



ARTÍCULO

EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES APLICADO AL RECONOCIMIENTO MORFOLÓGICO DE ESTRUCTURAS DE IMPACTO EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

<http://www.revista.unam.mx/vol.16/num6/art43/>

Nancy Jiménez Martínez (Estudiante del Doctorado en Ciencias de los Materiales de la UAEH)

Raquel Díaz Hernández (Investigadora adscrita a la Dirección de Desarrollo Tecnológico del INAOE)

Silvia Ambrocio Cruz (Profesora-Investigadora del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAEH)

Màrius Ramírez Cardona (Profesor-Investigador del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales de la UAEH)

EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES APLICADO AL RECONOCIMIENTO MORFOLÓGICO DE ESTRUCTURAS DE IMPACTO EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

Resumen

El procesamiento de imágenes satelitales y de radar es el punto de partida en el mapeo geomorfológico y tiene la finalidad de coleccionar atributos que caractericen objetos por su forma, estructura o color. Este trabajo presenta el tratamiento de imágenes como paso inicial a la detección de cráteres de impacto. Así, se muestran los resultados del análisis de imágenes de radar (Radarsat-1) de los cráteres de impacto BP y Oasis (Libia), mismos que se usan como patrones de referencia para diferenciar entre cráteres de impacto y cráteres de origen volcánico. El análisis de las imágenes Radarsat-1 consistió en: filtrado (reducción del ruido *sal y pimienta*), segmentación (partición de la imagen en regiones con características comunes) y clasificación (agrupación de los píxeles con base en características de interés). Para el caso de la clasificación, este trabajo propone un proceso de identificación automática de estructuras de impacto en la superficie terrestre que, partiendo de la información extraída del filtrado y la segmentación, organiza o categoriza objetos geomorfológicos según su origen volcánico o de impacto. La relevancia del sistema computacional clasificador radica en que actúa con aprendizaje automático basado en redes neuronales artificiales (ANN).

Palabras clave: Radarsat-1, cráteres de impacto, BP, Oasis, efecto sal y pimienta, segmentación, clasificación por ANN, aprendizaje automático.

DIGITAL IMAGE PROCESSING APPLIED TO MORPHOLOGICAL RECOGNITION OF IMPACT STRUCTURES IN THE EARTH'S SURFACE

Abstract

Satellite and radar image processing is the starting point in the geomorphological mapping and aims to characterize objects by shape, structure or color. This paper presents these images correcting as the first step in the detection of impact craters, such as BP and Oasis (Libya), which have been characterized by analyzing radar images (Radarsat-1) and used as standards of reference to differentiate impact craters from those of volcanic origin. The analysis of Radarsat-1 imagery consists of: filtering (known as speckle), segmenting (partition of the image into regions with common characteristics) and classifying (grouping of pixels based on selected features). About this latter action, this paper proposes automatic processes that classify, from imagery data corrected from filtering and segmentation, the geomorphic objects into two groups: impact and volcanics. The relevance of this classifier computer system is that it acts with Machine Learning based on artificial neural networks (ANN).

Keywords: *Radarsat-1, impact craters, BP, Oasis, speckle effect, segmentation, ANN classification, machine learning.*

EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES APLICADO AL RECONOCIMIENTO MORFOLÓGICO DE ESTRUCTURAS DE IMPACTO EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

Introducción

El procesamiento digital de imágenes es un conjunto de técnicas y algoritmos computacionales que permiten la extracción de información. Estas técnicas se aplican en diversas áreas del conocimiento científico como, por ejemplo, en las ciencias de los materiales, donde las imágenes del microscopio electrónico de barrido son analizadas para estudiar las propiedades de un nuevo material; o en las ciencias planetarias, las cuales, como señala Lira (2002), son actualmente imposibles de concebir sin el apoyo del procesamiento digital de imágenes.

La percepción remota es una herramienta muy útil en la observación de áreas desérticas e inaccesibles, como es la región Este de Libia y del Desierto Oeste (Western Desert) en Egipto (EL-BAZ & GHONEIM, 2007). Esta área fue elegida como zona de estudio (Figura 1) ya que, como lo señala Ghoneim (2009), tiene un gran potencial para el descubrimiento de estructuras de impacto. Sin embargo, tanto las condiciones climáticas como el acceso a la zona dificultan las técnicas de estudio de campo, siendo los datos espaciales (imágenes de satélite y de radar) la manera más factible de escanear la superficie en busca de cráteres de impacto.

Es importante señalar que en la zona de estudio y en todo el Este del Sahara (Desierto Oeste de Egipto, lado Este de Libia, Noroeste de Sudán y Norte de Chad) hay un gran número de geoformas circulares (DI MARTINO *et al.*, 2006) con dos orígenes posibles: meteorítico o volcánico. Los cráteres Oasis, BP, Kamil y algunas estructuras del campo del Gilf Kebir, han sido confirmados como estructuras de impacto (ABATE *et al.*, 1999; KOEBERL *et al.*, 2005; PAILLOU *et al.*, 2004; FOLCO *et al.*, 2010). Por otro lado, de origen volcánico existen las siguientes estructuras: El-Baz, Clayton, Arkenu y parte de las estructuras del campo del Gilf Kebir (EL-BAZ, 1982; BARAKAT, 1994; CLAYTON, 1933; ORTI *et al.*, 2008). Finalmente, otras como Kebira e Ibn-Batutah requieren de estudios complementarios para confirmar su origen de formación (EL-BAZ y GHONEIM, 2007; GHONEIM, 2009). Por ello, es necesario desarrollar una metodología o herramienta que ayude a distinguir, en las imágenes espaciales, entre estos dos tipos de estructuras morfológicamente similares pero originadas por procesos de modelado superficial bien diferenciados.

Histograma de la imagen: consiste en una gráfica donde se muestra el número de pixel, *nk*, de cada nivel de gris, *rk*, que aparecen en la imagen.

Radar de Apertura Sintética (SAR): es un tipo de *sistema radar* que consiste en procesar, mediante algoritmos, la información capturada por la antena de un radar combinando varios barridos para integrar todas las lecturas en un sólo conjunto de datos. Acrónimo SAR en inglés de *Synthetic Aperture Radar*.

Speckle: ruido en una imagen de radar (llamado coloquialmente *sal y pimienta*).

Procesamiento digital de imágenes Radarsat-1

En la Figura 2 se muestran los pasos en la metodología empleada para procesar las imágenes Radarsat-1.

Adquisición

Las imágenes Radarsat-1 se obtuvieron de la página de la Agencia Espacial Canadiense (2012), y se combinaron para obtener un mosaico que cubriera la zona de estudio (Figura 1). Los parámetros característicos de las imágenes originales de las áreas geográficas de Egipto y Libia utilizadas se presentan en la Tabla 1. Para este trabajo se utilizaron solamente las sub-imágenes Radarsat-1 de los cráteres Oasis y BP.

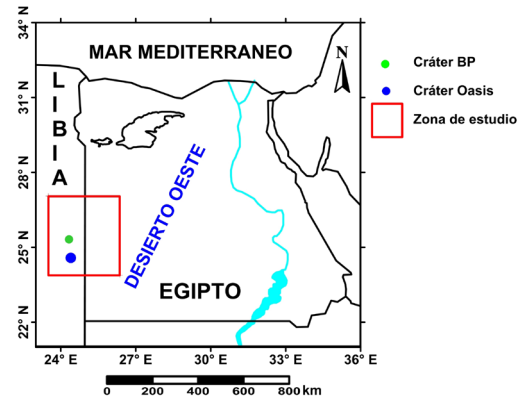


Figura 1. Zona de estudio.

PARÁMETRO	Egipto	Libia
Coordenadas geográficas	31°59'31.46" N, 24°33'26.27" E	33°17'15.70" N, 8°22'19.00" E
(de esquina Noroeste y en dirección de las manecillas del reloj)	31°33'08.91" N, 37°06'35.81" E 21°21'17.48" N, 35°54'11.23" E 21°39'56.80" N, 24°13'53.61" E	33°27'15.33" N, 25°52'31.60" E 19°06'36.32" N, 25°18'38.12" E 19°00'27.23" N, 9°29'04.36" E
Plataforma del Satélite	Radarsat-1°	Radarsat-1°
Modo del haz (<i>Beam mode</i>)	ScansAR Narrow	ScansAR Narrow
Tamaño de la imagen	45124 líneas x 48633 pixeles	62753 líneas x 66962 pixeles
Cuantización	8 bits	8 bits
Proyección geográfica	Lambert Azimuthal Equal-Area	Lambert Azimuthal Equal-Area
Tamaño del píxel (m)	25 x 25	25 x 25
Modo de adquisición	Amplitud	Amplitud
Polarización	HH	HH

Tabla 1. Parámetros imágenes RADARSAT-1.

Realce o mejoramiento Efecto sal y pimienta (*Speckle*)

La antena del sistema de Radar de Apertura Sintética (SAR) produce una serie de ondas de fases de pulsos electromagnéticos coherentes que interactúan con la superficie terrestre. En el campo instantáneo de visión irradiado

por estos pulsos, existe un cierto conjunto de objetos que realizan una dispersión cuando su tamaño es comparable con la longitud de onda del radar. Estos objetos retrodispersan la radiación entrante en diferentes direcciones y fases, generando un fenómeno ondulatorio constructivo y destructivo. A este fenómeno de interferencia se le conoce como

efecto de coherencia de puntos (*speckle coherence effect*). En la imagen obtenida éstos aparecen como granularidad aleatoria formada por pixeles que tienen variaciones en el brillo (LIRA y FRULLA, 1998), efecto comúnmente llamado de *sal y pimienta*.

El efecto textural de la coherencia de puntos interviene en la visualización de la imagen como ruido y esta sal y pimienta dificulta ostensiblemente la interpretación de las imágenes alterando la información propia e inheren-

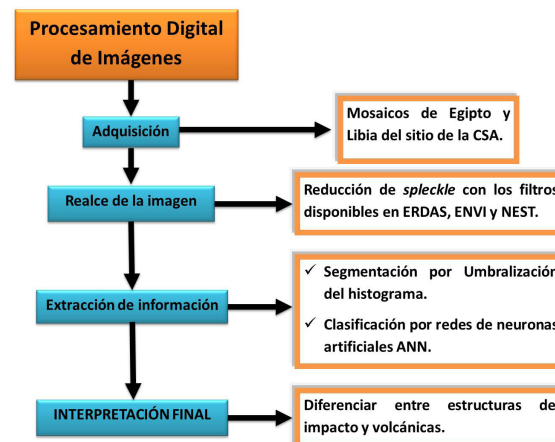


Figura 2. Pasos en el procesamiento digital de imágenes Radarsat-1.

te del terreno. Para corregir este efecto se utilizaron filtros, que son algoritmos que permiten obtener datos confiables a partir de una fuente ruidosa. En este trabajo, los algoritmos aplicados para filtrar la imagen de la zona de estudio están disponibles en los programas informáticos ENVI 4.5 (Exelis Visual Information Solutions, 2014), NEST 4C-1.1 (ESA Earth Online, 2014) y ERDAS IMAGINE 9.2 (InfoSat Geomática, 2014). Todos ellos están especializados en el tratamiento y análisis de imágenes espaciales.

Para realizar una evaluación de la reducción del efecto o ruido sal y pimienta (*speckle*) de cada filtro se puede considerar primeramente un análisis visual de la imagen junto con un análisis cuantitativo considerando factores como la media, la desviación estándar y el factor *speckle* (LIRA y FRULLA, 1998) ya que, como lo señalan Shi y Fung (1994), un buen filtro debe mantener la media promedio de una imagen. La capacidad de un filtro para reducir el *speckle* se puede cuantificar con el **factor ENL** (número de *looks* efectivos), el cual está relacionado con la resolución radiométrica de la imagen.

Para realizar un análisis visual se tomó una subimagen en la cual se observa la estructura llamada Oasis reconocida como cráter de impacto, perteneciente al mosaico original de la zona de estudio. La Figura 3 muestra la imagen sin filtrar. En la Figura 4 se expone el filtro menos eficiente, mientras que en la Figura 5 se presenta la misma subimagen pero filtrada con el método más óptimo. En la Tabla 2 se exhiben los datos cuantitativos obtenidos después de aplicar los filtros disponibles en ENVI 4.5 (Exelis Visual Information Solutions, 2014.), NEST 4C-1.1 (ESA Earth Online, 2014) y ERDAS IMAGINE 9.2 (InfoSat Geomática, 2014). Al observar y comprobar con los datos de la Tabla 2 que el filtro más eficiente es el *Refined Lee* de NEST 4C-1.1, se le aplicó éste mismo a la subimagen del cráter BP.

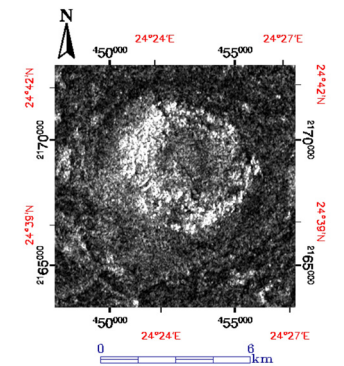
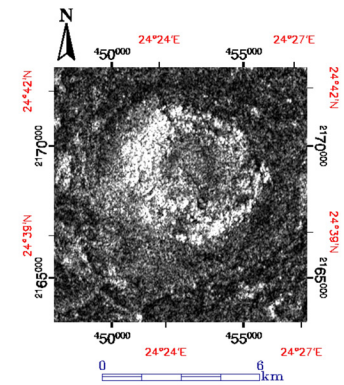


Figura 3. Sub-imagen del cráter Oasis sin filtrar.

Figura 4. Sub-Imagen en la que se le aplicó el filtro Sigma Local de ENVI 4.5.

Glosario

Factor ENL: cuantifica la capacidad de un filtro para reducir el ruido. Cálculo estadístico resultante de elevar al cuadrado el cociente μ/σ de la media entre la desviación estándar de la imagen ya filtrada, donde μ es la media de la imagen de radar filtrada y σ es la desviación estándar de la imagen de radar filtrada.

Extracción de la información

Segmentación por umbralización del histograma

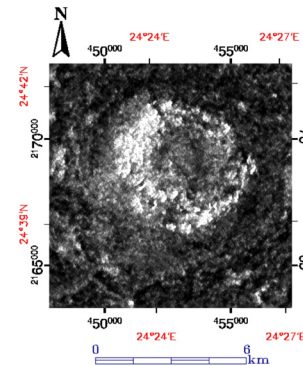
Segmentar es partir o dividir una imagen en regiones, que pueden o no tener un significado relativo en la escena respectiva. Este proceso puede llevarse a cabo con base en una serie de modelos y criterios: por regiones, por bordes o líneas, por propiedades espectrales (tono, color, firma espectral), por propiedades espaciales (tamaño, forma y orientación) o por una combinación de estas dos últimas.

La segmentación de una imagen basada en el **histograma** es una de las técnicas más sencillas y por ello más empleadas. Éste se utiliza para seleccionar los niveles de grises con el fin de agrupar píxeles en regiones. En general, se puede considerar que una imagen tiene dos entidades: el fondo (*background*) y el objeto. En el fondo, generalmente, un nivel de gris ocupa la mayor parte de la imagen, el cual, por lo tanto, es un pico grande en el histograma. El objeto o subobjeto de la imagen es otro nivel de gris, y es otro pico más pequeño en el histograma. Básicamente consiste en escoger un punto umbral que divida los dos picos de la imagen. La umbralización toma cualquier pixel cuyo valor está del lado del objeto y le da el valor de uno y a los demás de cero. Este proceso se desarrolló en el software MV Tec Halcon 9.0 (MV Tec Software GmbH, 2014). En la Figura 6 se presentan los histogramas umbralizados de las subimágenes ya filtradas del Oasis y BP.

Tabla 2. Parámetros cuantitativos para evaluar la reducción del ruido “sal y pimienta” (*speckle*) en la sub-imagen del cráter Oasis. En rojo se resalta el filtro menos eficiente y en amarillo el más óptimo.

	Filtro	Media (μ)	Desviación Estándar (σ)	Speckle Factor (σ/μ)	ENL [$(\mu/\sigma)^2$]
	Imagen Original	72.384	53.658	-	-
ENVI 4.5	Lee	72.012	49.992	0.694	2.075
	Enhanced Lee	70.408	47.650	0.677	2.183
	Frost	71.617	47.331	0.661	2.290
	Enhanced Frost	71.351	47.550	0.666	2.252
	Gamma	71.866	47.472	0.661	2.292
	Kuan	70.928	48.572	0.685	2.132
	Sigma Local	72.142	52.718	0.731	1.873
NEST 4C-1.1	Mean	72.384	46.707	0.645	2.402
	Median	71.671	48.943	0.683	2.144
	Frost	72.258	46.837	0.648	2.380
	Gamma Map	72.383	46.709	0.645	2.401
	Lee	72.383	46.708	0.645	2.402
	Refined Lee	72.877	45.600	0.626	2.554
ERDAS 9.2	Mean	72.378	46.701	0.645	2.402
	Median	71.665	48.934	0.683	2.145
	Lee-Sigma	68.932	47.809	0.694	2.079
	Local-Region	71.583	51.559	0.720	1.928
	Lee	71.783	47.379	0.660	2.295
	Frost	71.546	51.790	0.724	1.908
	Gamma-Map	71.111	47.346	0.666	2.256

Figura 5. Sub-Imagen en la que se le aplicó el filtro *Refined Lee* en NEST 4C-1.1.



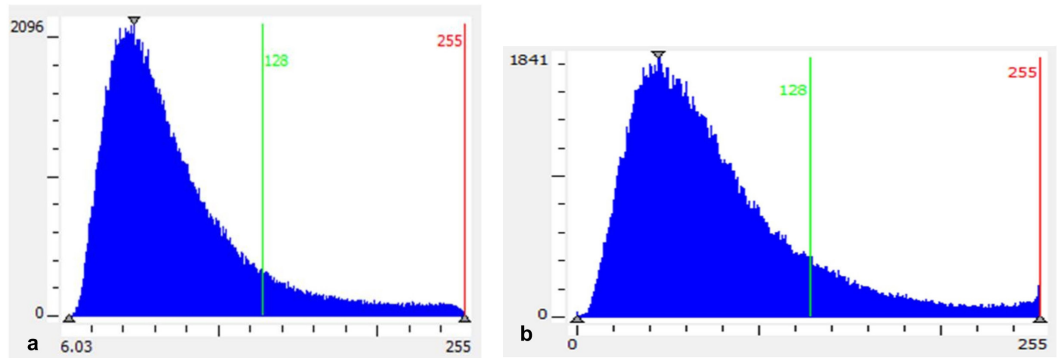
Descriptores morfológicos

Los descriptores morfológicos son rasgos de fácil evaluación para describir el estado morfológico de un objeto. Los que se consideraron como los más idóneos para identificar un cráter de impacto, son: área, redondez, circularidad y convexidad, de los cuales, cabe mencionar, son operadores del software MV Tec Halcon 9.0 (MV Tec Software GmbH, 2014). Después de la segmentación de las subimágenes de las estructuras Oasis y BP, se obtuvieron dos imágenes (Figuras 7a y 8a) con una serie de regiones. En ellas se puede observar que el fondo, en este caso el pavimento desértico, ya no está presente y sólo se preservó el objeto de estudio es decir, los cráteres. A continuación se le dio la instrucción al programa para que conecte o agrupe a las regiones que tengan las mismas características (Figuras 7b y 8b). La imagen final es la que sólo contiene a las regiones con valores en los descriptores morfológicos, acorde a los que se esperarían encontrar en una estructura de impacto (Figuras 7c y 8c). Se cuantificaron los descriptores morfológicos en el mosaico de la zona de estudio completa para poder realizar, posteriormente, una segmentación y un reconocimiento de posibles restos de estructuras de impacto.

Glosario

Histograma (o distribución): gráfica que muestra la frecuencia con que aparece cada dato en una muestra. El histograma también recibe el nombre de distribución, ya que ilustra la frecuencia en la que ocurren los datos.

Figura 6. Umbralización de histogramas. a. Histograma de las sub-imágenes del cráter Oasis. b. Histograma de las sub-imágenes del cráter BP.



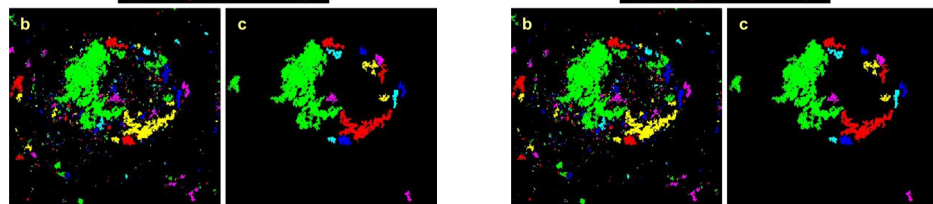
Clasificación de las zonas de interés

El siguiente paso para conseguir una herramienta útil en el reconocimiento de cráteres consiste en realizar una clasificación de sus distintos tipos que ya han sido localizados y estudiados, y en los que se ha comprobado su naturaleza y estructura meteorítica, sin importar su posición geográfica. Posteriormente, es posible entrenar a un clasificador para que, a partir de las geoformas preestablecidas, pueda identificar nuevas estructuras. Con este fin, nos basaremos en el aprendizaje automático, disciplina que se encarga de estudiar cómo construir sistemas computacionales que realicen cada vez mejor una tarea mediante la experiencia. La mencionada construcción irá enfocada al concepto de *clasificación*, que se refiere a la descripción general de un objeto como perteneciente a una clase natural de objetos semejantes. El objetivo de los algoritmos de clasificación es inducir un modelo para predecir la clase que identifica un objeto dados los valores de los atributos o características que lo representan (MARIN, 2012).

Figura 7. Imágenes segmentadas, por umbralización del histograma, del cráter Oasis.



Figura 8. Imágenes segmentadas, por umbralización del histograma, del cráter BP.



Existen diversas técnicas para generar conjuntos de clasificadores, que van desde la manipulación de los datos de entrada hasta la utilización de metaaprendizaje. Una de las maneras con las que se clasifican estas técnicas es por el número de algoritmos de aprendizaje diferentes que utilizan con el fin de generar los miembros del conjunto. De aquéllas que utilizan un único algoritmo para generar todos los miembros del conjunto,

se dice que generan un conjunto homogéneo. Por otra parte, se considera que las que utilizan más de un algoritmo para generar los clasificadores forman un conjunto heterogéneo. A través del aprendizaje automático se pueden producir tres tipos de conocimiento. Cada tipo dependerá del tema que se desee aprender.

- **Crecimiento:** es el que se adquiere de lo que nos rodea. Éste guarda la información en la memoria como si dejara huellas.
- **Reestructuración:** al interpretar los conocimientos el individuo razona y genera uno nuevo.
- **Ajuste:** es el que se obtiene al generalizar varios conceptos o generando los propios.

A su vez, existen algoritmos que son utilizados en el aprendizaje automático para la generación de conocimiento y el mejoramiento en el rendimiento de los sistemas computacionales. Los más utilizados se mencionan a continuación:

- **Aprendizaje supervisado:** produce una función que establece una correspondencia entre las entradas y las salidas deseadas del sistema, inicialmente se indica el número de clases que deben existir en los datos.
- **Aprendizaje no supervisado:** todo el proceso se lleva a cabo sobre un conjunto de ejemplos formado por entradas al sistema. No existe información previa de las clases que conforman dichas entradas.
- **Aprendizaje por refuerzo:** el algoritmo aprende observando el mundo que lo rodea. Su información de entrada es la retroalimentación que obtiene del exterior en función de sus acciones. El usuario, por medio de una función de evaluación, puede establecer si los resultados que arroja el algoritmo son correctos o no.

El uso independiente o combinado de estos algoritmos permite generar herramientas potentes para la clasificación de objetos. En este caso particular, los objetos son los cráteres, y los descriptores del conjunto son las características geomorfológicas de cada uno de ellos. Algunos algoritmos requieren del entrenamiento para funcionar de manera adecuada antes de probar con el conjunto de interés. Es por ello que en este trabajo se utilizan imágenes de cráteres localizados por toda la superficie terrestre, los cuales deben ser analizados para extraer sus geoformas de manera automática y usar dichos datos como entrada al clasificador utilizado.

Las redes neuronales artificiales, ANN por sus siglas en inglés, son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas que colaboran entre sí para producir un estímulo de salida. En el ámbito del aprendizaje automático es frecuente referirse a ellas como redes de neuronas o redes neuronales (GONZALES y WOOD, 2002).

Para este trabajo se propone usar una red del tipo *backpropagation*, pues es la que más se adapta al problema que se está solucionando. Para este caso se le presentan ejemplos de cráteres, mismos que son aprendidos por la red. Las imágenes de estos son previamente procesadas (como ya se describió), para luego introducir los resultados a la red. Una red *backpropagation* se caracteriza por tener una arquitectura en niveles y

conexiones estrictamente hacia adelante entre las neuronas, no hacia atrás (*feedback*) ni laterales entre las neuronas de la misma capa. Utiliza aprendizaje supervisado.

Trabajo en proceso

Hasta este punto, se ha logrado identificar las características que definen los tipos de cráteres estudiados en este trabajo, y ya se tiene, por otra parte, el grupo de entrenamiento para el clasificador que será una red neuronal (ANN). El grupo de entrenamiento consta de imágenes de cráteres meteoríticos localizados en África. El siguiente paso que se realizará es el análisis de toda la región que se cubre con las imágenes Radarsat-1 de Egipto y Libia con las que se cuenta (descritas anteriormente). La finalidad es identificar, extraer y clasificar nuevos cráteres aún no explorados y determinar si éstos fueron formados por impacto o por un volcán.

Conclusiones

Una vez que la imagen ha sido segmentada se debe llevar a cabo una descripción de sus partes para poder identificar el objeto que se encuentra contenido en ella. El tipo de características que se extraen de los objetos depende de la aplicación. Éstas pueden ser con respecto a su morfología o bien a su estructura, por lo que puede obtenerse el área, perímetro, forma o color, entre otros. En este trabajo se han logrado determinar exitosamente las características de varios cráteres de impacto, con las cuales será posible el entrenamiento de una red neuronal.

La gran utilidad derivada de este estudio se halla en la posibilidad de encontrar zonas de impacto sin tener que realizar las expediciones al sitio de interés, evitando con esto altos costos de traslado y tiempo. El producto final derivado de este trabajo será un algoritmo robusto que pueda discernir claramente entre una estructura volcánica y un cráter meteorítico. Posteriormente, la información podrá ser corroborada en otras imágenes y, en caso de necesidad, por medio de una excursión directa al sitio establecido previamente, garantizando de antemano que se tendrá la ubicación geográfica correcta gracias a la posibilidad de trazar rutas óptimas en lugares con climas extremos y topográficamente casi inaccesibles. 🌟

Bibliografía

- [1] ABATE, B., C. Koeberl, F. J. Kruger y J. R. Underwood Jr., “BP and Oasis impact structures, Libya, and their relation to Libyan Desert Glass”, en Dressler, B.C., Sharpton, V.L., (Eds.) *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II*, Geological Society of America, Inc., 1999, Special Paper 39, pp. 177-192.
- [2] BARAKAT A., “El-Baz crater: basaltic intrusion versus meteoritic impact crater”, *Annals of Geological Survey of Egypt*, 1994, Núm. XXIV, pp. 167-177.
- [3] BERMÚDEZ GONZÁLEZ *et al.*, “Estudio comparativo de algoritmos para la reducción del “speckle” en imágenes SAR”, *Libro de Actas-URSI2006*, 2006 [en línea]: <http://www.ursi.usc.es/articulos_modernos/articulos.../sesionRAD-I-13small.pdf>.
- [4] CANADIAN SPACE AGENCY, 2012, [en línea]: <<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat1/mosaic.asp>> [Consulta: 28 de agosto de 2012].
- [5] CIGOLINI C. *et al.*, “Endogenous and nonimpact origin of the Arkenu circular structures (al-Kufra basin –SE Libya)”, *Meteoritics & Planetary Science*, 2012, Vol. 47, Núm. 11, pp. 1772-1788.
- [6] CLAYTON, P. A., “The western side of the Gilf Kebir”, *Geogr. J.*, 1933, Núm. 81, pp. 254-259.
- [7] DI MARTINO M., *et al.*, “Non-impact origin of the Crater Field in the Gilf Kebir region (SW Egypt)”, *40th ESLAB First International Conference on Impact Cratering in the Solar System, 08-12 May. Proceedings*, Países Bajos: European Space Agency, European Space and Technology Centre (ESTEC), 2006, pp. 43-48.
- [8] EL-BAZ F. y Ghoneim E., “Largest crater shape in the Great Sahara revealed by multispectral images and radar data”, *International Journal of Remote Sensing*, 2007, Vol. 28, pp. 451-458.
- [9] EL-BAZ, F., “The ‘Uweinat Desert’ of Egypt, Libya and Sudan: a fertile field for planetary comparisons of crater forms”, en F. El-Baz y T.A. Maxwell (Eds.), *Desert landforms of southwest Egypt: a basis for comparison with Mars*, Washington DC: National Air and Space Museum, 1982, pp. 251-253.
- [11] ESA Earth Online, NEST 4C-1.1, 2014 [Software computacional] [en línea]: <<https://earth.esa.int/web/guest/-/nest-version-4c-1-1-released>>.
- [12] Exelis Visual Information Solutions, ENVI 4.5, 2014, [Software computacional] [en línea]: <<http://www.exelisvis.com/ProductsServices/ENVIProducts.aspx>>.
- [13] FOLCO, L. *et al.*, “The Kamil Crater in Egypt”, *Science*, 2010, Vol. 339, Núm. 5993, pp. 804.

- [14] GHONEIM E. M., "Ibn-Batutah: A possible simple impact structure in southeastern Libya, a remote sensing study", *Geomorphology*, 2009, Núm. 103, pp. 341-350.
- [15] GONZALEZ, R. C., R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [16] InfoSat Geomática, ERDAS IMAGINE, 2014, [Software computacional] [en línea]: <http://www.erdas.com.ar/productos_imagine.htm>.
- [17] KOEBERL, C., W.U. Reimold, J. Plescia, "BP and Oasis impact structures, Libya: Remote Sensing and Field Studies", en Koeberl C. y H., Henkel (Eds.), *Impact Tectonic*, Países Bajos: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, pp. 161-190.
- [18] LIRA, J. y L. Frulla, "An automated region growing algorithm for segmentation of texture regions in SAR images", *International Journal of Remote Sensing*, 1998, Vol. 19, Núm.18, pp. 3595-3606.
- [19] LIRA, J., *Introducción al tratamiento digital de imágenes. Ciencia de la computación*, México: Instituto Politécnico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica, 2002.
- [20] MARÍN CASTRO, Maribel Angélica, *Modelo Jerárquico para la clasificación de galaxias*, Luis Enrique Sucar Sucar, Jesús A. González Bernal y Raquel Díaz Hernández [dir.], Tesis de Maestría, Puebla: INAOE, 2012.
- [21] MVTec Software GmbH, MVTEC HALCON 9.0, 2014, [Software computacional] [en línea]: <<http://www.mvtec.com/>>.
- [22] ORTI, L., *et al.*, "Non-impact origin of the crater-like structures in the Gilf Kebir area (Egypt): Implications for the geology of Eastern Sahara", *Meteoritics & Planetary Science*, 2008, Vol. 43, Núm. 10, pp. 1629-1639.
- [23] PAILLOU, Ph. *et al.*, "Discovery of the largest crater field on Earth in the Gilf Kebir region, Egypt", *Comptes Rendus Geoscience*, 2004, Núm. 336, pp. 1491-1500.
- [24] SHI ZHENGHAO y B. Fung Ko, "A Comparison of Digital Speckle Filters", *Proceedings of IGARSS*, 1994, Núm. 94, pp. 2129-2133.