

## TÉCNICAS NEURONALES PARA DETECCIÓN REMOTA DE RESTOS ARQUEOLÓGICOS.

M.C. Cantero<sup>(1)</sup>, R.M. Pérez<sup>(1)</sup>, J.Plaza<sup>(1)</sup>, E. Cerrillo<sup>(2)</sup>, A. Bejarano<sup>(2)</sup>

[mccantero@unex.es](mailto:mccantero@unex.es), [rosapere@unex.es](mailto:rosapere@unex.es)

(1)Dpto. de Informática. Escuela Politécnica.

(2)Dpto. de Historia. Facultad de Filosofía y Letras.

Universidad de Extremadura. Campus Universitario s/n. 10071 Cáceres. SPAIN.

### RESUMEN

La interpretación de fotografías aéreas mediante redes neuronales artificiales (RNAs) proporciona una poderosa técnica que facilita la investigación de los yacimientos arqueológicos. En la provincia de Cáceres, en la antigua ciudad romana de Cáparra, ha sido empleada con éxito una RNA de Mapas Autoorganizativos para obtener información sobre la excavación. Fotografías en blanco y negro, o en color, fueron procesadas por el modelo neuronal que proporcionó información sobre el trazado de la Vía de la Plata, conocida en la antigüedad como *Iter ab Emerita Asturicam*. Para comprobar la validez de los resultados proporcionados por la red se utilizaron técnicas no destructivas de georadar GPR (Ground Penetrating Radar), que posibilitan la identificación de estructuras arqueológicas de interés. Dichas técnicas confirmaron la existencia de restos enterrados de la calzada romana en las proximidades de la ciudad de Cáparra, ratificando los resultados obtenidos por la red neuronal.

### ABSTRACT.

The aerial photography interpretation using Artificial Neural Networks (ANN) is a useful method for archaeological studies. A SOM (Self-Organizing Map) has been used to study the morphological structure and evolution of Cáparra archaeological site. After using the Self-Organizing Map on airborne photographs, it was able to detect roads and ruins in Cáparra archaeological site. This Roman town could have been founded during the era of Emperor Augustus, close to the then newly created *iter ab Emerita Asturicam*, a road known in present times as Vía de la Plata which connects the North western and South western regions of Spain. The use of non-destructive techniques as the ground surface radar prospection has allowed the surface identification of some structures of archaeological interest that have validated the results obtained by the SOM.

**Palabras Clave:** Redes Neuronales, Restos Arqueológicos, Mapas Autoorganizativos.

### INTRODUCCIÓN

Las técnicas de teledetección poseen un gran potencial que puede aplicarse en el estudio e interpretación de muy diversas disciplinas. En particular, las fotografías aéreas han servido históricamente para situar, acotar e inventariar, normalmente a gran escala, los emplazamientos de interés arqueológico. Dada la precariedad que en general poseen estos bienes resulta vital documentar su existencia desde el mismo momento de su descubrimiento (Doneus, 2001). La posibilidad de efectuar tomas aéreas utilizando globos aerostáticos, aviones o satélites ha supuesto, en diferentes etapas, un salto cualitativo y cuantitativo en cuanto a las posibilidades de estudio de los yacimientos arqueológicos. La adecuada utilización de las fotografías aéreas, cenitales u oblicuas, resulta también de gran utilidad para la identificación de estructuras de interés que puedan estar enterradas en el subsuelo (Cavalli et al., 2000).

Durante la última década, las redes neuronales artificiales han sido empleadas con éxito al análisis e interpretación de fotografías aéreas (Merenyi et

al. 2000). El advenimiento de las aproximaciones mediante RNA en el análisis de imágenes se debe principalmente a su potencia en el reconocimiento y la clasificación de patrones. Uno de los modelos de RNA usado más comúnmente en la clasificación de datos pertenecientes a imágenes es el conocido como Back Propagation, pero requiere cierto número de muestras de prueba con resultados conocidos. Las redes de Mapas Autoorganizativos (SOM) han sido reconocidas como herramientas útiles para la clasificación de imágenes. Este modelo está basado en un algoritmo de aprendizaje no supervisado que no requiere ninguna muestra previa de prueba. La idea básica de este modelo es la incorporación, en la regla de aprendizaje competitivo, de algún grado de sensibilidad relacionado con la *vecindad* o *historia*. Esto proporciona un mecanismo para prevenir que algunas neuronas no aprendan durante el entrenamiento y, además, favorece ciertas propiedades topológicas que deben conservarse para establecer correspondencias entre las características de los patrones de entrada (Kohonen

1999).

Complementariamente, el georadar (GPR) proporciona una herramienta potente de alta resolución para la teledetección sobre el terreno. Es un método rápido y económico de investigación de la superficie del subsuelo y ha sido ampliamente utilizado como técnica no destructiva en gran variedad de disciplinas, en particular la arqueología (Del Río et al., 2002).

En este trabajo hemos utilizado la técnica de fotografía aérea (interpretada con redes neuronales artificiales), con el fin de disponer de una adecuada interpretación del yacimiento arqueológico de Cáparra en su conjunto y de los elementos de interés que en él se encuentran, y sus resultados han sido contrastados con estudios llevados a cabo utilizando el georadar. Para ello, hemos dispuesto del archivo fotográfico existente en el Laboratorio de Arqueología de la Universidad de Extremadura, en el que se encuentran tomas fotográficas desde el año 1956 hasta la actualidad.

La conocida como vía de la Plata se corresponde con la vía 24 del Itinerario de Antonino, el *iter ab Emerita Asturicam* (de Mérida a Astorga). El hecho de unir dos puntos distantes situados en el occidente de la península ibérica la convierte en un eje de comunicaciones cualificado, al romper la tradicional disposición radial de las comunicaciones peninsulares.

El primordial objetivo de este artículo es procesar imágenes aéreas correspondientes a la zona de estudio mediante una RNA de Mapas Autoorganizativos, y comprobar que la calzada en el yacimiento arqueológico de Cáparra es detectada automáticamente.

El modelo neuronal consta en N neuronas de entrada y M neuronas de salida, donde M es el número de clases o prototipos que se desean extraer empleando la red, y que debe ser cuidadosamente seleccionado según la complejidad de la imagen, así como en relación a otras métricas (Kohonen, 1999). Se usa un conjunto de conexiones de retroalimentación, desde la capa de entrada hacia la capa de salida, con un conjunto de pesos asociados ( $W_{M \times N}$ ) para efectuar la detección de características. En la capa de salida, las conexiones de retroalimentación y las conexiones laterales producen efectos dependiendo de la distancia a la neurona ganadora. En este estudio en concreto, se usan fotografías en blanco y negro y en color, y el color de los pixels corresponde a las entradas de la red. Cuando la red trabajó con imágenes en color, formato RGB (Rojo, Verde y Azul), se escogieron patrones de entrada tridimensionales, cada uno de cuyos componentes corresponde a una banda de color. Cuando la red procesó imágenes en blanco y negro, se empleó una neurona de entrada, para

representar la intensidad de gris de cada píxel elegido.

El procesamiento de la red neuronal se produce en dos etapas diferentes: ordenación y entrenamiento. En la fase de ordenación, las conexiones de retroalimentación proyectan los patrones de entrada en el espacio de características, y se emplea la distancia euclídea para identificar una neurona ganadora. En la fase de entrenamiento, las conexiones laterales y de alimentación producen efectos excitativos o inhibitorios dependiendo de la distancia a la neurona ganadora (Merenyi et al. 2000). Es importante enfatizar que los pesos asociados con las conexiones de retroalimentación contendrán prototipos de imágenes después de completar una fase de entrenamiento.

Para el proceso de entrenamiento, hemos usado un típico algoritmo SOM de entrenamiento [9] con las siguientes características:

1 Los pesos se inicializan todos al mismo valor (0.5).

2 Se elige aleatoriamente un píxel  $x$  de la imagen.

3 Se determina la neurona ganadora, para ello se usa un criterio de distancia mínima.

$$i^*[x] = \min_{1 \leq j \leq M} \|x - w_j\|^2 \quad (1)$$

4 Se ajustan los pesos. La neurona ganadora y sus vecinas adaptan sus pesos para aproximarlos al vector de entrada en cada paso del aprendizaje, usando la Expresión 2, donde  $\alpha(t)$  y  $\sigma(t)$  son respectivamente las funciones de aprendizaje y vecindad decrecientes en el tiempo. La modificación de los pesos correspondientes a la neurona ganadora se modifican proporcionalmente al factor de aprendizaje. Los pesos de las neuronas contenidas en el área de vecindad de la ganadora se modifican proporcionalmente a la mitad del mencionado factor.

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha(t)\sigma(t)(x^i - w_i(t)) \quad (2)$$

donde  $i \in \text{Vecindad}$

5 Criterio de parada. El proceso termina cuando se alcanzan un número predeterminado de iteraciones.

Con respecto a las funciones  $\alpha(t)$  y  $\sigma(t)$  es necesario tener en cuenta que:

Durante las iteraciones correspondientes a la *Fase Ordenación* el tamaño de la vecindad comienza siendo el tamaño del mapa, y decrece lentamente. El factor de aprendizaje comienza con un valor fijo (factor de aprendizaje de ordenación) y decrece hasta alcanzar el factor de aprendizaje de

ajuste (que también se determina previamente). Como la distancia de vecindad y el factor de aprendizaje decrecen a lo largo de esta fase, normalmente las neuronas de la red se ordenan en el espacio de entrada con una cierta topología física.

Para completar el entrenamiento después de la Fase de Ordenación se procede con la *Fase de Ajuste*. La distancia de vecindad decrece hasta el valor 1. El factor de aprendizaje continúa decreciendo, pero muy lentamente. El reducido tamaño de la vecindad y la lenta disminución del factor de aprendizaje ajustan la topología de la red, a la vez que mantienen estable el orden aprendido en la fase previa.

## RESULTADOS.

El conjunto de experimentos realizados estuvo enfocado al estudio de la calzada romana conocida como *Via de la Plata*. De las múltiples pruebas realizadas mostramos aquí los resultados correspondientes al procesamiento de dos de las imágenes, a saber, una fotografía aérea tomada en el año 1956, (véase **Figura 1** arriba); y la fotografía del satélite Landsat del año 1987 mostrada en la parte superior de la **Figura 2**.



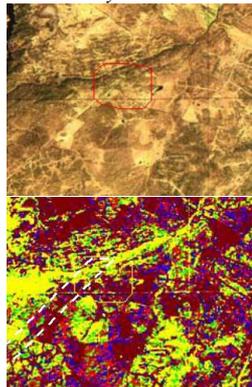
**Figura 1.** - Imagen de prueba que presenta la Via de la Plata en el año 1956 (arriba). Resultado de la red SOM para la detección de la vía (abajo).

En el primer caso se utilizaron 15 neuronas de salida, un factor de aprendizaje  $\alpha$  de 0.5 (véase la **Ecuación 2**), 40.000 iteraciones de entrenamiento para la Fase de Ordenación, y un factor de aprendizaje de 0.02 (véase la **Ecuación 2**) para la Fase de Ajuste, que se prolongó durante 8.000 iteraciones. Los resultados de la clasificación de la SOM para estos valores se muestran en la parte inferior de la **Figura 1**, donde cada una de las

clases de salida se identifica con un color diferente. Puede comprobarse que la red clasificó la imagen y encontró una línea recta que cruza la fotografía; esta línea, que se corresponde con la calzada romana, está enmarcada en un cuadro blanco en la figura, para facilitar su localización.

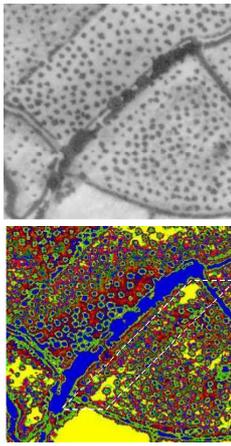
En el caso de la imagen satélite Landsat de 1987 se emplearon 3 neuronas 5 de salida, un factor de aprendizaje  $\alpha$  de 0.9 (véase la **Ecuación 2**) y 400.000 iteraciones de entrenamiento para la Fase de Ordenación, y un factor de aprendizaje de 0.02 para la Fase de Ajuste, de 100.000 iteraciones de duración.

Los resultados de la clasificación de la SOM se muestran en la parte inferior de la **Figura 2**, donde la calzada romana se dirige en línea recta hacia la ciudad de Cáparra (el área recuadrada). *Diferencias entre la calzada romana y la carretera moderna.*



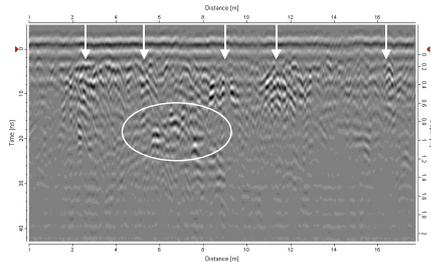
**Figura 2.** - Imagen de prueba correspondiente a la ortofoto de Cáparra (superior). Resultado de la red SOM en la detección de la Ruta de la Plata (inferior).

Son muy importantes las partes de la calzada romana en las que ésta no es seguida por las carreteras actuales. Los caminos romanos presentaban una típica linealidad, así que se trató de revelar el trazado original de la vía, a pesar de que no coincide con las sendas trazadas actualmente. Usando una fotografía del año 1.987, (véase parte superior de la **Figura 3**) con buena iluminación y no muchas sombras, la red neuronal detectó la antigua dirección de la calzada entre los olivos. Para este propósito, la red empleó 15 neuronas de salida, un factor de aprendizaje  $\alpha$  de 0.5 para la Fase de Ordenación, y de 0.02 para la Fase de Ajuste, que duraron 40.000 y 8.000 iteraciones, respectivamente. En la **Figura 3**, los resultados de la clasificación de la red muestran los restos de un sendero que cruza los olivos formando una línea recta. Este área especial está recuadrada para mejor apreciación.



**Figura 3.-** La imagen de prueba que muestra uno de los lugares en que la calzada romana no sigue el camino moderno (arriba). La red SOM clasificó la imagen y detectó la calzada (abajo).

Para contrastar y validar los datos obtenidos por la red neuronal, se analizaron los resultados del georádar, que confirmó la existencia de restos enterrados en la calzada. A lo largo de todo este tramo, el GPR localizó restos a diferente profundidad, tanto de la calzada romana como de los edificios alzados a los lados de dicha vía. En la **Figura 4** se muestra a modo de ejemplo el radagrama de uno de los perfiles realizados perpendicularmente al camino de la Vía de la Plata dónde pueden verse 5 señales etiquetadas como 1, 2, 3, 4, 5 y 6, que corresponden con las zonas de interés.



**Figura 4.** Radagrama de uno de los perfiles perpendicularmente al camino de la Vía de la Plata que fueron realizados

### CONCLUSIONES.

En un contexto multidisciplinar hemos contrastado como la interpretación de fotografías aéreas con una red neuronal SOM puede ser utilizada como una herramienta para una mejor interpretación del sitio arqueológico de la ciudad romana de Cáparra.

El archivo fotográfico existente, con

fotogramas cenitales y oblicuos, tomadas desde satélite, avión o aerostat, desde el año 1956 hasta la actualidad, nos ha permitido analizar los cambios observados en la calzada e identificar y acotar el trazado original de la Ruta de la Plata, lo cual resulta prácticamente imposible de llevar a cabo sobre el terreno a simple vista. La adecuada aplicación de esta técnica nos ha permitido determinar la presencia del camino romano conocido actualmente como Vía de la Plata en una zona no excavada del yacimiento arqueológico, confirmando la tradicional direccionalidad de los caminos romanos, en contraposición con la desviación introducida en esa zona en el camino moderno.

El uso de GPR permite localizar objetos y estructuras de interés arqueológico que se encuentran enterrados en el subsuelo. Así mismo, esta prueba verificó los resultados obtenidos por los estudios llevados a cabo empleando la red neuronal SOM.

### BIBLIOGRAFÍA.

- Doneus, M.** *Precision mapping and interpretation of oblique aerial photographs*, Archaeological Prospection, 8, 13-27. (2001)
- Cavalli, R. M., F. Colosi, S. Pignatti and M. Poscolieri** *Buried street pattern investigated with airborne hyperspectral data*, in Proceedings of 1<sup>st</sup> International Symposium on Hyperspectral Analysis, Cáceres, Spain, 20-22 September 2000.
- Merényi, E., Farrand, W.H., Stevens, L.E., Melis, T.S., and Chhibber, K.,** "Studying the Potential For Monitoring Colorado River Ecosystem Resources Below Glen Canyon Dam Using Low-Altitude AVIRIS Data" Summaries of the Tenth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena, CA, February 23-25, 2000.
- Kohonen, T.,** *The Self-Organizing Map, Neurocomputing*, vol. 21, pp. 1-6, 1998
- Del Río, L. M., J.M. Paniagua, E. Serrano, A. Gutiérrez, A. Jiménez and M. Rufo:** *Prospección con geo-radar en cubetas de sobreexcavación glaciar: Cuenca Gen y Cuenca Bucer (Alto Campoo, Cantabria)*. In Proceedings of Estudios Recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, Montaña, Dinámica Territorial, Valladolid, Spain, septiembre, 2002, pp. 253-262.

### AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado con los proyectos *Cálculo de abundancias mediante Redes Neuronales a partir e Imágenes Hiperespectrales* TIC2000-0739-C04-03, y *Análisis Morfológicos no Supervisados para la extracción de referencias espectrales puras en imágenes Hiperespectrales de la Superficie Terrestre* (2PR01A08)