

DIGINVASIVE: Sistema de Alerta y Control de especies invasoras. Caso de estudio: *Amaranthus palmeri*

DIGINVASIVE: Alert and Control System for weed invasive species. Case study: *Amaranthus palmeri*

Ana I. de Castro^{1,*}, Gustavo A. Mesías-Ruiz², Josep María Llenes³, Irene Borra-Serrano², Christian Rueda-Ayala¹, José Dorado², Jordi Recasens⁴ & José Manuel Peña²

¹ Departamento de Medio Ambiente y Agronomía, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, CSIC, Madrid, España

² Grupo tec4AGRO, Instituto de Ciencias Agrarias, CSIC, Madrid, España

³ Servei de Sanitat Vegetal, Generalitat de Catalunya, Lleida, España

⁴ Departamento de Ciencia e Ingeniería Forestal y Agrícola, Universitat de Lleida, Agrotecnio CERCA Center, Lleida, España

(*E-mail: ana.decastro@csic.es)

<https://doi.org/10.19084/rca.34978>

Recibido/received: 2024.01.15

Aceptado/accepted: 2024.02.28

RESUMEN

La gestión eficiente de las malas hierbas invasoras es fundamental para mantener el equilibrio entre biodiversidad, producción y sostenibilidad agrícola. Esto se debe a que las malas hierbas invasoras pueden causar pérdidas significativas de rendimiento en los cultivos y su control supone un elevado coste en productos fitosanitarios, además de los daños ecológicos que generan. Los avances en robótica, digitalización, inteligencia artificial, etc., permiten la optimización de los recursos empleados (e.g. fitosanitarios) mediante la aplicación de tratamientos localizados y ajustados a las necesidades reales del cultivo siguiendo los principios de la agricultura de precisión. Recientemente se ha confirmado la presencia de la planta invasora *Amaranthus palmeri* en parcelas agrícolas en España. Esta especie es altamente competitiva, presenta una elevada tasa de fecundidad y la capacidad para desarrollar biotipos resistentes a los herbicidas, convirtiéndola en una de las especies exóticas con mayor amenaza para la agricultura española. Para ello, se ha desarrollado una herramienta de agricultura digital -denominada DIGINVASIVE- para el mapeo y seguimiento de *A. palmeri* en campos agrícolas, consistentes en un servidor de cartografía digital web de código abierto que utiliza tecnologías digitales innovadoras como imágenes de dron, Sistemas de Información Geográfica, Tecnologías de la Información y la Comunicación y potentes algoritmos de Inteligencia Artificial. Esta herramienta interactiva permitirá a los usuarios establecer las medidas de prevención y erradicación necesarias para abordar el control de *A. palmeri* en escenarios agrícolas.

Palabras clave: manejo localizado, agricultura de precisión, teledetección, dron, inteligencia artificial.

ABSTRACT

Efficient invasive weed management is critical to maintain the balance between biodiversity, production and agricultural sustainability. Invasive plants may cause significant yield losses in crops and their control entails a high cost in pesticide products, in addition to the ecological damage they generate. Advances in robotics, digital agriculture, artificial intelligence, etc, allow the inputs' optimization (e.g. pesticides) through timely and site-specific treatments tailored to the real crop needs, aligned with the principles of precision agriculture. *Amaranthus palmeri* has been recently detected in Spanish crop fields. It is an extremely competitive species, with a high fertility rate and skilled at developing herbicide-resistant biotypes, which poses a serious threat to Spanish agriculture. Therefore, a digital agriculture tool -called DIGINVASIVE- is being designed for mapping and monitoring of *A. palmeri* in crops, which consists of an open-source web-based interface system using innovative digital technologies such as drone imagery, Geographic Information Systems, Information and Communication Technologies and powerful Artificial Intelligence algorithms. This interactive tool will allow users to establish suitable prevention and eradication measures to address the control of *A. palmeri* in agricultural environments.

Keywords: site-specific management, precision agriculture, remote sensing, drone, artificial intelligence.

INTRODUCCIÓN

Las especies de malas hierbas (mh) invasoras son consideradas una de las principales amenazas para la agricultura actual tanto por causar pérdidas en el rendimiento de los cultivos como por el grave daño ecológico que provocan en estos ecosistemas produciendo graves pérdidas de biodiversidad (Paini *et al.*, 2016). Recientemente se ha detectado la presencia de *Amaranthus palmeri* S. Watson en zonas agrícolas de España y otros países de la cuenca mediterránea (Chipre, Israel, Italia, Grecia, Turquía y Portugal). Se trata de una especie originaria de Norteamérica, altamente competitiva, de rápido crecimiento y con una elevada tasa de fecundidad y capacidad para desarrollar biotipos resistentes a herbicidas, como a inhibidores de la acetolactato sintasa (ALS) y a glifosato (Torra *et al.*, 2020; Manicardi *et al.*, 2023). La EPPO la ha incluido en la "A2-Alert List", destinada a organismos de alto riesgo para los ecosistemas, y lograr así una alerta temprana (EPPO, 2022). Se trata de una especie de difícil manejo que, sumado a la reducción de materias activas para su control, hace que la **detección precoz** junto con eficaces **sistemas de alerta** sean la clave para la contención y control de esta invasora (Manicardi *et al.*, 2023).

En los últimos años se están desarrollando herramientas digitales web para aplicaciones en agricultura a partir de programas y datos residentes en la nube, llamados SaaS (por sus siglas en inglés *Software as a Service*: el software visto como un servicio). Estas herramientas informáticas son muy adecuadas para realizar el seguimiento y vigilancia de los cultivos en grandes extensiones de terreno, para lo cual combinan Sistemas de Información Geográfica (SIG), Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), Inteligencia Artificial (IA) e imágenes y grandes cantidades de datos (*big data*) obtenidos mediante teledetección para desarrollar plataformas digitales en línea (Mesías-Ruíz *et al.*, 2023). Sin embargo, hasta ahora no se han desarrollado para mh invasoras en ambientes agrícolas. Por otro lado, el uso de drones en combinación con algoritmos de inteligencia artificial ha permitido detectar mh en estados iniciales de desarrollo del cultivo, solventando las limitaciones de otras plataformas remotas de adquisición de datos, como satélites y aviones tripulados, y poder elaborar mapas de prescripción en el momento óptimo de

tratamiento y ajustados a las necesidades del cultivo (de Castro *et al.*, 2018). Estas son las bases de la Agricultura de Precisión que, mediante la identificación precisa y temprana de las infestaciones de mh, permite realizar un control localizado y alcanzar importantes beneficios asociados a la reducción en el uso de inputs, e.g. herbicidas.

En este trabajo presentamos varias herramientas de agricultura digital para la identificación y seguimiento de *A. palmeri* en campos agrícolas. Para ello, se está desarrollando una plataforma web interactiva y de acceso libre, denominada DIGINVASIVE, que utiliza tecnologías digitales innovadoras para cargar, analizar y visualizar datos que permitan cartografiar la presencia de la mh invasora a escala nacional y a escala parcela.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de la Plataforma digital web

La plataforma se desarrolla en un sistema interfaz web de código abierto consistente en varios módulos (Figura 1) que permite: i) la digitalización y seguimiento de la presencia de *A. palmeri* en todo el territorio español (escala nacional); ii) la cartografía de plantas de *A. palmeri* en diferentes estados de desarrollo en campos agrícolas (escala parcela); y iii) la salida de resultados en formato vectorial (mapas) y numérico (localización y tamaño de las plantas). Para ello, la plataforma DIGINVASIVE utiliza tecnologías de teledetección (imágenes de alta resolución adquiridas con dron para la escala parcela e imágenes de satélite para la escala nacional), SIG, TIC e IA para la adquisición y análisis de las imágenes, el desarrollo de la plataforma y la visualización de los resultados.

DIGINVASIVE está formado por los siguientes módulos:

- *Módulo de Adquisición de Datos*: permite a los usuarios cargar las imágenes de las parcelas agrícolas obtenidas con el dron para su evaluación en el *Módulo de Análisis*. Además, permite añadir datos geográficos con la localización de plantas de *A. palmeri* para su vectorización y monitorización a escala nacional, los cuales son recopilados y actualizados por los Servicios de

Sanidad Vegetal y otros agentes interesados, como asesores, cooperativas, investigadores y agricultores.

- **Módulo de Análisis:** en este módulo se encuentran implementados algoritmos de IA diseñados para la identificación y clasificación de plantas de *A. palmeri* en campos agrícolas, así como la generación de cartografía actualizada y personalizada (más información en el siguiente apartado).
- **Módulo de Visualización:** se trata de una herramienta SIG con una interfaz gráfica de usuario intuitiva y de fácil manejo que permite la visualización y salida de los datos tanto en forma de mapas como numéricos y a diferentes escalas espaciales y temporales. Permitirá realizar el seguimiento y analizar la dispersión de *A. palmeri* a lo largo del territorio nacional, así como la generación de mapas de clasificación de plantas de *A. palmeri* en diferentes estados fenológicos en campos agrícolas.

Desarrollo del algoritmo de clasificación de *A. palmeri*

Se han tomado imágenes de alta resolución con dron en nueve campos de maíz en estados iniciales de desarrollo (V4-V6) localizados en Lleida

e infestados con *A. palmeri*. Para el análisis de las imágenes se ha utilizado el algoritmo de aprendizaje automático profundo (*deep learning*) de última generación YOLO-v8 (Jocher *et al.*, 2023), desarrollado para aplicaciones en tiempo real y adecuado para datos desbalanceados. Para el desarrollo del modelo se han utilizado 6.500 y 3.400 etiquetas de plantas de *Amaranthus* spp. y maíz, respectivamente, identificadas manualmente por expertos, de las que el 80% se utilizó para el entrenamiento y el 20% para la validación.

El proceso de generalización del modelo (inferencia) se llevó a cabo en parcelas independientes, comparando los resultados obtenidos en la clasificación para *Amaranthus* spp. con los datos verdad-terreno, consistentes en etiquetas asignadas por los expertos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han determinado la configuración y las especificaciones técnicas óptimas del dron y los sensores (en términos de altura de vuelo, solapamientos y resolución espacial óptima) para la discriminación de *Amaranthus* spp. en cultivos de maíz en estado temprano de desarrollo (escala parcela).

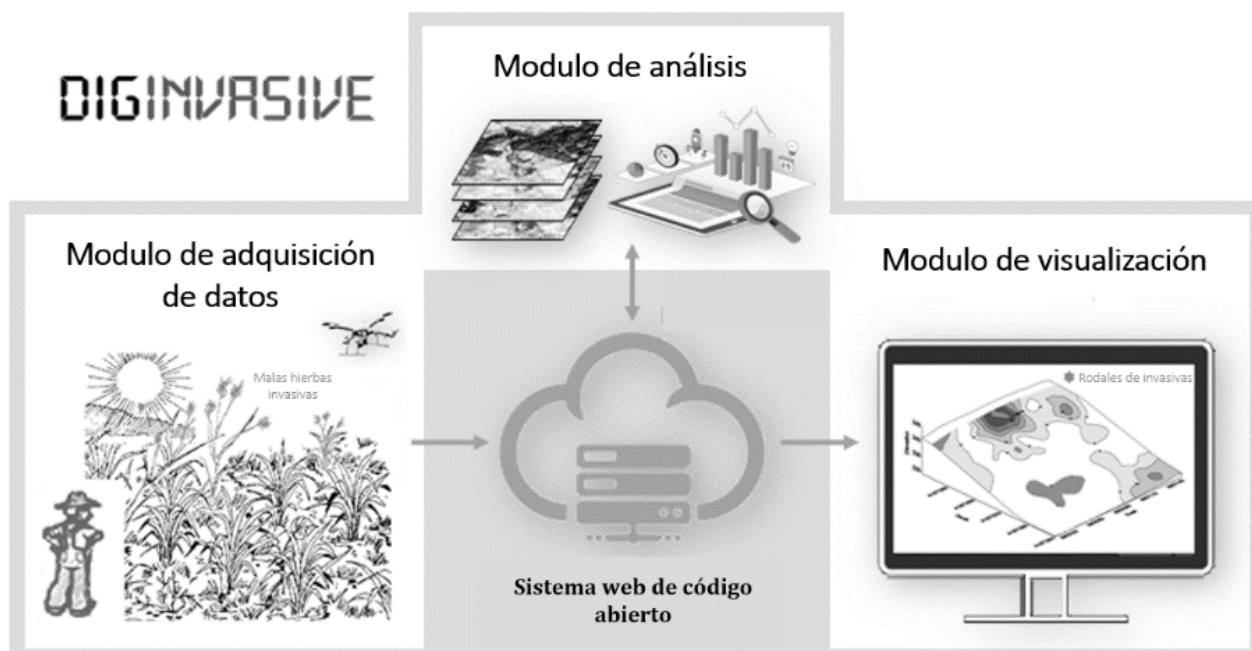


Figura 1 - Esquema general de la herramienta digital DIGINVASIVE.

Los resultados obtenidos en las clasificaciones de *Amaranthus* spp. en esta primera campaña de datos mostraron un porcentaje de precisión del 87,45%, i.e., plantas etiquetadas por expertos y correctamente identificadas y clasificadas automáticamente como *Amaranthus* spp. por el modelo, indicando que es posible el mapeo de estas especies de mh invasoras en estados tempranos de desarrollo mediante algoritmos de aprendizaje profundo (Figura 2). Aunque este valor de precisión se considera adecuado para escenarios complejos (de Castro *et al.*, 2018), el estudio de los errores obtenidos permitirá mejorar las clasificaciones con datos de las próximas campañas.

Los errores detectados consistieron principalmente en la clasificación de varias plantas donde el experto solo reconoció una (error de comisión) (Figura 3a); y la no clasificación por el modelo de una planta reconocida por el experto (error de omisión) (Figura 3b). Los errores de comisión requieren de una inspección profunda por parte del experto malherbólogo, evaluando si fue debido a la ausencia de etiqueta por su parte, ya que no todas las plantas de *Amaranthus* spp. de la imagen fueron etiquetadas, o a un error del modelo. En cualquier caso, este error no se considera de alta importancia, ya que sería considerada igualmente como zona de tratamiento al generar el mapa de

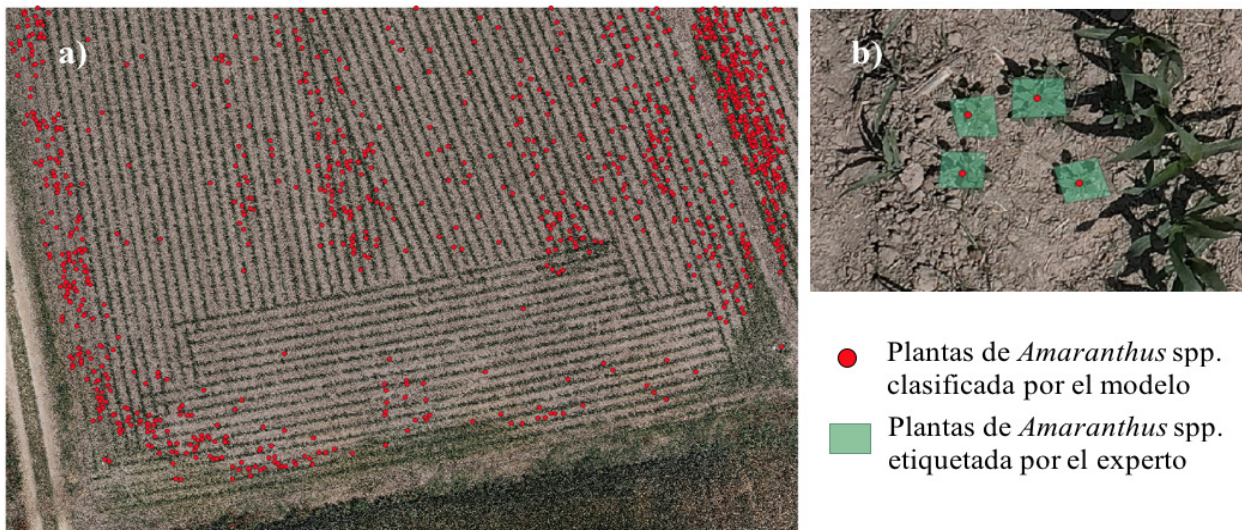


Figura 2 - a) Mapa de clasificación de la parcela de generalización; b) detalle de la clasificación con aciertos del modelo.

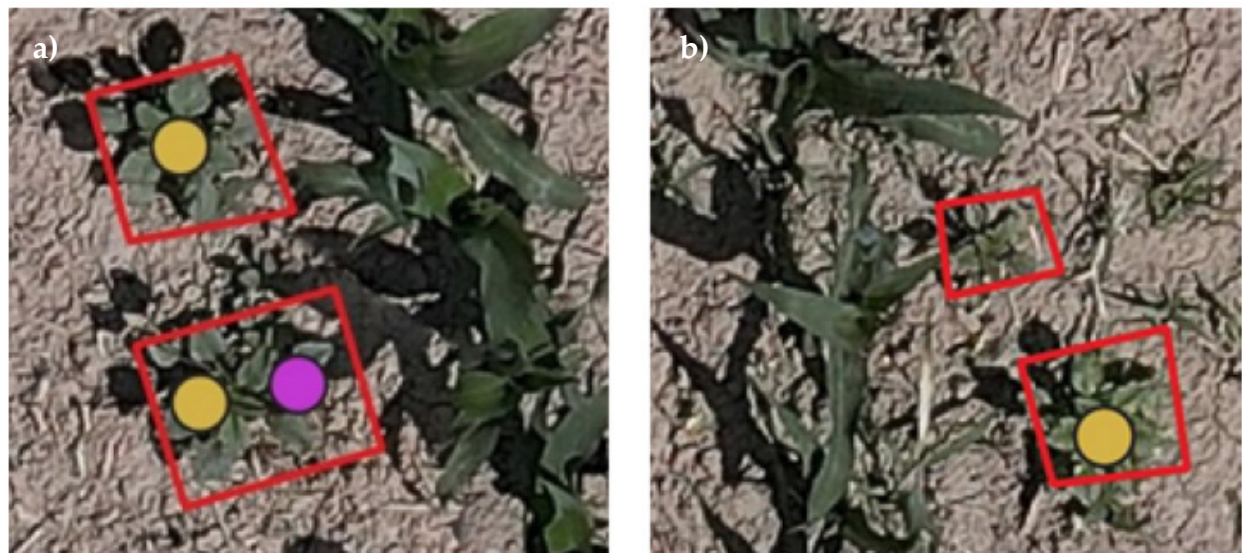


Figura 3 - Detalles de error de comisión (a) y de omisión b): ● Acierto del modelo en la clasificación de *Amaranthus* spp.; ● Error del modelo en la clasificación de *Amaranthus* spp.; □ Planta de *Amaranthus* spp. etiquetada por el experto.

prescripción de la parcela y estar en la misma área que la planta real sí detectada. El error de omisión supone un mayor riesgo debido a que el modelo no ha reconocido la presencia de la mh y no obtendría tratamiento, lo cual es de extrema importancia en el caso de *A. palmeri*, ya que las plantas femeninas tienen una tasa de fecundidad media de 200.000-600.000 semillas (Torra *et al.*, 2022).

La plataforma web está actualmente en desarrollo, a la vez que se están recopilando los datos sobre la localización actual de *A. palmeri* en todo el territorio nacional ofrecidos por los técnicos de los Servicios de Sanidad Vegetal y que servirán de entrada para el módulo de Adquisición de Datos. El diseño de la infraestructura de datos espaciales se está realizando teniendo en cuenta la dimensión (recursos informáticos), conectividad, reglas de comunicación y especificaciones de cada uno de los módulos mencionados.

DIGINVASIVE proporcionará información georreferenciada y digital, en forma de mapas y datos numéricos, sobre la localización y dispersión de la mh invasora *A. palmeri* a lo largo del territorio nacional, la cual podrá ser configurada a diferentes escalas temporales y espaciales. Será de acceso libre para su consulta y será actualizada con datos proporcionados por todos los agentes interesados, como Servicios de Sanidad Vegetal, asesores, cooperativas, investigadores y agricultores. Además, DIGINVASIVE contará también con la posibilidad de analizar imágenes adquiridas con dron según las especificaciones indicadas, de manera que puedan obtenerse mapas de identificación y

clasificación de plantas de *A. palmeri* en campos agrícolas (escala parcela) con los que realizar las medidas de control oportunas en el contexto de la agricultura de precisión.

CONCLUSIONES

Con las herramientas digitales que conforman la plataforma web DIGINVASIVE será posible realizar el seguimiento y conocer la dispersión de *A. palmeri*, proporcionando un sistema de alerta temprana que permita planificar las medidas de prevención, contención y erradicación necesarias para el control de esta invasora en los escenarios agrícolas. Aunque la primera aproximación de DIGINVASIVE se ha centrado en *A. palmeri*, el sistema se extenderá a otras especies invasoras y cultivos en futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR y la Agencia Estatal de Investigación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) a través de los proyectos DigInvasive (TED2021-132401A-I00) y SmartWeeding (PID2020-113229RBC41/AEI/10.13039/501100011033), y de las ayudas FPI (PRE2018-083227) y Juan de la Cierva (FJC2021-047687-1) de los investigadores GMR e IBS, respectivamente. También agradecemos a David Campos y José Manuel Martín, miembros de Tec4AGRO, por su apoyo en los trabajos de campo y gabinete.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- de Castro, A.I.; Torres-Sánchez, J.; Peña, J.M.; Jimenez-Brenes, F.M.; Csillik, O. & López-Granados, F. (2018) - An Automatic Random Forest-OBIA Algorithm for Early Weed Mapping between and within Crop Rows Using UAV Imagery. *Remote Sensing*, vol. 10, n. 2, art. 285. <https://doi.org/10.3390/rs10020285>
- EPPO (2022) - *Pest Risk Analysis for Amaranthus Palmeri*. EPPO, Paris. [cit. 2023.01.06].
<https://gd.eppo.int/taxon/AMAPA/documents>
- Jocher, G.; Stoken, A.; Borovec, J.; Christopher, S.T.A.N. & Laughing, L.C. (2023) - *Ultralytics/yolov5: v4.0-nn.SiLU() Activations, Weights & Biases Logging, PyTorch Hub Integration*. (en línea) Zenodo 2021. [cit. 2023.01.05]. <https://zenodo.org/record/4418161>
- Manicardi, A.; Scarabel, L.; Llenes, J. M.; Montull, J. M.; Osuna, M. D.; Torra Farre, J. & Milani, A. (2023) - Genetic basis and origin of resistance to acetolactate synthase inhibitors in *Amaranthus palmeri* from Spain and Italy. *Pest Management Science*, vol. 79, n. 12, p. 4886-4896. <https://doi.org/10.1002/ps.7690>
- Mesías-Ruiz, G.; Pérez-Ortiz, M.; Dorado-Gómez, J.; de Castro, A.I. & Peña, J.M. (2023) - Boosting precision crop protection towards agriculture 5.0 via machine learning and emerging technologies: A contextual review. *Frontiers in Plant Science*, vol. 14, art. 1143326. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1143326>
- Paini, D.R.; Sheppard, A.W.; Cook, D.C.; Barro, P.J.D.; Worner, S.P. & Thomas, M.B. (2016) - Global threat to agriculture from invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 113, n. 27, p. 7575–7579. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602205113>
- Torra, J.; Royo-Esnal, A.; Romano, Y.; Osuna, M.D.; León, R.G. & Recasens, J. (2020) - *Amaranthus palmeri* a New Invasive Weed in Spain with Herbicide Resistant Biotypes. *Agronomy*, vol. 10, art. 993. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071332>