

PREDICCIÓN DE MAPAS DE COSECHA DE GIRASOL INFESTADO DE *Ridolfia segetum* EN IMÁGENES REMOTAS MEDIANTE REDES NEURONALES EVOLUTIVAS DE UNIDAD PRODUCTO

P.A. Gutiérrez-Peña¹, F. López-Granados¹, J.M. Peña-Barragán¹, M. Jurado-Expósito¹, M.T. Gómez-Casero¹ y C. Hervás-Martínez²

¹Instituto de Agricultura Sostenible/CSIC, Apdo. 4084, 14080-Córdoba.
{zamarck@yahoo.es}

²Departamento de Informática y Análisis Numérico/Univ. Córdoba, Campus de Rabanales, Apdo. 14071-Córdoba. {chervas@uco.es}

Resumen: El objetivo de este trabajo fue predecir mapas de rendimiento del cultivo de girasol con infestaciones de *Ridolfia segetum* Moris, incorporando la elevación del terreno y los datos multiespectrales de imágenes aéreas. Para ello, se compararon métodos clásicos (Regresión Lineal Múltiple por el método stepwise, RLMS) y cuatro modelos de Redes Neuronales Evolutivas de Unidad Producto (RNEUP) ensayados con diferentes algoritmos evolutivos. Los modelos utilizados fueron: Programación Evolutiva (PE); PE Híbrida (PEH); PEH con Agrupamiento (PEHA), y PEHA Dinámica (PEHAD). Para comparar los distintos modelos se utilizó el Error Cuadrático Medio (ECM) de forma que cuanto menor ECM se obtenía, mayor precisión ofrecía el mapa de cosecha resultante. La precisión fue mayor en las RNEUP que en métodos clásicos, obteniéndose el menor ECM con la metodología PEHAD.

Palabras clave: redes neuronales, algoritmos evolutivos, predicción de cosecha, agricultura de precisión.

INTRODUCCIÓN

El análisis de imágenes remotas permite modelizar los diversos parámetros agronómicos para su aplicación en agricultura de precisión. Lo anterior se puede realizar mediante métodos de análisis multivariante clásicos, por ejemplo, Análisis Discriminante para clasificación y Regresión Lineal Múltiple por el método Stepwise (RLMS) para regresión. Además, recientemente se han aplicado Redes Neuronales (RN) a datos agronómicos obtenidos mediante teledetección y los resultados han sido satisfactorios con modelos de RN no lineales que describen la complejidad de relaciones existentes entre datos espectrales remotos y datos *in situ*.

Para mejorar la precisión de estos modelos se han desarrollado las denominadas Redes Neuronales Evolutivas de Unidad Producto (RNEUP). Frente a los métodos de optimización clásicos que seleccionan una red neuronal de arquitectura fija, la diferencia principal es que las RNEUP utilizan algoritmos evolutivos, que se definen como métodos estocásticos de búsqueda y que optimizan el modelo hasta establecer la mejor estructura y los pesos de la red. Por otro lado, las RNEUP utilizan nodos multiplicativos en lugar de neuronas aditivas, que permiten obtener resultados más precisos en la modelización de las interacciones multivariantes existentes entre datos espectrales y agronómicos.

En estudios malherbológicos han sido frecuentes los trabajos de competencia acerca de la influencia de las infestaciones de malas hierbas en el rendimiento de un cultivo, o sobre la obtención de mapas de emergencias con imágenes aéreas, o aquéllos que determinan la influencia de la pendiente en la existencia de rodales de malas hierbas. Con el fin de obtener el mapa de cosecha más preciso, el objetivo de este trabajo es aunar la influencia de todas esas variables y realizar un proceso de modelización multivariante, para así predecir mapas de rendimiento del cultivo de girasol infestado de *R. segetum*, incorporando la elevación del terreno y los datos multispectrales de imágenes aéreas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Características de la finca y datos procesados.

Los trabajos se realizaron en 2003 en la Finca Matabueyes (Córdoba, 42 ha), sembrada de girasol (mediados de Marzo), en régimen de laboreo y naturalmente infestada de *R. segetum*. Se tomaron fotografías en color e infrarrojo-color a mediados de mayo del 2003. Se obtuvieron mapas de rodales de *R. segetum*, tal y como se describe en (PEÑABARRAGÁN et al. 2007) que consistió en el método Spectral Angle Mapper, aplicando posteriormente un filtro de mediana para reducir el ruido de "sal y pimienta". Para recolectar el girasol se utilizó una cosechadora de precisión con sistema FieldStar de Massey Ferguson con DGPS, que sirvió además para obtener los datos de elevación. Para compactar el gran volumen de información generado, se trabajó en celdas de 20x20 píxeles en los que se obtuvo el promedio de cada una de las variables observadas: valor digital en las bandas azul (B), verde (G), roja (R) e infrarroja (NIR), elevación en metros (Z), densidad de *R. segetum* en pl m^{-2} y rendimiento de cosecha en tn ha^{-1} .

Redes Neuronales de Unidad Producto y Algoritmos Evolutivos.

Las RN han sido aplicadas con éxito en Agricultura de Precisión para relacionar la compleja información espectral disponible con los atributos deseados. En este trabajo, se hace uso de las Redes Neuronales de Unidad Producto, que suponen una alternativa al clásico Perceptrón Multicapa (MLP). Están basadas en nodos de tipo multiplicativo en lugar de tipo aditivo, lo que les confiere la habilidad de reflejar fuertes interacciones entre las variables de entrada.

Estas ventajas vienen contrarrestadas por la complejidad de la superficie de error asociada a una RNUP, lo que dificulta en gran medida su correcto ajuste, tanto de los pesos sinápticos como de su arquitectura. En este sentido, los Algoritmos Evolutivos (AE) suponen una herramienta muy adecuada, debido a que son capaces de generar soluciones satisfactorias en espacios de búsqueda complejos sin caer en óptimos locales. Sin embargo, tienen dificultad en converger hacia la mejor solución.

Algoritmos Híbridos.

Para mejorar la precisión de los AE, diversos investigadores han propuesto los llamados Algoritmos Híbridos (AH), que combinan un AE con algún procedimiento de

búsqueda local. En este trabajo y siguiendo una metodología similar a propuesta en MARTÍNEZ-ESTUDILLO et al. (2006), el algoritmo de entrenamiento de RNUPs utilizado combina un AE de Programación Evolutiva (PE), el algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) como procedimiento de búsqueda local y un algoritmo de clustering para la caracterización de individuos de la población. Se han utilizado distintas formas de hibridación, dando lugar a distintos AHs: PE Híbrida (PEH); PEH con Agrupamiento (PEHA), y PEHA Dinámica (PEHAD).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra la media y la desviación estándar (SD) junto con el mayor y menor ECM de entrenamiento y generalización obtenidos en 30 ejecuciones de las diferentes metodologías evolutivas. No se incluye el método RLMS ya que, al tratarse de un método determinista, produciría en todas las ejecuciones el mismo resultado. En la Tabla 2 se muestra el ECM de entrenamiento y generalización del método RLMS y del modelo más preciso de las metodologías evolutivas empleadas (PEHAD). A menor ECM, mayor precisión ofrecía el mapa de cosecha resultante. En la Tabla 3 se presentan las regresiones obtenidas con dichos modelos.

CONCLUSIONES

La precisión fue mayor en las Redes Neuronales que en métodos clásicos y ordenada de mayor a menor, en función de la media (μ) del ECM en generalización, fue: $\mu_{(PEHAD)} = \mu_{(PEHA)} > \mu_{(PEH)} > \mu_{(PE)}$.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos TIN2005-08386-C05-02 y AGL-2005-06180-CO3-02 de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología y con fondos FEDER. La investigación de P.A. Gutiérrez-Peña ha sido financiada por el programa I3P/CSIC- Predoctoral.

BIBLIOGRAFÍA

- PEÑA-BARRAGÁN, J.M.; LÓPEZ-GRANADOS, F.; JURADO-EXPÓSITO, M.; GARCÍA-TORRES, L. (2007). Mapping *Ridolfia segetum* Moris patches in sunflower (*Helianthus annuus* L.) crop using remote sensing. *Weed Research*, 47, 164-172.
- MARTÍNEZ-ESTUDILLO, A.C.; HERVÁS-MARTÍNEZ, C.; MARTÍNEZ-ESTUDILLO, F.J.; GARCÍA-PEDRAJAS, N. (2006). Hybridization of evolutionary algorithms and local search by means of a clustering method. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 36, 534-545.

Tabla 1. Media y desviación estándar (SD) junto con el mayor y menor Error Cuadrático Medio (ECM) de entrenamiento y generalización de los distintos algoritmos utilizados.

Algoritmos ^a	ECM (tn ha ⁻¹)							
	Entrenamiento				Generalización			
	Media	SD	Menor	Mayor	Media	SD	Menor	Mayor
PE	0,0555	0,0022	0,0517	0,0589	0,0520	0,0032	0,0474	0,0579
PEH	0,0508	0,0014	0,0490	0,0552	0,0484	0,0016	0,0457	0,0529
PEHA	0,0506	0,0014	0,0488^b	0,0552	0,0484	0,0016	0,0454	0,0528
PEHAD	0,0501	0,0009	0,0488	0,0520	0,0480	0,0012	0,0463	0,0502

^aLas cuatro metodologías de Redes Neuronales de Unidad Producto: Programación Evolutiva (PE), PE Híbrida (PEH), PE Híbrida con Agrupamiento (PEHA) y PEHA Dinámica (PEHAD). ^bLos ECM más bajos (más precisos) se marcan en **negrita**.

Tabla 2. Error Cuadrático Medio (ECM) de los modelos Regresión Lineal múltiple por el método stepwise (RLMS) y de Redes Neuronales de Unidad Producto Evolutivas Híbridas con Agrupamiento Dinámicas (PEHAD).

Modelos	ECM _{Entrenamiento}	ECM _{Generalización}
RLMS	0,0673	0,0642
PEHAD	0,0505	0,0454

Tabla 3. Ecuaciones de regresión obtenidas con el modelo menos (RLMS) y más preciso (PEHAD) en la predicción del mapa de cosecha de girasol

Modelos	Ecuaciones de regresión
RLMS	$R \text{ (tn ha}^{-1}\text{)} = 3,7031 - 0,0097Ridolfia - 0,0133Z - 0,0033R + 0,0003NIR$
PEHAD	$R \text{ (tn ha}^{-1}\text{)} = 1,6973 + 0,7396 (G^{6,1364} Z^{1,1831} Ridolfia^{0,4289})$ $- 0,0709 (NIR^{-0,7263} R^{6,2797} B^{-2,3923} Z^{-2,1374} Ridolfia^{0,5795})$ $- 13,1973 (NIR^{-0,0902} R^{2,8042} G^{-0,3956} B^{1,6049} Z^{0,9406})$ $+ 33,8768 (R^{1,5069} B^{2,9757} Z^{0,5926} Ridolfia^{0,0552})$ $- 22,3513 (NIR^{0,0758} G^{-0,9941} B^{3,7274} Z^{0,3144} Ridolfia^{0,1106})$

(#)RLMS, regresión lineal multivariante por el método stepwise. Redes Neuronales de Unidad Producto Evolutivas Híbridas con Agrupamiento Dinámicas (PEHAD); R: Rendimiento de cosecha; Z: elevación (m). G, B, R y NIR: valores digitales espectrales de las bandas del verde (G), azul (B), rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR); *Ridolfia*: número de plantas por m² (pl m⁻²).

Summary: Mapping sunflower yield as affected by *R. segetum* patches by applying Evolutionary Product Unit Neural Networks to remote sensed images. The objective of this work was to obtain maps of sunflower crop yield infested by *R. segetum*, combining yield, elevation and weed data with multispectral digital values of remote sensed images. Five models were applied: one classical statistical approach (Stepwise Multiple Linear Regression, SMLR) and four Evolutionary Product Unit Neural Network (EPUNN) models, trained with different evolutionary algorithms, including Evolutionary Programming (EP), Hybrid EP (HEP), HEP with Clustering (HEPC) and Dynamic HEPC (DHEPC). Models obtained with the different methodologies were evaluated using the Mean Squared Error (MSE), being the model more accurate when its MSE is lower. EPUNNs produced better results than classical methods and the lowest MSE was achieved using DHEPC methodology.

Key words: evolutionary algorithms, neural networks, precision agriculture yield prediction, spectral data.