weeding in vineyards", *Agriculture*, 9(1), 2019, ISSN: 2077-0472, DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture9010018>.

RIZZARDI, K.; PROSTKO, E.; RAINS, G.; VELLIDIS, G.; MORARI, F.: "Selective spraying of weeds in peanut", En: Sixth European Conference on Precision Agriculture (6ECPA), vol. Poster, Skiathos, Greece, p. 6, 2007.

ROBOVATOR: Automated Mechanical Weeding, [en línea], Robovator, 2018, Disponible en: <https://www.robovator.com/>, [Consulta: 19 de abril de 2021].

SABANCI, K.; AYDIN, C.: "Smart robotic weed control system for sugar beet", *Journal of Agricultural Science and Technology*, 19(1): 73-83, 2017, ISSN: 1680-7073, e-ISSN: 2345-3737.

SLAUGHTER, D.C.; GILES, D.K.; DOWNEY, D.: "Autonomous robotic weed control systems: A review", *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1): 63-78, 2008, ISSN: 0168-1699, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.008>.

SOHAIL, R.; NAWAZ, Q.; HAMID, I.; GILANI, S.M.M.; MUMTAZ, I.; MATEEN, A.; NAWAZ, J.: "A review on machine vision and image processing techniques for weed detection in agricultural crops", *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 58(1): 187-204, 2021, ISSN: 0552-9034, DOI: <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/21.305>.

SOIL STEAM INTERNATIONAL: Products, SoilSteam International, [en línea], Soil Steam International, 2020, Disponible en: <https://soilsteam.com/products/>, [Consulta: 5 de marzo de 2021].

STEWART, B.L.; GAI, J.; TANG, L.: The use of agricultural robots in weed management and control, Ed. Burleigh Dodds, J. Billingsley (Ed.), *Robotics and automation for improving agriculture ed.*, Cambridge, UK, 25 p., 2019, ISBN: 978-1-78676-272-6.

SUTTONAG: Steketee, Steketee ic weeder, [en línea], Suttonag, 2015, Disponible en: https://www.suttonag.com/steketee_ic_weeder.html, [Consulta: 12 de abril de 2021].

TIAN, L.: "Development of a sensor-based precision herbicide application system", *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2): 133-149, 2002, ISSN: 0168-1699, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00097-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00097-2).

TILLET, N.D.; HAGUE, T.; DEDOUSIS, A.C.: "Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision", *Biosystems Engineering*, 99(2): 171-178, 2008, ISSN: 1537-5110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.026>.

TRIMBLE INC: Sistema automático de pulverización WeedSeeker 2, Trimble Agriculture, [en línea], Trimble Inc, 2019, Disponible en: <https://agriculture.trimble.com/product/sistema-automtico-de-pulverizacin-weedseeker-2/?lang=es>, [Consulta: 16 de marzo de 2021].

VAN DER WEIDE, R.Y.; BLEEKER, P.O.; ACHTEN, V.T.J.M.; LOTZ, L.A.P.; FOGELBERG, F.; MELANDER, B.: "Innovation in mechanical weed control in crop rows", *Weed Research*, 48(3): 215-224, 2008, ISSN: 0043-1737, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00629.x>.

VOUGIOUKAS, S.G.: "Agricultural robotics. Annual Review of Control", *Robotics, and Autonomous Systems*, 2(1): 365-392, 2019, ISSN: 0921-8890, DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-0236170>.

WEED-IT: Precision spraying - weed sprayer, WEED-IT Precision Spraying, [en línea], Weed-It, 2019, Disponible en: <https://www.weed-it.com/>, [Consulta: 16 de marzo de 2021].

ZASSO: Agriculture-Zasso, Zasso.com, [en línea], Zasso, 2020, Disponible en: <https://zasso.com/home/what/agriculture/#>, [Consulta: 12 de abril de 2021].

ZHANG, Y.; SSTAAB, E.; SLAUGHTER, C.D.; GILES, K.D.; DOWNEY, C.: "Precision Automated Weed Control Using Hyperspectral Vision Identification and Heated Oil", En: 2009 ASABE Annual International Meeting, Reno, Nevada, USA, p. 17, 2009.

Juan Espinoza-Hernández, Estudiante de Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Mecanización Agrícola, Universidad Autónoma, Chapingo, Carretera México-Texcoco km. 38.5, Estado de México. C.P 56230, e-mail: juanesphdez@gmail.com ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8633-6765>

Carlos Juárez-González, Estudiante de Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Mecanización Agrícola, Universidad Autónoma, Chapingo, Carretera México-Texcoco km. 38.5, Estado de México. C.P 56230, e-mail: carlos.juarez.gonzalez904@gmail.com ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0202-8511>

Canek Mota-Delfín, Estudiante de Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Mecanización Agrícola, Universidad Autónoma, Chapingo, Carretera México-Texcoco km. 38.5, Estado de México. C.P 56230, e-mail: kincanekmd@gmail.com ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3565-6811>

Eugenio Romantchik-Kriuchkova, Profesor e Investigador Titular, Universidad Autónoma, Chapingo, profesor de Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Mecanización Agrícola, Carretera México-Texcoco km. 38.5, Estado de México. C.P 56230, e-mail: eu.genio.romantchik@gmail.com ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3184-4938>

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra sujeto a la Licencia de Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos 15 años. En función de estos objetivos globales y como parte de su misión El Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola trabaja para el logro de los 7 objetivos y metas siguientes:



2.4. Para 2030, asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción, contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas, fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejoren progresivamente la calidad del suelo y la tierra.



6.4. De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua

6.5. De aquí a 2030, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda.



4.7. De aquí a 2030, asegurar que todos los alumnos adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas mediante la educación para el desarrollo sostenible y los estilos de vida sostenibles, los derechos humanos, la igualdad de género, la promoción de una cultura de paz y no violencia, la ciudadanía mundial y la valoración de la diversidad cultural y la contribución de la cultura al desarrollo sostenible.



7.2. De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.



5.5. Asegurar la participación plena y efectiva de las mujeres y la igualdad de oportunidades de liderazgo a todos los niveles decisorios en la vida política, económica y pública

5.a. Emprender reformas que otorguen a las mujeres igualdad de derechos a los recursos económicos, así como acceso a la propiedad y al control de la tierra y otros tipos de bienes, los servicios financieros la herencia y los recursos naturales, de conformidad con las leyes nacionales.



13.1. Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.

13.2. Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.

13.3. Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.



15.3. Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo.