



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe) ISSN 0079-1091

## Modelamiento prospectivo de minerales usando Sistemas de Información Geográfica caso de estudio: La Libertad, Perú

Ramiro Santiago<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Lima 25, Perúmann.

### RESUMEN

La identificación de nuevos blancos de exploración mediante la prospección mineral suele incluir la revisión de toda la información disponible, interpretación de mapas geológicos, geoquímicos, geofísicos, datos de sensores remotos y más recientemente, el modelamiento de prospectividad mineral basado en Sistemas de Información Geográfica (Kaveh Pazand & Ardeshir Hezarkhani, 2018; Abbaszadeh, S. et al., 2017; Pazand, K. and Hezarkhani, A., 2016; Mahyar et al., 2014; Andrada de Palomera et al., 2014; Ford, A. et al., 2013; Ezequiel Costa e Silva et al., 2012; Colin T. Barnett et al., 2012; Juan P. Rigol-Sánchez et al., 2011; Nykänen et al., 2011; Carranza, E.J.M. et al., 2010; Alok Porwal et al., 2010).

Este estudio integró datos del tipo litológico, estructural, geoquímico y de sensores remotos, usando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para presentar modelos predictivos de ocurrencias del tipo pórfido y epitermal. Esta integración de todos los datos se hizo empleando técnicas de Lógica Difusa. El estudio fue llevado a cabo en un área entre las hojas IGN de Santiago de Chuco y Santa Rosa principalmente. La efectividad de esta técnica de procesamiento para identificar targets favorables con potencial para mineralización económica fue validada mediante la comparación de los targets predictivos con las ocurrencias conocidas de la zona de estudio. El mapa predictivo final del área de estudio, delinea aproximadamente el 30% del área de estudio como favorable para la mineralización y predice al menos el 49% de las

ocurrencias conocidas y el 64% de las ocurrencias desconocidas.

**Palabras clave:** SIG, Lógica Difusa.

### ABSTRACT

The identification of new exploration targets through mineral prospecting often includes the review of all available information, interpretation of geological, geochemical and geophysical maps, remote sensing data and, more recently, the modeling of mineral prospectivity based on Geographic Information Systems (Andrada de Palomera et al., 2014; Ford, A. et al., 2013; Ezequiel Costa e Silva et al., 2012; Colin T. Kaveh Pazand & Ardeshir Hezarkhani, 2018; Abbaszadeh, S. et al., 2017; Pazand, K. and Hezarkhani, A., 2016; Mahyar et al., 2014; Andrada de Palomera et al., 2014; Ford, A. et al., 2013; Ezequiel Costa e Silva et al., 2012; Colin T. Barnett et al., 2012; Juan P. Rigol-Sánchez et al., 2011; Nykänen et al., 2011; Carranza, E.J.M. et al., 2010; Alok Porwal et al., 2010).

This study attempts will integrate data lithological, structural, geochemical and remote sensing type, using Geographic Information Systems (GIS) to present predictive models of occurrences of porphyry and epithermal type. This integration of all the above data will be employing Fuzzy Logic technique. The study is conducted in an area between the IGN sheets of Santiago de Chuco and Santa Rosa mainly. The effectiveness of this processing technique to identify favorable targets with potential for economic mineralization will

be validated by comparing the predictive targets with known occurrences of the study area. The final predictive map of the study area delineates approximately 30% of the study area as favorable for mineralization and predicts at least 49% of known occurrences and 64% of unknown occurrences.

**Keywords:** GIS, Fuzzy Logic, WofE, Fuzzy Values.

## ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio cubre más de 3,000 km<sup>2</sup> en los departamentos de La Libertad y Ancash. El área se encuentra aproximadamente 17 km al norte de la ciudad de Chimbote y aproximadamente 49 km al sur este de la ciudad de Trujillo. La zona de estudio escogida, cuyos datos fueron extraídos del GEOCATMIN en formato Shape, tiene básicamente un historial de escasas ocurrencias principalmente de oro, además de que no se había aplicado el método de predicción de targets mediante las técnicas de los Sistemas de Información Geográfica.

Los tipos de depósitos en el área de estudio corresponden principalmente a Epitermales de baja y alta sulfuración y según el INGEMMET en esta área de estudio está comprendida la franja metalogenética XXI que corresponde a los Epitermales de Au-Ag del Mioceno hospedados en rocas volcánicas cenozoicas y la franja X que vienen a ser los Pórfidos de Cu-Mo del Cretáceo Superior.

## TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Esta metodología incluye cuatro pasos principales. El primer paso consiste en la introducción de datos espaciales dentro del SIG. El segundo paso involucra el desarrollo del modelo conceptual basado en la literatura acerca de los modelos empíricos sobre pórfidos y epitermales, estudio de las principales características de los depósitos minerales que existen en el área y el establecimiento del criterio para el reconocimiento de zonas favorables para la ocurrencia de este tipo de depósitos. Basado en el modelo de exploración conceptual, el tercer paso incluye procedimientos para extraer y realzar las características geológicas asociadas con los tipos de depósitos del área de estudio y crear mapas de evidencia que serán usados en el modelamiento predictivo. El último paso consiste en la integración de los mapas de evidencia y validación del (los) mapa(s) predictivo(s).

## ANÁLISIS DE ASOCIACIÓN ESPACIAL USANDO FUZZY LOGIC

Para cuantificar la asociación espacial entre los depósitos minerales y las características geológicas se puede usar varios métodos, algunos empíricos basados en datos, como Pesos de Evidencia, Regresión Logística, Redes Neuronales, etc., y otros conceptuales como el de la Lógica Difusa, que se basa en la experiencia del geólogo, el cual voy a utilizar en este estudio. An et al. (1991), Bonham-Carter (1994) e Raines et al. (2010) usaron los operadores de lógica difusa más útiles para combinar mapas en la exploración de minerales: AND, OR, PRODUCTO Algebraico Fuzzy, SUMA Algebraica Fuzzy y GAMMA.

Para este estudio, combiné los conjuntos difusos de evidencia en un número de pasos para representar las hipótesis intermedias con respecto al significado de las evidencias para la ocurrencia de mineralización.

Hay 3 hipótesis intermedias. Primero, la combinación de las anomalías dejadas por los sedimentos de quebrada representadas por Ag, Cu, Pb, Zn y Au. Segundo, la combinación de las alteraciones hidrotermales y tercero, las ocurrencias combinadas de geoquímica y alteración hidrotermal que nos van a indicar las zonas mineralizadas.

La Figura 1 muestra la red de inferencia para predecir el potencial minero en el área de estudio y la Figura 2 es el mapa predictivo resultante.

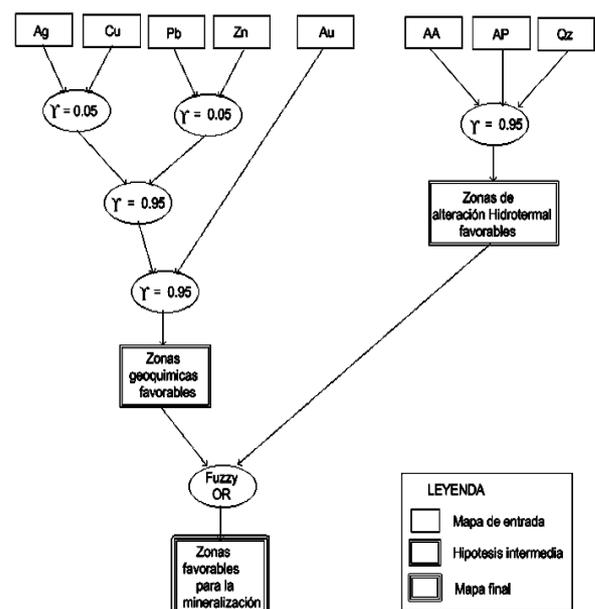


Fig. 1. Red de inferencia para predecir el potencial minero en el área de estudio

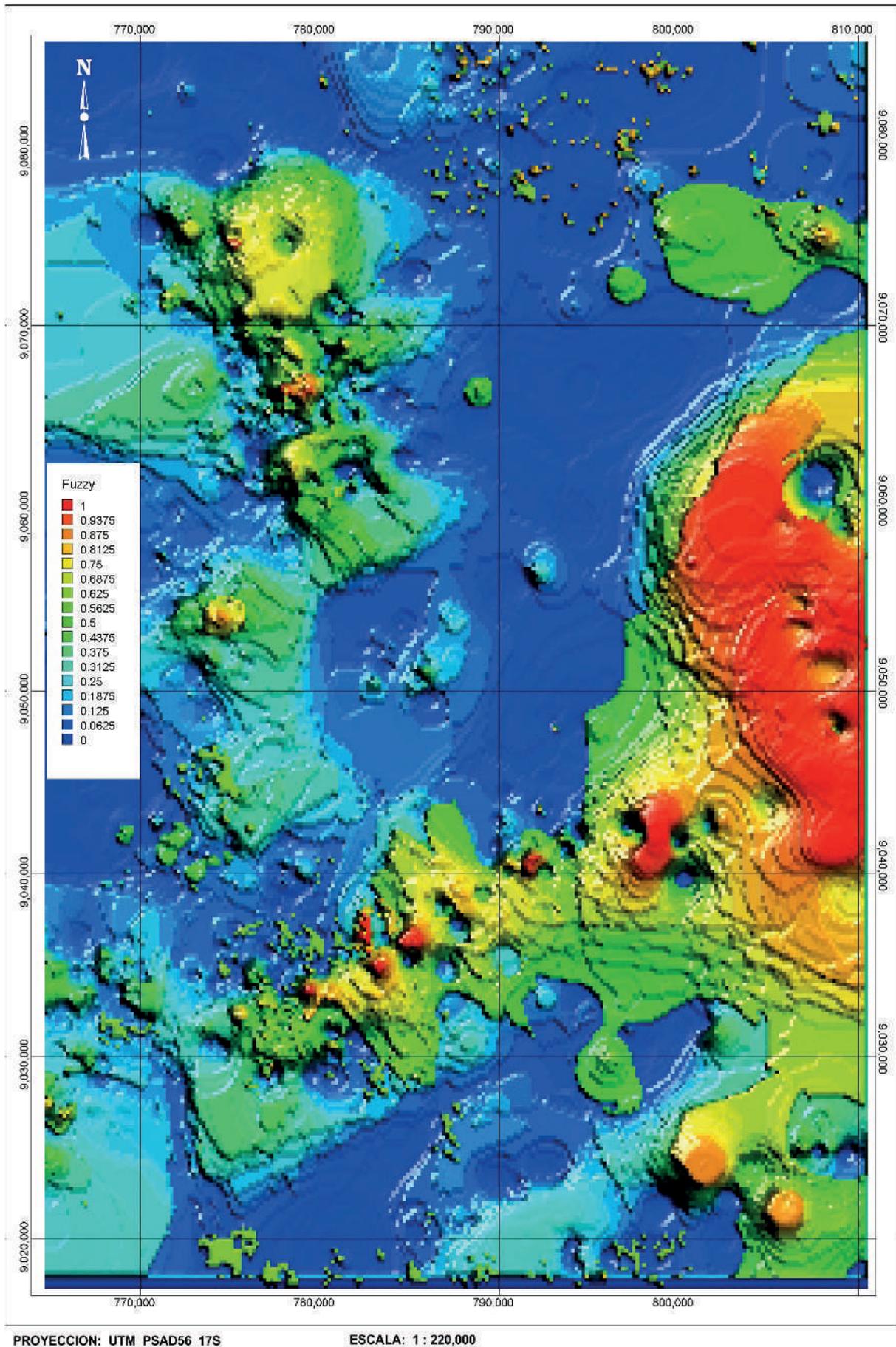


Fig. 2. Mapa predictivo integrado del Potencial minero del área de estudio.

## CONCLUSIONES

1. La aplicación del método Fuzzy Logic para el modelamiento del potencial minero proporciona una subjetiva aunque cuantitativa técnica para predecir el potencial minero donde se conoce un número de depósitos u ocurrencias.

2. Es importante tener un conocimiento cualitativo y cuantitativo de la asociación espacial entre las ocurrencias minerales conocidas y las características geológicas. Ambos conocimientos son útiles en la decisión subjetiva de elegir los valores Fuzzy apropiados. Un conocimiento cualitativo por si solo ha demostrado ser insuficiente para producir un mapa Fuzzy predictivo.

3. La aplicación del método Fuzzy Logic no requiere validación estadística de los resultados; solo se aplica la lógica para determinar el significado geológico de los resultados.

4. Algunas de las ventajas de automatizar el proceso de integrar mapas binarios son:

(i) Proporciona un registro de auditoria que muestra el proceso de clasificación de áreas en el mapa. Por lo tanto, el mismo mapa de potencial mineral puede ser reproducido, usando los mismos pasos de procesamiento.

(ii) Esto garantiza que un modelo de exploración sea formulado en términos concretos, dando las bases para el intercambio de ideas entre el equipo de geólogos.

(iii) Proporciona una herramienta para desarrollar una variedad de escenarios, permitiendo que modelos de exploración alternativos sean evaluados con los mismos datos. Este aspecto experimental permite que se realice un análisis de sensibilidad.

(iv) Asociaciones espaciales hasta ahora desconocidas puedan ser reveladas y testeadas.

5. Hay también algunas desventajas:

(i) Este proceso podría convertirse en una caja negra, tal que el geólogo de exploración falla al no entender el proceso de modelado, confiando en una persona experta en GIS para llevar a cabo el análisis.

(v) Los datos pueden estar demasiado dispersos o incompletos para permitir que se construyan capas completas, debido a que hay mucha información faltante. En las zonas insuficientemente explora-

das, este sea probablemente el mayor problema.

Una desventaja algunas veces citada es que el proceso de modelamiento es demasiado lento y laborioso para que esta sea una metodología factible en el mundo acelerado de la exploración donde se necesitan decisiones en un lapso corto de tiempo. Esto puede ser cierto si el tiempo tomado para crear una base de datos digital es incluido. Sin embargo, si ya tenemos la base de datos construida, el 95% del trabajo ya está hecho. El modelado de integración real puede llevarse a cabo rápidamente por un grupo experimentado.

6. Se recomienda aplicar Fractales para mejorar la identificación de anomalías geoquímicas dado que es posible encontrar anomalías ocultas con este método, así como para realzar la identificación de Estructuras, las anomalías hidrotermales extraídas con sensores remotos y también la data geofísica.

## REFERENCIAS

Alok Porwal, González-Álvarez, I., I., Markwitz, V., McCuaig, T.C., Mamuse, A., (2010). Weights-of-evidence and logistic regression modeling of magmatic nickel sulfide prospectivity in the Yilgarn Craton, Western Australia. *Ore Geol. Rev.* 38, 184–196.

An Ping, Wooil Moon, and Andy Rencz, (1991). Application of Fuzzy Set theory to integrated mineral exploration in *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, v. 27, 11p.

Andrada de Palomera, P., Frank J.A. van Ruitenbeek, Emmanuel John M. Carranza, (2014). Prospectivity for epithermal gold–silver deposits in the Deseado Massif, Argentina, *Ore Geology Reviews*, 18p.

Bonham-Carter, G. F., (1994) *Geographic Information Systems for geoscientists, modelling with GIS*, Pergamon, Oxford, 398p.

Carranza, E.J.M., Sadeghi, (2010). Predictive mapping of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden). *Ore Geol. Rev.* 38, 219–241.

Colin T. Barnett and Peter M. Williams, (2012). *A Radical Approach to Exploration, Let the Data Speak for Themselves!*, BWMining, 11p.

Ezequiel Costa e Silva, Adalene M. Silva, et al., (2012). Mineral Potential Mapping for Orogenic Gold Deposits in the Rio Maria Granite

Greenstone Terrane, Southeastern Pará State, Brazil. *Economic Geology*, v. 107, 15p.

Ford, A., Hart, C.J.R., (2013). Mineral potential mapping in frontier regions: a Mongolian case study. *Ore Geol. Rev.* 51, 15–26.

Juan P. Rigol-Sánchez, M. Chica-Olmo, et al., (2011). Cartografía predictiva mediante SIG de depósitos Epitermales de Oro en cabo de gata, Almería, España, *Boletín Geológico y Minero*, 122 (4), 14p.

Nykänen, V., Karinen, T, Niiranen, T. & Lahti, I., (2011). Modelling the Gold Potential of Central Lapland, Northern Finland, Geological Survey of Finland, Special Paper 49, 12p.

Pedro Navarro Colque, Marco Rivera Porras, Robert Monge Miguel, (2010). “Características Metalogenéticas de los yacimientos asociados al Grupo Calipuy en La Libertad y Ancash”, *Boletín N°28, Serie D, Estudios Regionales, INGEMMET*, 200p.

Raines, G.L, Sawatzky, D.L, and Bonham-Carter, G.F., (2010). New fuzzy logic tools in ArcGis 10: ArcUser, ESRI, 13 p.

Sillitoe, R.H., (2010). Porphyry Copper Systems, *Economic Geology*, v. 105, pp. 3–41.

Yousefi, Mahyar and Emmanuel John M. Carranza, (2014). Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping in *Computers & Geosciences*, 13 p.