

# Cartografía digital predictiva del potencial mineral mediante SIG de depósitos de fluorita en el noreste de México

## Digital prospectivity mapping of fluorite deposits in northeast Mexico using GIS

Roberto Díaz-Martínez<sup>1,\*</sup>, Leonela Aimee González-Martínez<sup>1</sup>, José Alberto Batista-Rodríguez<sup>1</sup>, Alberto Hernández-Rosales<sup>1</sup>, Jesús Antonio Blanco-Moreno<sup>1</sup>, Ramón Yosvanis Batista-Cruz<sup>1</sup>, Yuri Almaguer Carmenates<sup>1</sup>, Antonio Rodríguez Vega<sup>1</sup>, Felipe de Jesús López Saucedo<sup>1</sup>, Alberto Ramón Vila Sánchez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior de Ingeniería "Lic. Adolfo López Mateos", UADEC, Boulevard Adolfo López Mateos s/n, Nueva Rosita, Coahuila de Zaragoza. 26800, Coahuila, México.

<sup>2</sup>Minera Águila Plateada SA. de CV, Calle Jaime Balmes No. 11. Torre A, Planta Alta Local 111. Piso 3. Colonia Los Morales, Polanco, Miguel Hidalgo, 11510, CDMX, México.

\* Autor para correspondencia:  
(R. Díaz-Martínez) [rdmart91@gmail.com](mailto:rdmart91@gmail.com)

### Cómo citar este artículo:

Díaz-Martínez, R., González-Martínez, L.A., Batista-Rodríguez, J. A., Hernández-Rosales, A., Blanco-Moreno, J. A., Batista-Cruz, R. Y., Almaguer Carmenates, Y., Rodríguez Vega, A., López Saucedo, F. J., Vila Sánchez, A. R., 2020, Cartografía digital predictiva del potencial mineral mediante SIG de depósitos de fluorita en el noreste de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 72 (3), A090520. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020 v72n3a090520>

Manuscrito recibido: 11 de Diciembre de 2019  
Manuscrito corregido: 1 de Mayo de 2020  
Manuscrito aceptado: 9 de Mayo de 2020

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

## RESUMEN

La cartografía del potencial mineral se fundamenta en la elaboración de modelos de probabilidad de ocurrencia de depósitos minerales, como base para el pronóstico metalogénico y la delimitación de áreas perspectivas. La región noreste de México ha sido cubierta por diferentes levantamientos geológicos, trabajos de exploración minera y estudios metalogénicos regionales y actualmente se reportan más de 160 depósitos y manifestaciones de fluorita. Sin embargo, no se han empleado los métodos que permiten el tratamiento, análisis e integración de las guías de exploración utilizados en la cartografía predictiva de potencialidad minera. En este contexto, surge la necesidad de iniciar trabajos de cartografía predictiva en México, que ayuden a minimizar los costos de la exploración minera por concepto de optimización de áreas potencialmente favorables para el descubrimiento de depósitos minerales. La información geológica, estructural, geoquímica y geofísica disponible del NE de México permite la aplicación de la cartografía del potencial mineral soportada en los sistemas de información geográfica. La metodología se basa en la estructuración de los datos primarios, la superposición ponderada y la integración y análisis de los datos mediante los modelos de lógica booleana y máxima entropía (MaxEnt). Los resultados obtenidos indican que el mapa de potencial mineral ofrece un buen predictor, debido a que se delimitan las áreas más favorables para la presencia de depósitos de fluorita, siendo la densidad estructural el parámetro que más influye con un 28.8% de contribución al modelo de potencialidad mineral.

**Palabras clave:** Cartografía del potencial mineral, fluorita, SIG, superposición ponderada, lógica booleana, máxima entropía.

## ABSTRACT

Prospectivity maps are based on probability models of occurrence of mineral deposits. It is the basis for the metallogenic prognosis and the delimitation of perspective areas. Different geological surveys have covered the northeastern region of Mexico, mining exploration works, and regional metallogenic studies and more than 160 deposits and manifestations of fluorite are currently reported. However, the methods that allow the manipulation, analysis and integration of the exploration guides used in the predictive cartography of mining potential have not been used. In this context, there is a need to start predictive mapping work in Mexico, which helps to minimize the costs of mineral exploration by optimizing areas potentially favourable to the occurrence of mineral deposits and discarding those areas without economic interest. The geological, structural, geochemical and geophysical information available is adequate to the application of prospectivity mapping supported by geographic information systems and based on the structuring of the primary data, the weighted overlap and the integration and analysis of the data through Boolean logic and maximum entropy models. Results indicate that the mineral potential mapping offers a good predictor because the areas with high prospectivity are correctly delimited as the most favourable for the occurrence of fluorite deposits. The structural density is the parameter that most influences with 28.8% of contribution to the mineral potentiality model.

**Keywords:** Mineral prospectivity mapping, fluorite, GIS, weighted overlap, Boolean logic, maximum entropy.

## 1. Introducción

La cartografía del potencial mineral (CPM) de depósitos minerales tiene sus antecedentes en los modelos de probabilidad de ocurrencias desarrollados por Cox y Singer (1986). Los mapas de pronóstico de áreas favorables para el descubrimiento de depósitos minerales tradicionalmente se realizaban mediante la superposición de los datos analógicos recopilados en forma de mapas para realizar un posterior análisis visual (Bonham-Carter, 1994).

La integración de la información geoespacial, mediante un proceso de digitalización y georeferenciación, ha permitido obtener un mapa predictivo que represente la distribución espacial de un indicador numérico de favorabilidad a la presencia de un tipo de depósito mineral (Rigol-Sánchez *et al.*, 2011a, 2011b). Para ello se emplean dos grupos de métodos: 1) los basados en los datos, los cuales requieren un conocimiento previo sobre la distribución espacial de los dominios mineros (Agterberg *et al.*, 1990; Bonham-Carter, 1994); y 2) los basados en criterio de experto, que dependen del conocimiento y la experiencia del geólogo explorador (Bonham-Carter, 1994; Harris *et al.*, 2008). Ambos requieren una plataforma automatizada sustentada en los sistemas de información geográfica (SIG).

Los trabajos de cartografía predictiva soportados en SIG han sido desarrollados en diferentes escenarios geológicos y considerados como un proceso de integración de datos espaciales de entrada para generar o producir información de salida (Burrough, 1986; Aronoff, 1989; Berry, 1993; Harris *et al.*, 2003; Oh y Lee, 2008). Este procedimiento ha continuado desarrollándose con la incorporación de nuevas técnicas para el mapeo del potencial mineral, como son las redes neuronales artificiales (Brown *et al.*, 2000).

Tradicionalmente, los SIG se han dividido en etapas, comenzando con la identificación y organización de los datos primarios, su procesamiento y cuantificación y, finalmente, mediante la integración y modelación de éstos, con el objetivo de encontrar áreas favorables para la exploración

minera. La tarea es compleja y multidisciplinaria; se requiere la consideración simultánea de numerosos datos geológicos, geoquímicos y geofísicos dispares (Knox-Robinson, 2000).

Los métodos de modelación espacial para la CPM han encontrado un espacio de debate y análisis por parte de numerosos investigadores, principalmente aquellos basados en los datos (Bonham-Carter *et al.*, 1988, 1989; Kim *et al.*, 1996; Agterberg y Bonham-Carter, 2005; Jianping *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2007; Harris *et al.*, 2008; Oh y Lee, 2008; Benomar *et al.*, 2009). Recientemente se incorpora a la cartografía del potencial mineral el modelo de máxima entropía desarrollado en la faja polimetálica de Nandin en China (Liu *et al.*, 2017).

En México no se tiene experiencia en el uso de la cartografía digital predictiva de depósitos minerales; no obstante, se mencionan algunos trabajos del Servicio Geológico Mexicano (SGM) en relación con las cartas de dominios metalogénicos en los Estados de Zacatecas, Jalisco, San Luis Potosí e Hidalgo a escala 1: 250000, donde clasifican dichos dominios mineros en metálicos (e.g. Au, Ag, Pb, Zn) y no metálicos (e.g. fluorita) (Azpeitia-Caballero, 2007; Luna *et al.*, 2008).

En la región noreste de México se contabilizan más de 160 depósitos de fluorita, distribuidos en diferentes áreas mineralizadas, entre las cuales destaca el distrito minero Aguachile y sus alrededores por la cantidad y variedad de tipologías de depósitos minerales (Tritlla *et al.*, 2006; González-Sánchez *et al.*, 2009; Camprubí *et al.*, 2019). Estos trabajos aportan la información necesaria para poder usar la cartografía digital predictiva de potencialidad mineral para depósitos de fluorita, una de las materias prima con más demanda de México.

Los objetivos de este trabajo son: i) generar un mapa de potencial mineral que indique un índice de favorabilidad a la ocurrencia de depósitos estratoligados de fluorita; y ii) establecer los metalotectos que más contribuyen a la exploración de depósitos estratoligados de fluorita en el noreste de México. Para esto se utilizó un SIG como herramienta de soporte de decisión espacial para

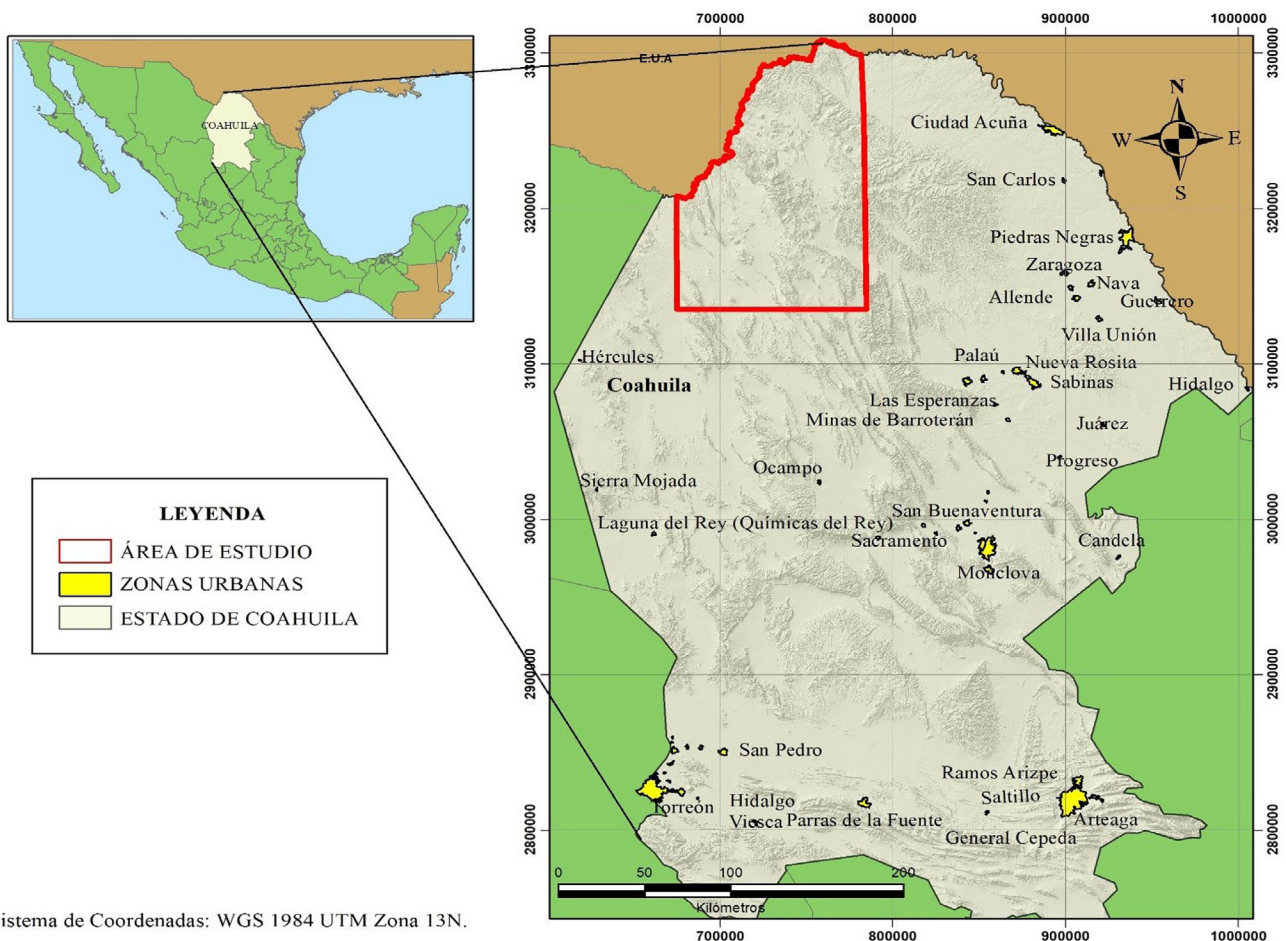
combinar y procesar la información geoespacial basada en los datos geológicos, estructurales, geoquímicos, geofísicos y de dominios mineros para, posteriormente, integrarlos mediante los métodos de superposición ponderada, lógica booleana y máxima entropía, generando así de manera eficiente un mapa de favorabilidad para el análisis predictivo de depósitos de fluorita en el noreste de México.

## 2. Marco geológico

El área de estudio abarca las zonas mineralizadas Aguachile, Sierra del Carmen, San Vicente y La Encantada, situadas al noreste de México, la cual ocupa una extensión superficial de aproximadamente 14853.55 km<sup>2</sup> y en ella se contabilizan cerca

de 160 depósitos de fluorita para una densidad de ocurrencia de 0.01/km<sup>2</sup>. La región se enmarca dentro de los límites de las cartas geológico-mineras, 1:250000 Manuel Benavides (H13-9) al norte (Sánchez-Bermeo *et al.*, 2002) y San Miguel (H13-12) al sur (Romo-Ramírez *et al.*, 2001) (Figura 1).

La evolución tectono-sedimentaria del noreste de México ha estado ligada principalmente a la apertura y desarrollo del Golfo de México (González-Sánchez *et al.*, 2007), cuyo origen es resultado del fracturamiento del supercontinente Pangea, durante el Triásico Superior-Jurásico Inferior (Salvador, 1991; Anderson y Schmidt, 1983; Wilson, 1990; Pindell y Kennan, 2009; Stern y Dickinson, 2010; Pindell *et al.*, 2016; Keppie, 2018). El contexto de tectónica extensional que produce la disgregación de Pangea es tema de controversia (Keppie, 2018). Se ha sugerido un



**Figura 1** Localización del área de estudio.

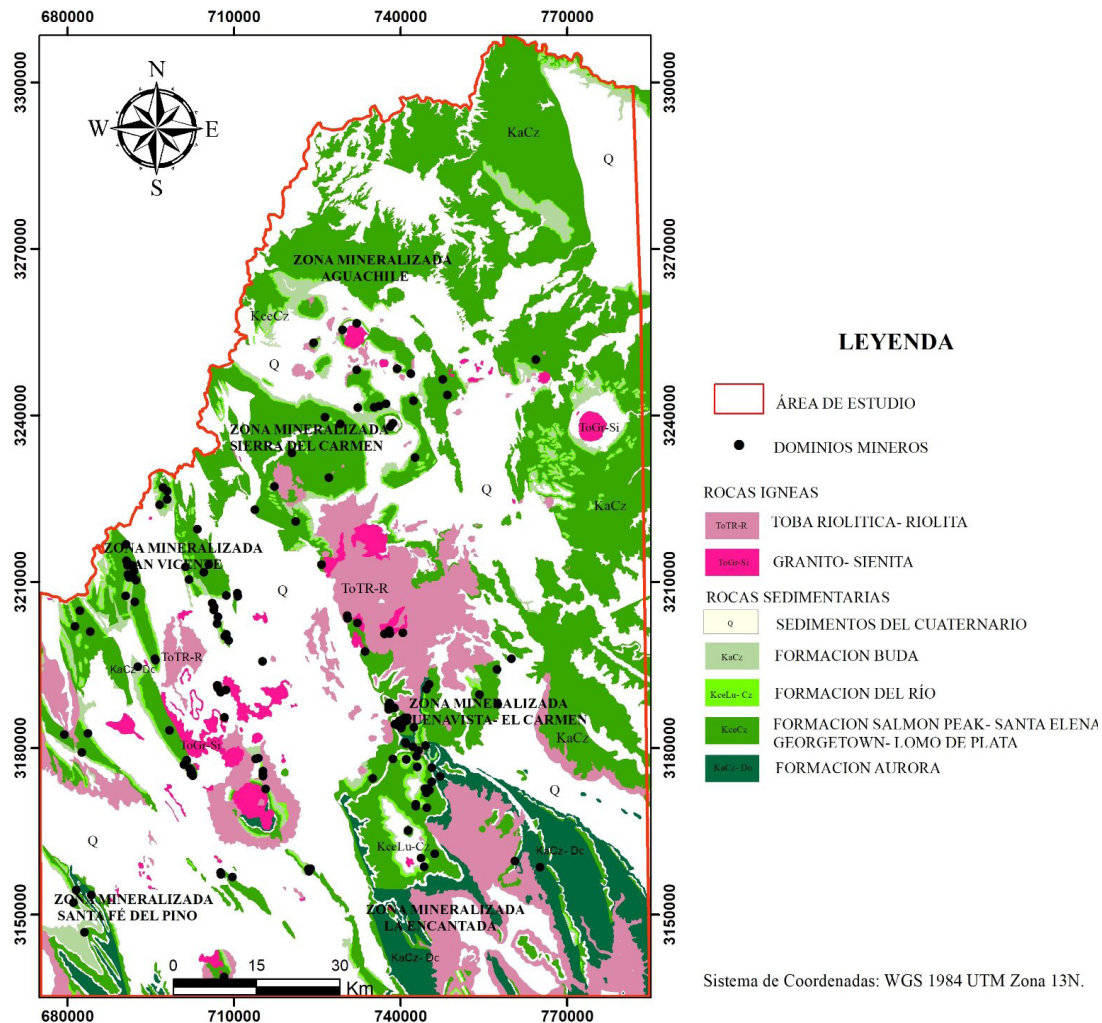


escenario de extensión trasarco, asociado a la subducción de la placa Farallón (Stern y Dickinson, 2010), seguido de una rotación antihoraria entre Yucatan y Norteamérica (Sandwell *et al.*, 2014, Pindell *et al.*, 2016).

En este contexto evolutivo, correspondiente a la etapa de *rift*, se generan altos del basamento y fosas tectónicas, elementos estructurales que controlan el patrón de sedimentación de la región (González-Sánchez *et al.*, 2007). Así se origina la paleopenínsula Burro-Peyotes al noreste y la paleocuenca de Sabinas al suroeste, ambos elementos paleogeográficos separados por la falla La Babia. La paleocuenca de Sabinas fue rellenada por sedimentos siliciclásticos de ambientes costeros, depósitos evaporíticos tipo sabkha y depósitos

de carbonatos tanto en ambientes de plataforma somera y profunda como en complejos arrecifales en un lapso de tiempo comprendido entre el Jurásico Medio y el Cretácico Superior (González-Sánchez *et al.*, 2007).

Como resultado del ambiente de depositación se originan las rocas sedimentarias de la Formación Aurora, las calizas de la Formación Salmon Peak, las lutitas-calizas de la Formación Del Río y las calizas de la Formación Buda. Toda la secuencia sedimentaria fue posteriormente afectada por la orogenia Laramida, creando los elementos necesarios para la formación de yacimientos minerales estratoligados semejantes a los depósitos conocidos como *Mississippi Valley-Type* (MVT) (González-Sánchez *et al.*, 2007; Camprubí *et al.*, 2019).



**Figura 2** Esquema geológico del área de estudio (modificado de Romo-Ramírez *et al.*, 2001; Sánchez-Bermeo *et al.*, 2002).



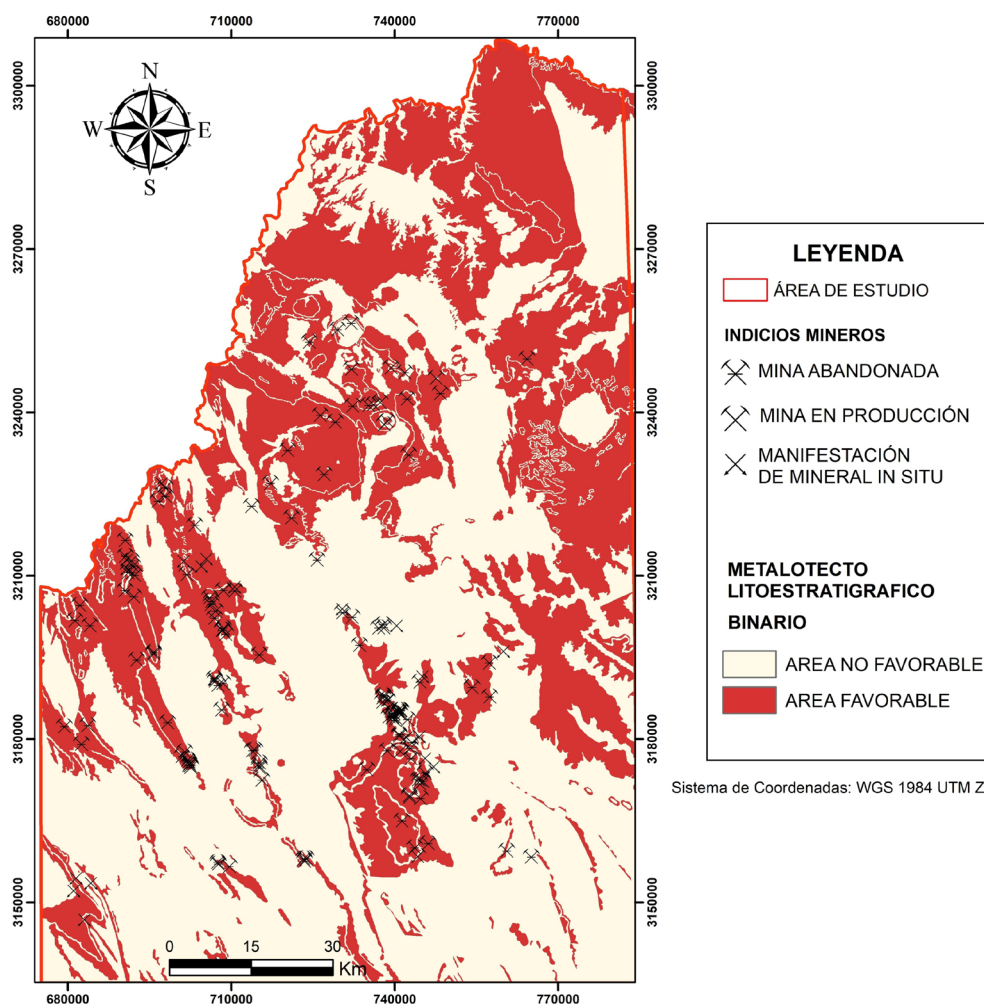
Los ambientes de depósito y las condiciones paleogeográficas de esta área, en conjunto con la participación de un evento orogénico (orogenia Laramida), generaron los elementos necesarios para la formación de yacimientos minerales estratoligados semejantes a los depósitos de fluorita conocidos como *Mississippi Valley-Type* (MVT).

La Península Burro-Peyotes constituye un alto de basamento, separado de la paleocuenca de Sabinas al sureste por la falla La Babia (Wilson, 1990). Está formada por rocas metasedimentarias deformadas del Paleozoico Superior (Pérmico). Posteriormente, durante el Cretácico Tardío, se depositaron sedimentos detríticos, depósitos de carbonatos, capas de margas y lutitas correspondientes a las formaciones West Nueces, Edward,

Mc Knight, Samon Peak, Del Río, Buda, Eagle Ford, Austin Boquillas y San Vicente (Camprubí *et al.*, 2019).

Las secuencias sedimentarias que cubren el basamento Paleozoico de la Península Burro-Peyotes están intruidas por rocas plutónicas hipobasales de composición granítica y sienítica (McAnulty *et al.*, 1963) y forman parte de la Provincia Alcalina Oriental Mexicana (Camprubí *et al.*, 2019). Brechas volcánicas y flujos piroclásticos a menudo se asocian con porfiritas riolíticas, así como numerosos diques de pórfidos andesíticos y riolíticos (McAnulty *et al.*, 1963).

Estos eventos magmáticos marcan rasgos distintivos sobre otros estilos de mineralización de fluorita en la región NE de México, específicamente



**Figura 3** Mapa de metalotecto litoestratigráfico donde se muestra el área favorable o formaciones productivas (rojo) y el área no favorable (blanco) a la ocurrencia de fluorita.

Tabla 1. Datos primarios disponibles en formato vectorial y ráster.

Mapa	Formato original	Escala	Fuente	Uso
Carta geológico-minero	Vectorial	1:250000	Geoinfomex (SGM,2008)	Visualización de tipos de rocas y distribución de las formaciones productivas, rasgos tectónicos y manifestaciones minerales.
Geoquímico	Vectorial	1:250000	Geoinfomex (SGM, 2008)	Interpolación por método Vecino Natural para observar anomalías de elementos.
Geofísico	Vectorial	1:250000	Geoinfomex (SGM, 2008)	Visualizar las anomalías del Campo Magnético Total.
Modelo Digital de Elevación (MDE)	Ráster	píxel 100 m	INEGI	Para realizar mapas geomorfológicos a partir del relieve sombreado y pendiente.

en el distrito Aguachile, dado por la presencia de vetas de fluorita con Be-U (Mo-P-V) (Camprubí *et al.*, 2019).

Los depósitos minerales en el noreste de México están dominados por mineralizaciones estratoligadas de fluorita tipo MVT (González-Partida *et al.*, 2002; Tritlla *et al.*, 2006; González-Sánchez *et al.*, 2007; González-Partida *et al.*, 2003). No obstante, también se han descrito mineralizaciones de fluorita tipo skarn y magmático hidrotermales en esta región (Levresse *et al.*, 2006; Camprubí *et al.*, 2019), genéticamente relacionadas con los intrusivos alcalinos y riolíticos, a los que se asocian los depósitos de mineral de Be, U y F (Camprubí *et al.*, 2019).

Existe una alineación de las manifestaciones de fluoritas, en estrecha relación espacial con las rocas ígneas (Figura 2), lo que prueba la existencia de otros tipos genéticos de mineralización diferentes a las MVT. En este sentido, se menciona el depósito El Pilote, considerado tipo Skarn (Levresse *et al.*, 2006). Este tipo particular de mineralización de fluorita se relaciona con cuerpos intrusivos hipabisales del Oligoceno, que cortan la mineralización MVT preexistente y se encuentran notablemente enriquecidos en Be y U. También se reportan vetas de fluorita con Be-U-Mo-P-V en brechas en la mina Las Alicia, así como mineralización de elementos de las tierras raras (Camprubí *et al.*, 2019).

Los aspectos antes mencionados confirman la existencia de diferentes estilos de mineralización

de fluorita, los cuales deberán ser tomados en consideración en futuros trabajos de exploración; no obstante, existe un predominio de los depósitos tipo MVT respecto al resto de los estilos de mineralización de fluorita, lo que ha sido considerado en el presente trabajo.

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. ETAPAS DE PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

La cartografía predictiva para el mapeo de áreas favorables a la ocurrencia de depósitos de fluorita en el noreste de México contempló tres etapas fundamentales. La primera consistió en la identificación y organización de los datos primarios; en la segunda se realizó el procesamiento de éstos, que contempló la reclasificación de los datos espaciales, la superposición ponderada y el álgebra de mapas; y en la tercera se llevó a cabo su integración y modelación.

#### 3.2. IDENTIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS

El proceso de identificación y organización de los datos primarios partió de la información proporcionada por las bases de datos del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Esta información normalmente se presenta en diferentes formatos de datos (SHP, PDF, JPG), a partir de los cuales se les asignó un uso específico (Tabla 1).

Los datos primarios fueron procesados para extraer evidencias que ayuden al pronóstico metalogénico y cartografiar los factores derivados del modelo, empleando modelos empíricos basados en el criterio de experto (Bonham-Carter, 1994), razón por la cual se aplicó la superposición ponderada y la lógica booleana.

### 3.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

En esta etapa se procesaron los datos geoespaciales para extraer evidencias que ayuden a cartografiar, a partir de los mapas primarios, los factores derivados del modelo, empleando distintas operaciones espaciales tales como reclasificación, interpolación, superposición ponderada y combinaciones lógicas, entre otros.

El mapa litoestratigráfico fue generado a partir de los datos vectoriales de las cartas geológico-mineras Manuel Benavides y San Miguel a escalas 1:250000, transformados a formato ráster y reclasificado en un número limitado de clases, manteniendo la información del registro estratigráfico cuyas formaciones productivas hospedantes de los depósitos de fluorita se corresponden con las formaciones Aurora, Georgetown, Del Río y Buda. Este registro ha sido considerado como un criterio litoestratigráfico.

El mapa geoquímico se obtuvo basándose en los datos del levantamiento de sedimentos de arroyo realizados en el noroeste del estado de Coahuila, extraídos de las cartas geoquímicas de fluor (Romo-Ramírez *et al.*, 2002; Sánchez-Bermeo *et al.*, 2002). Los datos geoquímicos fueron procesados estadísticamente para generar el mapa de anomalías de fluor en formato ráster.

Al Modelo Digital de Elevación (MDE) se le aplicó una modificación de tamaño de celda para obtener los mapas morfométricos (mapa de relieve sombreado y pendiente), permitiendo destacar las zonas positivas del relieve en relación directa con la existencia de depósitos minerales de fluorita. Estos mapas son considerados un criterio geomorfológico.

El criterio estructural se cartografió partiendo de la información brindada por las cartas geológico-

gico-mineras utilizadas, digitalizando todas las estructuras disyuntivas y plicativas presentes en las mismas. Aunque esta información es limitada, por el número de estructuras mapeadas, su significado es incuestionable debido a que las mineralizaciones guardan estrecha relación espacial con las estructuras tectónicas disyuntivas, sobretodo aquellas orientadas NO-SE. El criterio geofísico se estableció con base en la interpolación de los datos del campo magnético total reducido al polo, con la finalidad de visualizar las anomalías presentes en relación espacial con las mineralizaciones de fluorita.

La reclasificación asigna criterios según los valores que predominan o también llamado análisis multicriterio en la superposición de los mapas. En el proceso de reclasificación las variables geológicas utilizadas fueron relasificadas por el método de categorías o clases (seis en total) y el método binario (0 y 1).

La superposición ponderada se basó en la multiplicación de cada capa de entrada por un factor de ponderación, que indica su importancia en el modelo, y la posterior suma de las capas modificadas, introduciendo los rasters de entrada para crear rasters de salidas (Bonham-Carter, 1994), o bien introduciendo rasters múltiples en los que las ponderaciones son iguales a 1, por lo que los valores de ponderación pueden tomar cualquier valor decimal positivo o negativo (Rigol-Sánchez, 2011b).

En la superposición de los rásteres, cada celda correspondiente a la capa refiere a la misma ubicación geográfica, lo que la hace apta para combinar las características de varias capas en una sola.

A las imágenes ráster resultantes de cada variable analizada se les asignaron diferentes valores de ponderación en función del grado de influencia sobre la distribución de las mineralizaciones (Tabla 2). La última columna de la Tabla 2, cuya finalidad es llevar un control de ponderación según el criterio de experto, el cual indica el valor que se asigna a cada variable con base en su importancia en el área de estudio con respecto a los indicios mineros, corresponde al peso o el valor de escala que se le asigna a cada rango de la variable rasterizada.



Tabla 2. Pesos para la superposición ponderada de las variables rasterizadas.

Ponderación	Variables rasterizadas	Rangos	Valor
25	Litoestratigrafía	Caliza KaCz Inf	25
		Caliza KceCz Sup	20
		Lutita, Caliza KcetLu-Cz	15
		KceLu-Cz	6
		KaCz-Lu	4
		KaLu-Cz	2
15	Pendiente	0 - 0.849618	0
		0.849618 - 4.248088	1
		4.248088 - 8.496177	3
		8.496177 - 12.744265	5
		12.744265 - 42.480885	10
		42.480885 - 84.961769	15
5	Distancia Euclidiana Estructural	0-500	5
		500-1000	4
		1000-1500	3
		1500-2500	2
		2500-4000	1
		4000-7000	1
35	Geoquímica	3.3777 - 130.5227	1
		130.5227 - 313.4452	20
		313.4452 - 520.4366	35
		520.4366 - 1242.4993	15
		1242.4993 - 2917.6849	10
		2917.6849 - 9142.9492	3
15	Geofísica	(-)363.5215 - (-)74.3033	2
		(-)74.3033 - (-)8.1140	15
		(-)8.1140 - 68.8241	10
		68.8241 - 196.2942	7
		196.2942 - 431.4734	5
		431.4734 - 1183.1190	1
5	Densidad Estructural	0 - 0.000085	2
		0.000085 - 0.0001696	3
		0.000198 - 0.000254	0
		0.000254 - 0.000508	5
		0.000508 - 0.001015	4
		0.001015 - 001692	1

Tabla 3. Mapas de pronósticos obtenidos a partir de los criterios o metalotectos empleados.

Mapas de pronóstico	Metalotectos
1	Litoestratigráfico, geoquímico, distancia euclídeana estructural, densidad estructural, geomorfológico y geofísico
2	Litoestratigráfico, geoquímico, distancia euclídeana estructural, geomorfológico y geofísico
3	Litoestratigráfico, geoquímico, geomorfológico y distancia euclídeana estructural
4	Litoestratigráfico, geoquímico y distancia euclídeana estructural
5	Litoestratigráfico y geoquímico

Cada ráster de entrada se pondera de acuerdo a su importancia o su influencia de porcentaje. El peso es un porcentaje relativo, y la suma de las ponderaciones de influencia de los porcentaje, según la herramienta del análisis espacial de superposición ponderada de Arcmap, debe ser igual a 100. Los valores numéricos ayudan a realizar el funcionamiento de la herramienta sin importar la unidad en la que se presente la variable.

Cada una de las variables rasterizadas generó su respectivo mapa de pronóstico y, a partir de sus combinaciones (Tabla 3) y empleando los métodos de integración de datos espaciales (superposición ponderada y lógica booleana), se obtuvieron los mapas de pronóstico; éstos permiten visualizar las áreas favorables de aquéllas sin interés prospectivo.

A cada uno de los mapas pronósticos se le determinó su rango de ponderación indicando el grado de favorabilidad y los rangos de ponderación (Tabla 4).

La adición de pesos  $W^+$  o  $W^-$  solo se permite si los patrones que se integran son condicionalmente independientes de la ocurrencia de depósitos (Bonham-Carter *et al.*, 1988). Para realizar las tablas de los pesos se necesitan los siguientes datos:

Tabla 4. Rangos de ponderación para los mapas pronósticos.

Favorabilidad	Rangos de ponderación (%)
Muy Alta	80-100
Alta	60-79
Moderada	40-59
Baja	20-39
Muy Baja	0-19

- $P(j|d)$ : Probabilidad condicional
- $Adt$ : Número de depósitos totales del área de estudio
- $Adj$ : Número de depósitos dentro del patrón
- $Aj$ : Área total del patrón  $j$  ( $\text{km}^2$ )
- $At$ : Área total del área de estudio ( $\text{km}^2$ )

$$P(j|d) = \frac{Adj}{Adt} \quad (1)$$

$$P(j|\bar{d}) = \frac{(Aj - Adj)}{(At - Adt)} \quad (2)$$

$$P(\bar{j}|d) = \frac{(Adt - Adj)}{Adt} \quad (3)$$

$$P(\bar{j}|\bar{d}) = \frac{(At - Aj - Adt + Adj)}{(At - Adt)} \quad (4)$$

El peso positivo simbolizado con  $W^+$  se toma para los yacimientos más favorables (5), mientras que el peso negativo  $W^-$ , para los yacimientos menos favorables (6) (Bonham-Carter *et al.*, 1988).

$$W_j^+ = \ln \frac{P(j|d)}{P(j|\bar{d})} \quad (5)$$

$$W_j^- = \ln \frac{P(\bar{j}|d)}{P(\bar{j}|\bar{d})} \quad (6)$$

El contraste (C) es un parámetro que proporciona una medida de la fuerza de la correlación entre un punto patrón y un patrón binario. El valor esperado de C es cero si los depósitos se distribuyen aleatoriamente con respecto al patrón (Bonham-Carter *et al.*, 1989; Carranza, 2004).

$$C = (W_j^+) - (W_j^-) \quad (7)$$

La lógica booleana incorpora a la evaluación del potencial mineral aquellos mapas que no están asociados con los yacimientos conocidos. Los mapas binarios se combinan con los mapas primarios empleando el operador lógico Y (*and*-en inglés) para identificar las zonas donde coinciden o se superponen todas las evidencias. Si ambos valores son verdaderos, la salida es 1. Si uno o ambos valores son falsos, la salida es 0.

El modelo de máxima entropía se ha utilizado para la predicción de ocurrencias minerales (Liu *et al.*, 2017) y fue difundido por su implementación en el software MaxEnt para la distribución de especies y el modelado de nichos ambientales. Sin embargo, también está disponible como paquete R y en Saga GIS (y QGIS). Este modelo generalmente supera a otros métodos basados en la exactitud de la predicción (Liu *et al.*, 2017) y su utilización es fácil cuando se trata de datos en formato ASCII.

Asimismo, compara los valores del conjunto de variables explicativas en formato SIG de cada localidad con los valores de esas mismas variables en una muestra de 10000 puntos seleccionados al azar en el área de estudio (Phillips *et al.*, 2006; Phillips y Dudik, 2008). Este procedimiento se utilizó con el objetivo de elaborar el mapa de potencial mineral a partir de los mapas de pronóstico reclasificados: geológico, geoquímico, geofísico, distancia euclidiana estructural, densidad de estructuras y pendiente.

### 3.4. INTEGRACIÓN Y MODELACIÓN DE LOS DATOS

Este procedimiento consistió en la integración de los mapas de evidencias y el análisis del mapa de potencial mineral. Antes de su proceso de combinación se determinó la importancia o el peso relativo de cada uno de ellos y de las clases que lo conforman a partir de los métodos y objetivos establecidos.

Los modelos de integración utilizados son aquellos que mayor atención han recibido en el trabajo de investigación adaptado al área de estudio, empleando, principalmente, tres: 1) el basado

en el conocimiento (lógica booleana), 2) el basado en los datos (superposición ponderada) y 3) el basado en MaxEnt o máxima entropía

## 4. Resultados

### 4.1. MAPAS DE METALOTECTOS

Los metalotectos son guías antecedentes o reveladoras de procesos geológicos, contextos geodinámicos, posición paleogeográfica, estratigrafía, estructura, etc, con los que puede estar relacionada una mineralización (Routhier, 1980).

En el presente trabajo el concepto de metalotecto se utiliza para destacar el rol que desempeñan las unidades litoestratigráficas, las anomalías geoquímicas de F, los mapas de relieve sombreado y de pendiente, la estructura geológica y la información geofísica correspondiente al campo magnético total, como las guías más importantes con las cuales se relaciona la mineralización de fluorita en el NE de México.

#### 4.1.1. METALOTECTO LITOESTRATIGRÁFICO

Para este metalotecto se consideraron las unidades litoestratigráficas encajonantes de la mineralización de fluorita, mismas que están representadas por las calizas de la Formación Aurora de edad Albiano (KaCz), las Calizas de la Formación Salmon Pick de edad Albiano (KaCz), las lutitas y calizas de la Formación Del Río de edad Cenomaniano (KceLu-Cz) y las calizas de la Formación Buda del Cenomaniano (KceCz). Como área no favorable se determinó aquella donde afloran las rocas sedimentarias del Cretácico Maastrichtiano y del Cuaternario, así como las rocas ígneas.

El resultado se representa mediante un mapa litoestratigráfico (Figura 3) que señala las áreas favorables y no favorables a la existencia de depósitos de fluorita.

Los pesos y el contraste de la formación productiva (Tabla 5) revelan que el área más pequeña



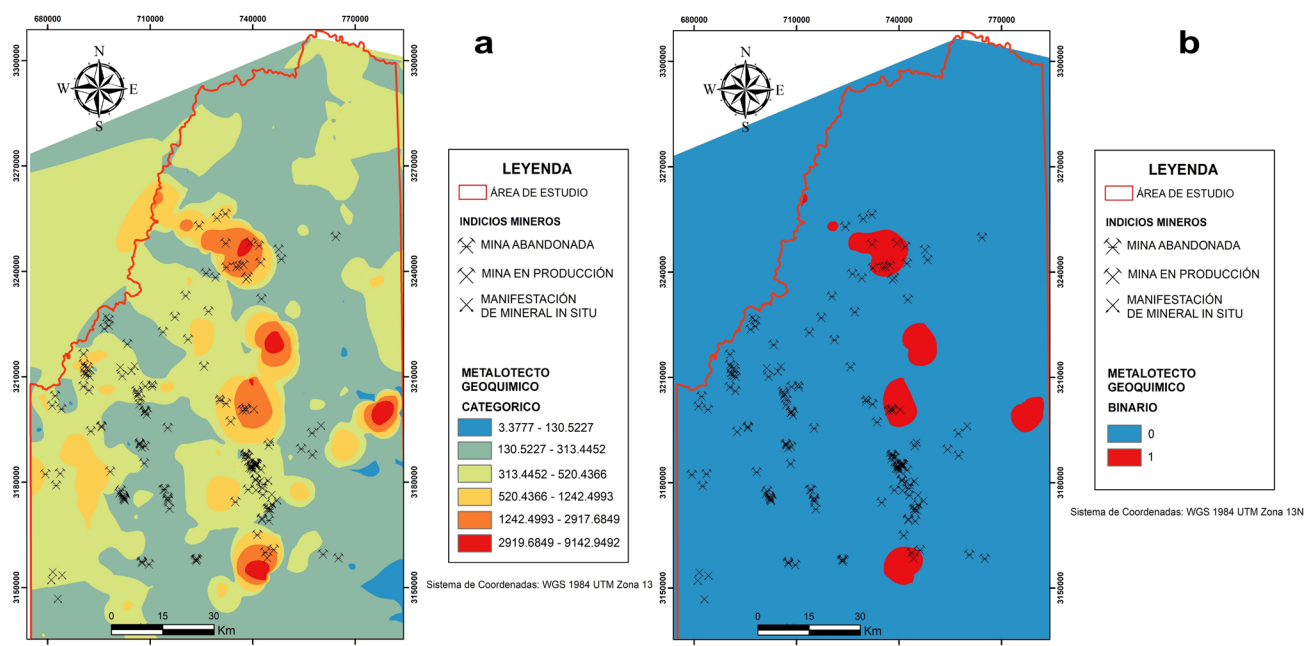


Figura 4 Mapa de anomalías geoquímicas de flúor. a) obtenido por método categórico y b) obtenido por el método booleano.

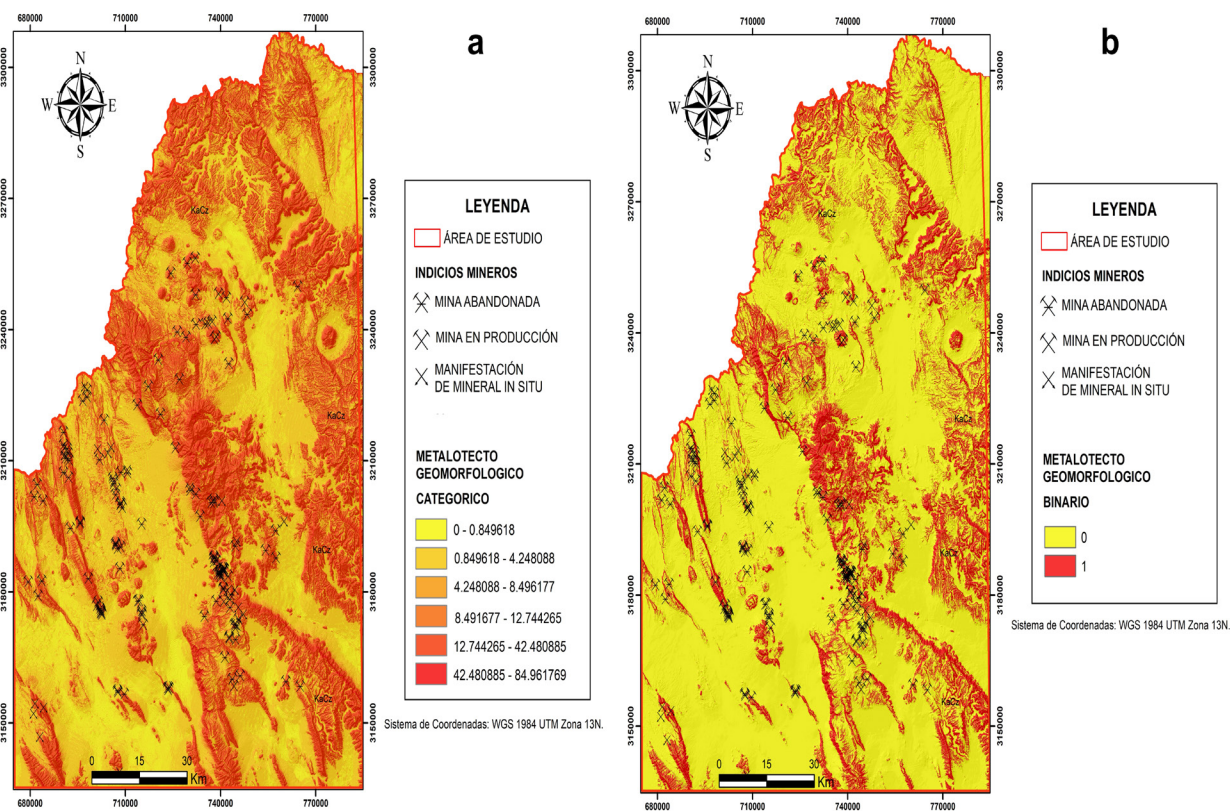


Figura 5 Mapa geomorfológico reclasificado. a) por el método categórico y b) por el método booleano.

posee 118 indicios mineros; esto debido principalmente a la selección de los tipos litológicos de rocas incluidas en la clasificación. El parámetro W (+) para la clase 1 alcanza un valor de 0.46, lo que indica que el peso está dentro del dominio establecido, mientras que el parámetro W (-) con un valor de -0.43 indica que no.

#### 4.1.2. METALOTECTO GEOQUÍMICO

Este metalotecto constituye un índice para la localización de zonas con presencia de mineralización de fluorita ( $\text{CaF}_2$ ). Los datos geoquímicos se obtuvieron del levantamiento geoquímico por sedimentos de arroyo, donde se muestran los valores de concentración del F. Para la obtención del mapa de anomalías geoquímicas de F se aplicó el método de interpolación espacial Vecino Natural para estimar los valores de los factores seleccionados dentro del área por litologías.

En los mapas de la Figura 4 se aprecian las anomalías más intensas en áreas reducidas; éstas se encuentran alineadas en la región central del mapa, donde se aprecian algunos yacimientos conocidos; se destacan dos áreas anómalas, en las que no existen indicios mineros de fluorita, que pueden ser consideradas en futuras campañas de exploración minera.

La variación de pesos y contraste (Tabla 6) para el mapa de anomalías geoquímicas por el método categórico (Figura 4a) revela un mayor peso para la clase 5, correspondiente a la menor área con un total de 11 depósitos de fluorita. La variación de pesos y contrastes (Tabla 7) para el mapa de anomalías geoquímicas por método booleano (Figura 4b) reporta la presencia de 13 depósitos de fluorita en un área pequeña de aproximadamente 607 km<sup>2</sup>.

#### 4.1.3. METALOTECTO GEOMORFOLÓGICO

En el Modelo Digital de Elevación (MDE) se utilizó un tamaño de celda de 50x50m para obtener los mapas de relieve sombreado y el mapa de pendiente (Figura 5). Se observa una evidente relación espacial de los depósitos minerales de fluorita con

las partes altas del relieve, lo que representa un criterio o guía para la prospección de estos depósitos minerales. Para cartografiar este metalotecto se construyó un mapa de pendiente reclasificado en 6 categorías o clases y binarizado en favorable cuando el valor es 1 y no favorable cuando es 0.

El cálculo de los pesos y contraste (Tabla 8) del mapa geomorfológico obtenido por los métodos categórico (Figura 5a) indica que en la categoría 6, con un área de 117.7 km<sup>2</sup>, no existen depósitos de fluorita, aumentando el número de ellos en áreas extensas.

La binarización del mapa geomorfológico (Tabla 9) muestra para la clase 1 un mayor peso positivo en una menor área con 40 depósitos de fluorita (Figura 5b).

#### 4.1.4. ANÁLISIS DE MUESTRA

El metalotecto estructural está compuesto por los mapas de distancia euclídeana estructural y de densidad estructural en relación espacial con los indicios mineros. Para la elaboración de tales mapas se definieron las estructuras geológicas a partir del MDE y las cartas geológico mineras Manuel Benavides y San Miguel a escalas 1:250000, calculando sus frecuencias y porcentajes en el área de estudio (Tabla 10).

El mapa de distancia euclídeana estructural se dividió en seis clases considerando un rango de entre 500 y 1500 m de los depósitos a las estructuras geológicas. Sus pesos y contraste empleados en la reclasificación mediante el método categórico y binario se muestran en las Tabla 11 y 12 respectivamente.

A partir de los datos reclasificados en ArcGis se obtuvo el mapa de distancia euclídeana estructural categórico (Figura 6a) y binario (Figura 6b).

La elaboración del mapa de densidad estructural siguió el mismo procedimiento: primeramente se determinaron los pesos y contraste por los métodos categórico y binario representados en las tablas 13 y 14, respectivamente.

Finalmente se obtuvo el mapa de densidad estructural reclasificado por categorías (Figura 7a) y binario (Figura 7b).

Tabla 5. Pesos y contrastes de la formación productiva.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
0	9244.965	42	-0.48	0.51	-0.99
1	5802.035	118	0.46	-0.43	0.89

Nota: Dominios mineros- Cantidad de depósitos, manifestaciones y ocurrencias de fluorita que caen dentro de la clase. W (+): Peso positivo, W (-): Peso negativo, C: Contraste (válido para todas las tablas).

Tabla 6. Variación de pesos y contrastes para los mapas geoquímicos obtenidos por el método categórico.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
1	172.735	0	N/A	N/A	N/A
2	8440.887	59	-0.4363075	0.4038378	-0.84015
3	6868.743	74	0.00014403	0.0187911	-0.01865
4	1343.923	15	0.03590953	-0.001395	0.037304
5	486.12	11	0.75431131	-0.0368092	0.79112
6	109.9525	1	-0.1709286	0.0013102	-0.17224

Tabla 7. Variación de pesos y contrastes para los mapas geoquímicos por método booleano.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
0	34105	147	-0.9224637	N/A	N/A
1	607.075	13	0.697927228	-0.0416241	0.739551

Nota: N/A: No Aplica, se debe a la fórmula que se utiliza en el cálculo de estos parámetros.

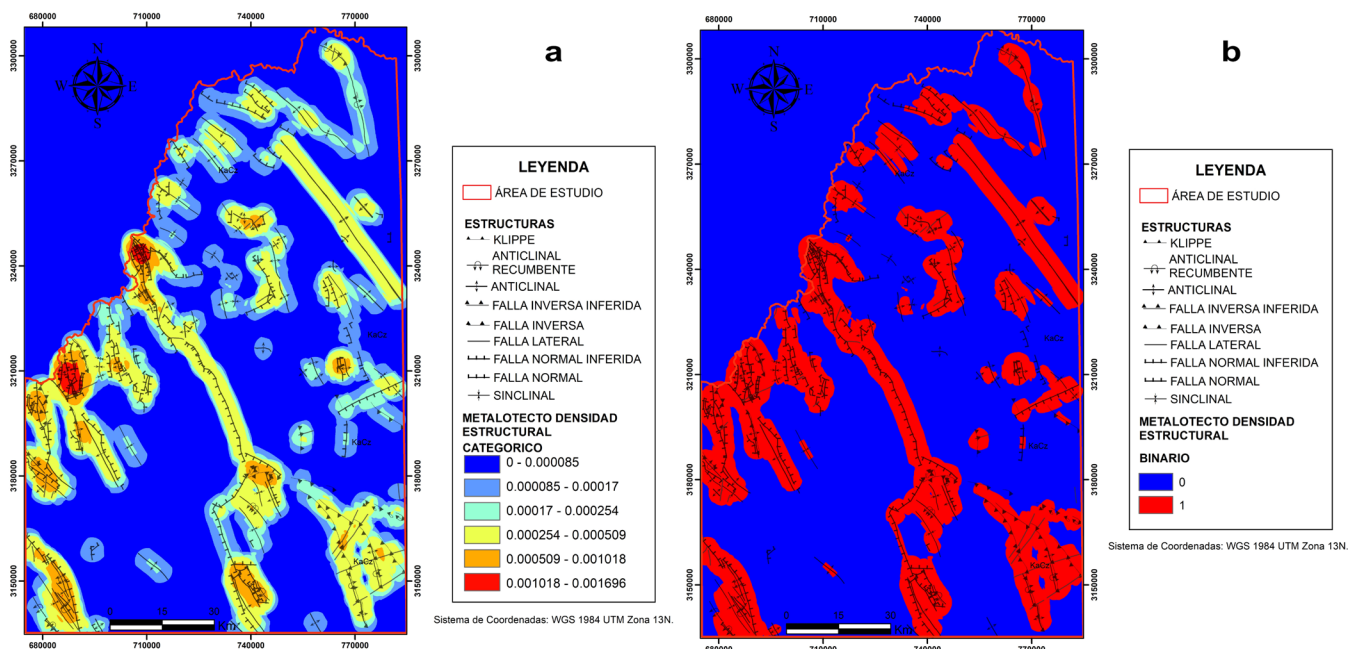
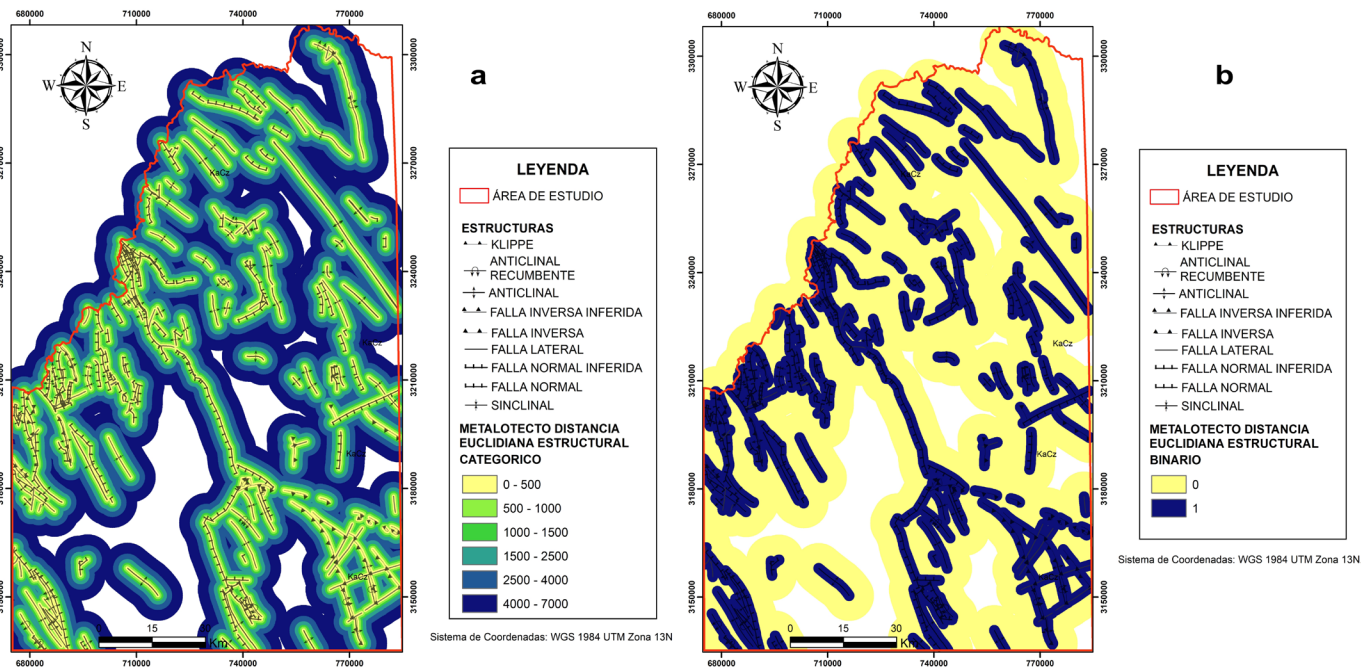
Tabla 8. Pesos y contrastes del mapa geomorfológico categórico.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
1	1650.68	3	-1.7885278	0.1004699	-1.889
2	5897.065	23	-1.0228245	0.3604861	-1.38331
3	1939.228	37	0.58012025	-0.1185448	0.698665
4	1320.635	24	0.53050955	-0.0665447	0.597054
5	4132.548	73	0.50161597	-0.2720863	0.773702
6	117.735	0	N/A	0.008045	-0.00805

Tabla 9. Pesos y contrastes del mapa geomorfológico binario.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
0	12162	120	-0.0886806	0.4208784	-0.50956
1	2896.027	40	0.25167612	-0.0647651	0.316441





#### 4.1.5. METALOTECTO GEOFÍSICO

La información geofísica correspondiente al campo magnético total se dividió en seis clases, de ellas la sexta es la que logra un peso positivo de 1.37 en un sector muy pequeño, de tan solo 97.245 km<sup>2</sup>, donde se describen solamente cuatro indicios mineros. Por su parte, el contraste también es mayor (1.389).

Partiendo de los datos de la Tabla 15, se elaboró el mapa del campo magnético total por el método categórico (Figura 8). Ahí se observa que las anomalías geofísicas (nT) se relacionan con cuerpos intrusivos constituidos por granito-sienita y no con los indicios mineros de fluorita, reflejando áreas no favorables, así que, por tanto, se puede considerar como un metalotecto negativo.

#### 4.2. INTEGRACIÓN DE DATOS GEOESPACIALES UTILIZANDO LÓGICA BOOLEANA Y MÁXIMA ENTROPÍA

La integración utilizando lógica booleana advierte la interacción de dos variables (Figura 9): una favorable con valor de salida igual a 1, representada con el color rojo, y otra no favorable con valor de salida 0 y simbolizada con el color verde. La combinación de estas variables no es muy notoria, pues la binarización ayuda a su multiplicación sin importar la unidad de medida de cada una de ellas. El mapa binario, obtenido a través la integración de la litología con la distancia euclidiana estructural (Figura 9a) representa una mayor visualización de las áreas favorables (color azul), mientras que el binario, representado por la integración de

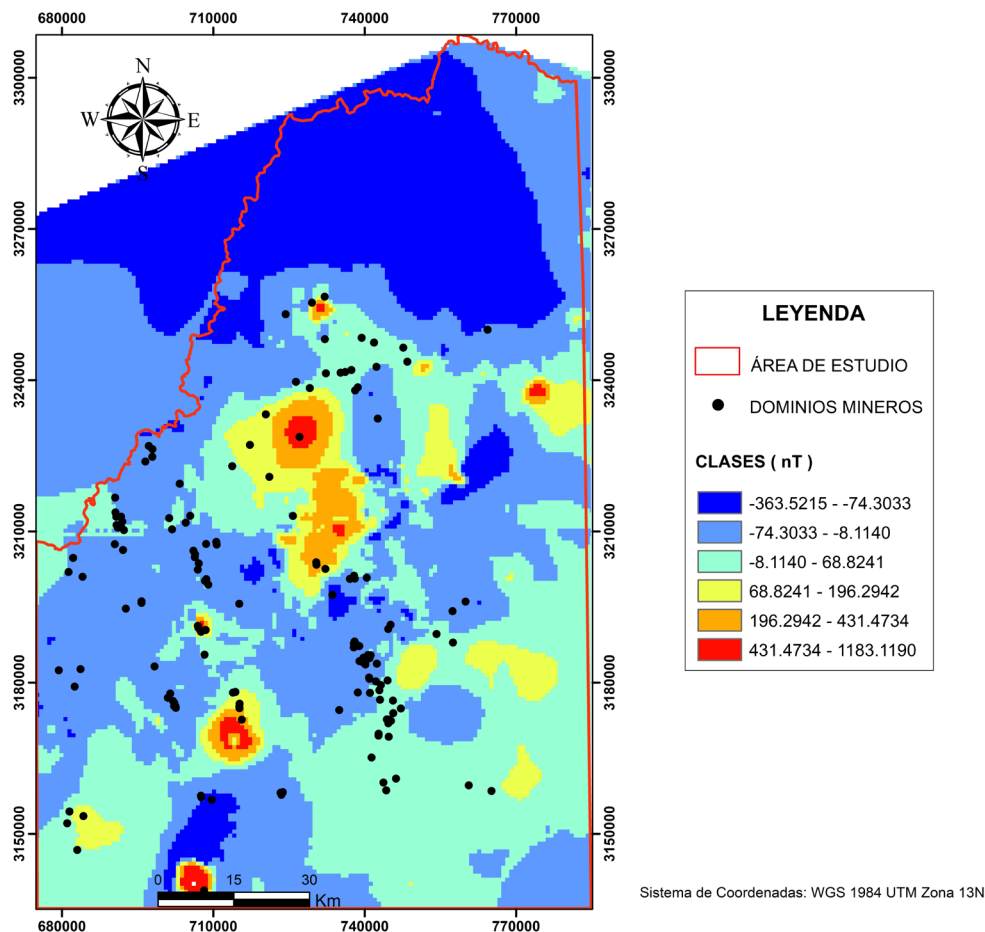
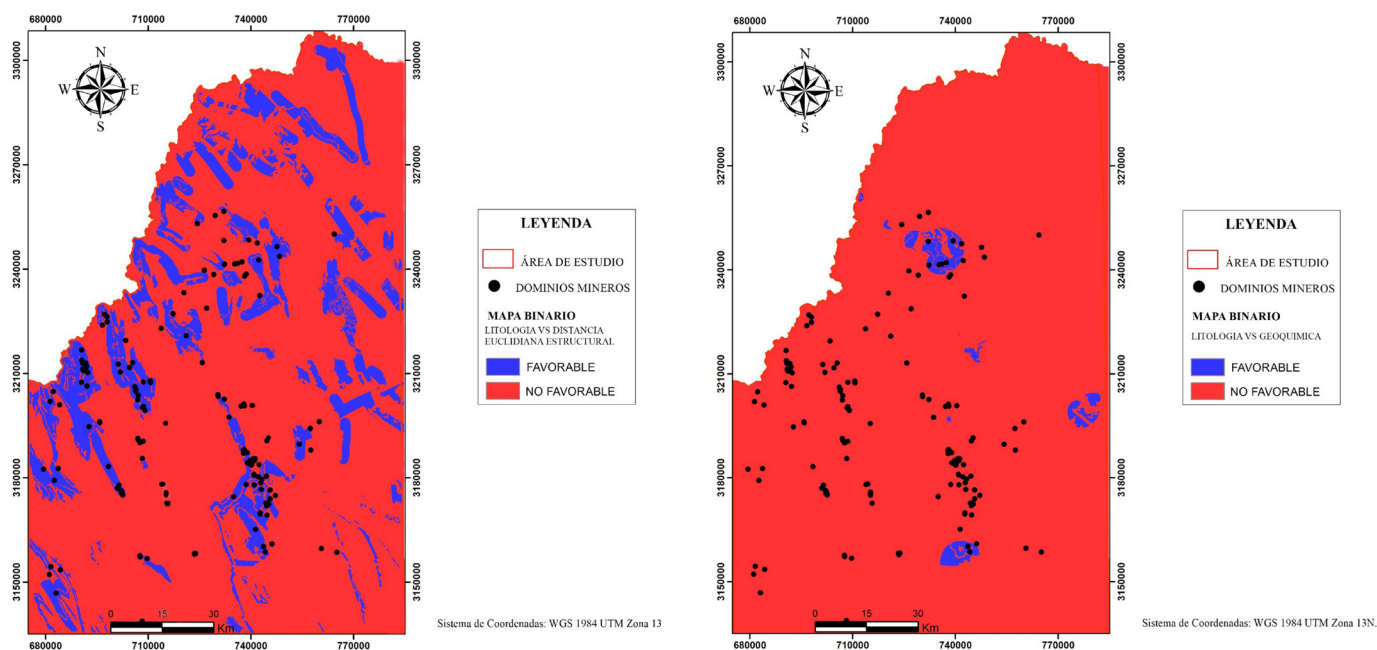


Figura 8 Mapa del campo magnético total elaborado por el método categórico.



**Figura 9** Mapas de integración binarios: a) Litología y Distancia euclidiana estructural, b) Litología y Geoquímica.

la litología con la geoquímica, representa en su mayor parte áreas no favorables a la existencia de depósitos de fluorita (color rojo) (Figura 9b).

El mapa de potencial mineral, conseguido gracias al modelo de máxima entropía (Figura 10), permite la integración de los datos geoespaciales aplicados a la CPM. Se representa un degradado de colores que van desde el rojo, que representa el valor cero (0%), considerado como áreas no favorables a la ocurrencia mineral, hasta el color azul, que representa un 100 % de favorabilidad a la ocurrencia mineral de depósitos de fluorita en la región de estudio.

## 5. Discusión

A partir de la reclasificación del mapa geomorfológico por el método categórico y booleano, se evidencia que todos los depósitos o indicios mineros conocidos se ubican en las áreas de mayor pendiente, descartando cualquier posibilidad de existencia de dominios mineros en las áreas llanas o de menores pendientes. Esta regularidad probablemente se deba a que las pendientes más pronunciadas se vinculen con escarpes y éstos a fallas donde la erosión ha diseccionado el relieve hasta

alcanzar los niveles estratigráficos de las formaciones productivas, exhumando los cuerpos minerales de fluorita. Por tanto, la búsqueda de nuevos depósitos de fluorita debe hacerse precisamente en aquellas áreas donde el relieve es pronunciado. De ahí la importancia de este metalotecto para la confección de los mapas de pronóstico metalogénico.

El mapa pronóstico 1 (Figura 11) expone resultados significativos al NE de la región de estudio, indicando nuevas áreas de interés prospectivo, que van desde un rango moderado hasta muy alto grado de potencial mineral.

El mapa pronóstico 2 (Figura 12) contiene la superposición de los mapas geológico, geoquímico, de distancia euclidiana estructural, de densidad, de pendiente y geofísico. Éste es el que mejor resultados arrojó y, por tanto, el de mayor significación desde el punto de vista de la cartografía predictiva, pues para un rango de favorabilidad del 80-100% se obtiene un área de 1935.559 km<sup>2</sup> (Tabla 16), lo que representa un 31.73% de favorabilidad muy alta. Cabe destacar que las áreas rojas indican una mayor probabilidad de ocurrencia y las verdes, por el contrario, una muy baja o nula probabilidad de ocurrencia de nuevas minaralizaciones de fluorita.



Tabla 10. Frecuencia estructural presente en el área de estudio.

Estructura	Frecuencia	Porcentaje
Falla normal	144	45
Falla inversa	42	13
Falla lateral	25	8
Falla normal inferida	9	3
Sinclinal	26	8
Anticlinal	54	17
Anticlinal Inferido	2	1
Anticlinal Recumbente	15	5
Klippe	4	1
Suma	321	100

Tabla 11. Pesos y contrastes del mapa de distancia euclidiana categórico.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
1	1909.175	50	0.90411833	-0.2315888	1.135707
2	1563.082	29	0.55159184	-0.0852913	0.636883
3	1430.477	28	0.60619272	-0.0878329	0.694026
4	2477.845	15	-0.5810388	0.0874762	-0.66851
5	2887.408	20	-0.445448	-3.0869458	2.641498
6	3615.44	6	-1.879565	0.2447602	-2.12433

Tabla 12. Pesos y contrastes del mapa de distancia euclidiana según el método binario.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
0	8980.693	41	-0.864701	0.6558523	-1.52055
1	4902.735	107	0.71733002	-0.6879258	1.405256

Tabla 13. Variación de pesos y contrastes del mapa de densidad estructural obtenido por el método categórico.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
1	11768	35	-1.2948292	1.3791289	-2.67396
2	2528.225	21	-0.262426	0.0498482	-0.31227
3	1637.675	19	0.07505923	-0.0067863	0.081846
4	2505.818	57	0.75967397	-0.2487769	1.008451
5	561.1475	27	1.53514829	-0.1439737	1.679122
6	73.62	1	0.23474308	-0.0011782	0.235921

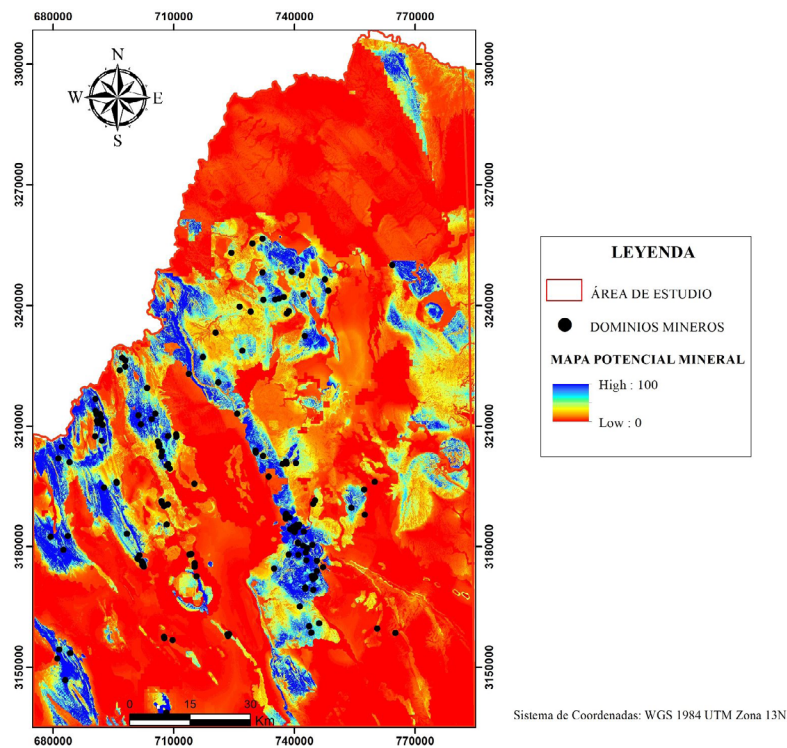


Figura 10 Mapa de potencial mineral obtenido mediante el método de máxima entropía. Se empleó el programa MaxEnt.

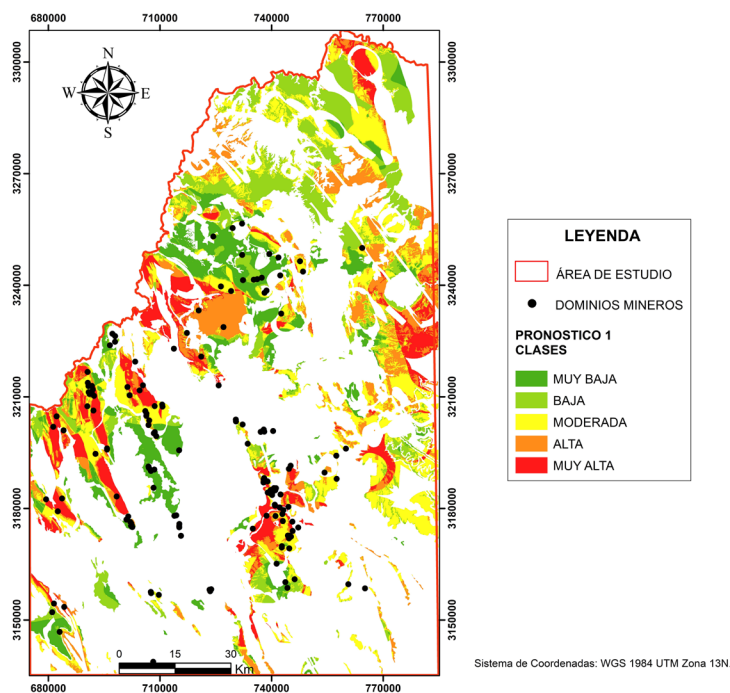
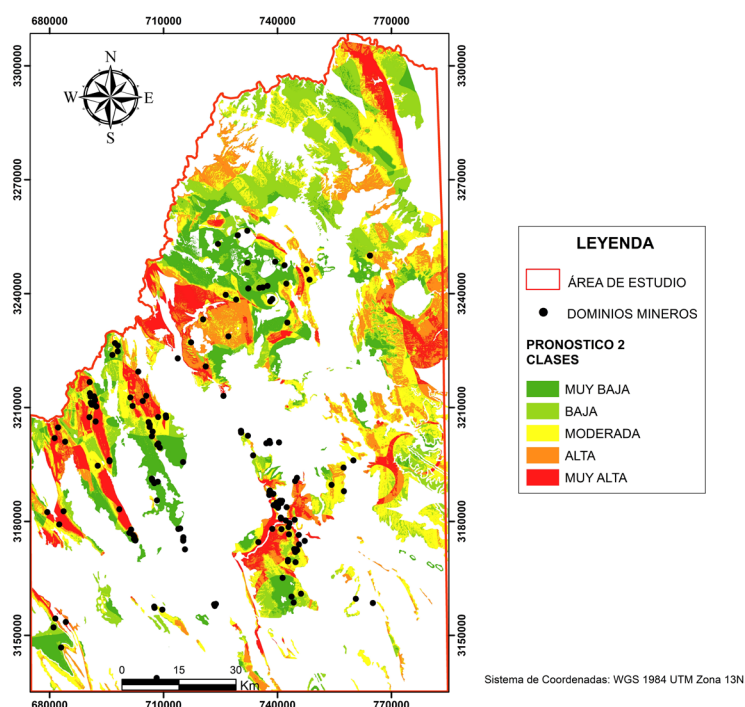
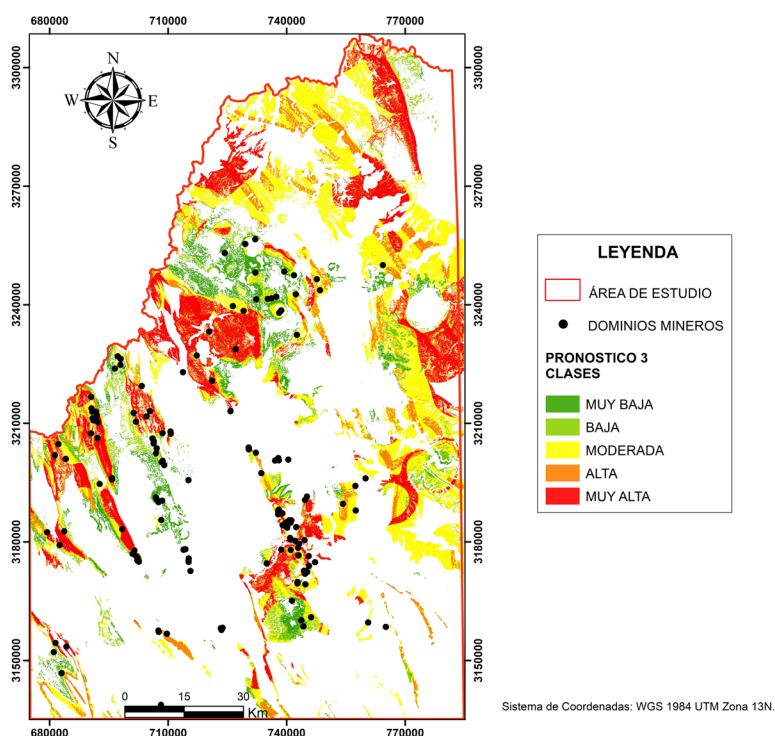


Figura 11 Mapa de pronóstico 1. Este mapa se obtuvo mediante el método de superposición ponderada y muestra la favorabilidad a la ocurrencia de depósitos de fluorita en la región de estudio.



**Figura 12** Mapas de pronóstico 2. Este mapa se obtuvo mediante el método de superposición ponderada y muestra la favorabilidad a la ocurrencia de depósitos de fluorita en la región de estudio.



**Figura 13** Mapas de pronóstico 3. Este mapa se obtuvo mediante el método de superposición ponderada y muestra la favorabilidad a la ocurrencia de depósitos de fluorita en la región de estudio.

Tabla 14. Variación de pesos y contrastes del mapa de densidad estructural obtenido por el método booleano.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
0	14296	56	-1.018475	3.331166	-4.34964
1	4778.26	104	0.7145482	-0.645944	1.360492

Tabla 15. Variación de pesos y contrastes del mapa del campo magnético total por el método categórico.

Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Dominios mineros	W (+)	W (-)	C
1	3687.082	10	-1.3873062	0.2252982	-1.6126
2	7330.463	78	-0.0124041	0.0331314	-0.04554
3	5027.067	53	-0.0217177	0.0219006	-0.04362
4	921.82	9	-0.0993307	0.0075509	-0.10688
5	347.9225	6	0.47715881	-0.0138393	0.490998
6	97.245	4	1.37104737	-0.0184035	1.389451

Tabla 16. Áreas de los mapas pronóstico en km<sup>2</sup>, por superposición ponderada.

Favorabilidad	Área Mp1	Área Mp2	Área Mp3	Área Mp4	Área Mp5
Muy Baja	847.384	341.979	408.694	626.057	171.909
Baja	1200.895	690.234	356.844	1133.631	2189.324
Moderada	1548.058	1439.005	1776.280	2033.672	11506.000
Alta	1062.106	1692.914	855.310	1569.672	990.884
Muy Alta	734.808	<b>1935.559</b>	1015.158	740.855	171.588

Nota: Mp1- Mapa de pronóstico 1.

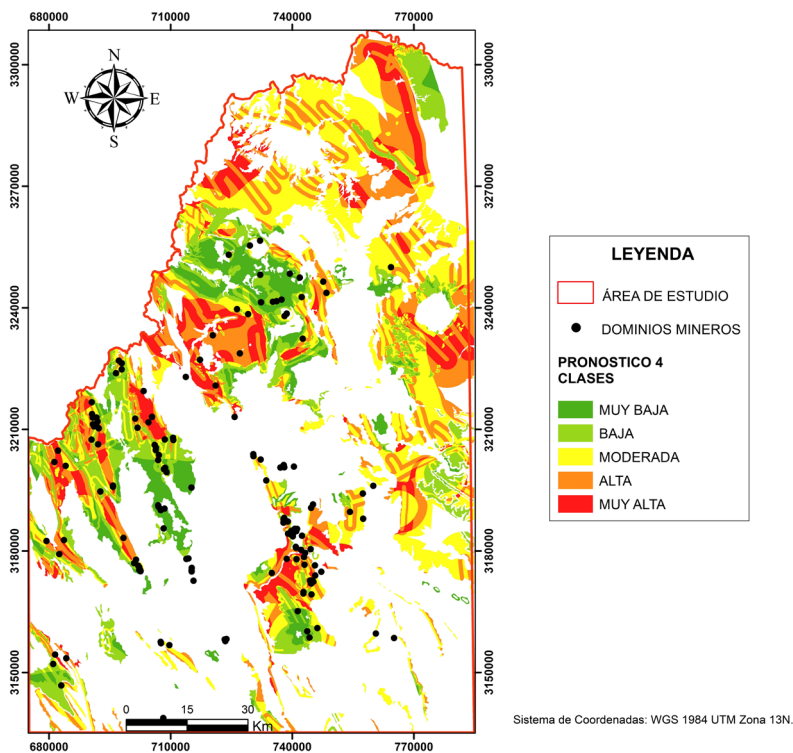
Tabla 17. Análisis de contribución de las variables geológicas consideradas y su importancia de permutación.

No	Variables	Porcentaje de Contribución	Importancia de permutación
1	Densidad Estructural	28.8	23.3
2	Pendiente	21.7	14.9
3	Geofísica	18.2	19.4
4	Geoquímica	16.2	18.4
5	Litología	12.2	18
6	Distancia Euclidiana	2.8	6

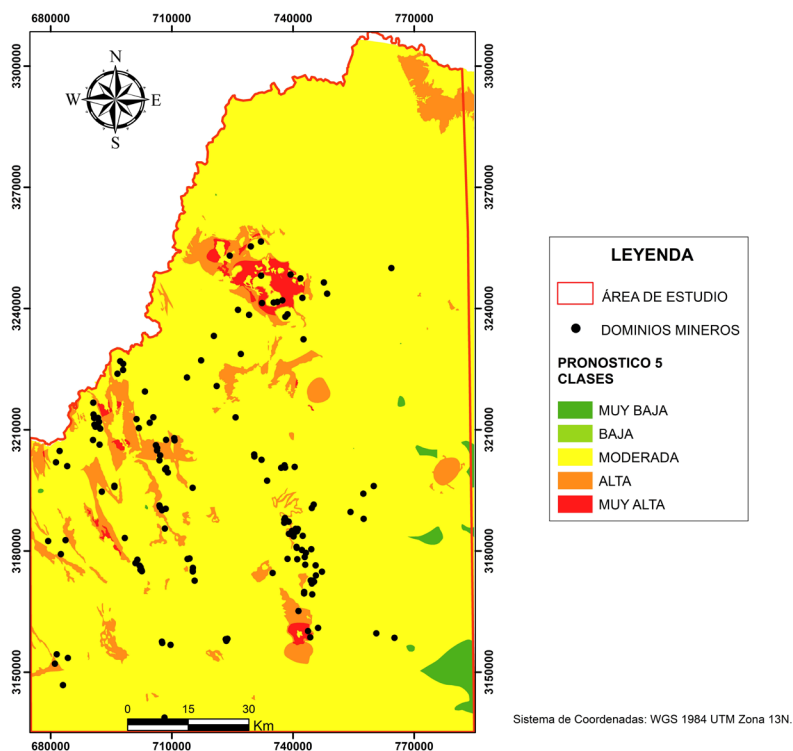
Tabla 18. Interpretación del AUC (Tomado de Araújo *et al.*, 2005).

Indicador
<b>Excelente</b> si el AUC > 0.90
<b>Buena</b> si 0.80 > AUC < 0.90
<b>Aceptable</b> si 0.70 > AUC < 0.80
<b>Mala</b> si 0.60 > AUC < 0.70
<b>No válida</b> si 0.50 > AUC < 0.60





**Figura 14** Mapa de pronóstico 4. Este mapa se obtuvo mediante el método de superposición ponderada y muestra la favorabilidad a la ocurrencia de depósitos de fluorita en la región de estudio.



**Figura 15** Mapa de pronóstico 5. Este mapa se obtuvo mediante el método de superposición ponderada y muestra la favorabilidad a la ocurrencia de depósitos de fluorita en la región de estudio.

El mapa pronóstico 3 (Figura 13) indica la integración de los mapas de evidencia geológico, geoquímico, pendiente y distancia euclidiana. Se obtienen áreas con indicadores favorables, pero también muestra grandes áreas de baja a moderada favorabilidad para la ocurrencia de nuevas mineralizaciones de fluorita.

El mapa pronóstico 4 (Figura 14) muestra áreas alineadas a las estructuras geológicas, representando un criterio estructural para la búsqueda de nuevos yacimientos minerales de fluorita.

El mapa pronóstico 5 (Figura 15) es el que cuenta con una menor favorabilidad, pues el área con favorabilidad muy alta para encontrar nuevas mineralizaciones solamente ocupa un área de 171.909 km<sup>2</sup> (Tabla 17), mientras que la mayor área posee un rango moderado para encontrarlas. Cada uno de estos mapas de pronóstico abarca áreas calculadas mediante superposición ponderada con probabilidades que van desde muy baja hasta muy alta para la ocurrencia de depósitos de fluorita en la región de estudio (Tabla 17).

Se concluye que el mapa de pronóstico 2 es el que mejores resultados aporta a la cartografía predictiva, ya que para un rango de favorabilidad del 80-100% se obtiene un área de 1935.559 km<sup>2</sup>,

lo que representa el 31.73% de favorabilidad muy alta.

Según el modelo de máxima entropía y con base en la reclasificación que presentan los metalotectos, el mapa de potencial mineral ofrece un excelente resultado, siendo el mapa de densidad estructural el de mayor significancia con un 28.8% y un valor de 23.3 de importancia de permutación (Tabla 17).

La Figura 16 indica la variación de la predicción calculada por el modelo, el cual aporta un valor correspondiente al área total bajo la curva (AUC-por sus siglas en inglés). El valor AUC indica cuán preciso es el modelo (mostrando valores entre 0 y 1). La curva característica operativa relativa (*Receiver Operating Characteristic*-en inglés) describe las presencias (verdaderos positivos, en las Y) contra la tasa de falsas alarmas (verdaderos negativos, en las X).

El resultado se muestra como la línea roja (Figura 16). La línea negra es la que indica que tiene un muy buen clasificador con un área muy cercana a 1. Araújo et al. (2005) recomiendan utilizar la Tabla 18 para la interpretación del AUC en los modelos generados con el modelo de máxima entropía.

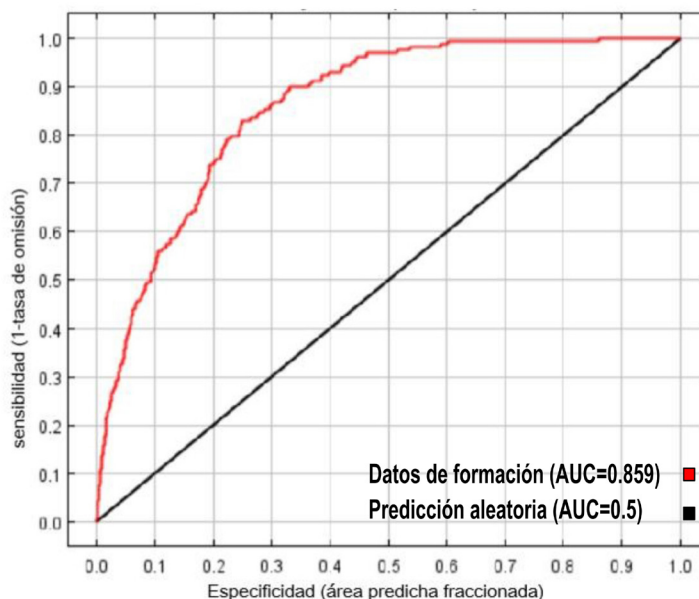
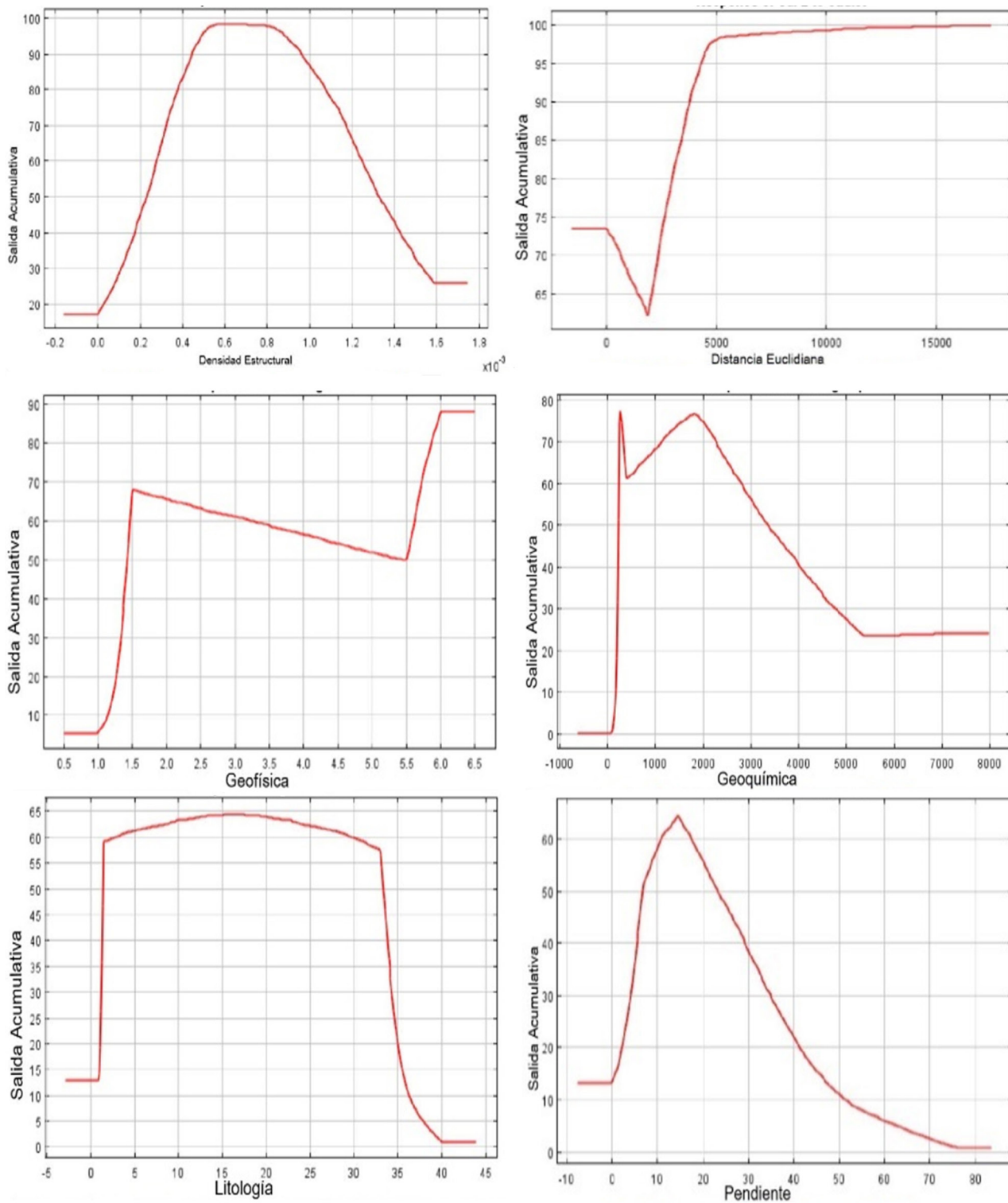


Figura 16 Variación de la predicción calculada por MaxEnt (AUC: Área total bajo la curva).



**Figura 17** Curvas de cambio en la probabilidad de presencia pronosticada.

El valor del AUC, según el modelo de máxima entropía para el caso que ocupa la investigación, es de 0.859, por tanto se concluye que éste (Figura 16) responde a una categoría de buena precisión. En la Figura 17 se aprecian las curvas de cambios de probabilidades de éxito del pronóstico realizado mediante el modelo de máxima entropía, el cual depende de las correlaciones de formas que no son evidentes en las curvas (Phillips y Dudik, 2008). Éstas muestran la probabilidad de presencia y éxito de la mineralización (comprendida entre 0 y 1) en función de los valores que adopta la variable.

## 6. Conclusiones

El mapa de pronóstico 2 es el mejor predictor debido a que, al combinar las capas de entrada del mapa geológico, geoquímico, de distancia euclidiana estructural, de densidad, pendiente y el mapa geofísico, se genera un mapa de favorabilidad muy alta en un área de 1935.559 km<sup>2</sup>. Según este mapa las zonas más favorables a la ocurrencia de depósitos de fluorita se ubican al NE y SO de la región, en correspondencia con las principales estructuras geológicas.

En el extremo NE del área de estudio, coincidiendo espacialmente con el anticlinal El Consuelo y la cabalgadura del mismo nombre, existen sectores muy favorables para la exploración de depósitos de fluorita. El mapa de potencial mineral obtenido mediante el modelo de máxima entropía ofrece un resultado satisfactorio, contribuyendo significativamente el mapa de densidad estructural con un porcentaje del 28.8%.

La metodología utilizada para generar los mapas de favorabilidad, apoyada en los métodos de integración a través de superposición ponderada, lógica booleana y el modelo de máxima entropía, resulta ser adecuada para el análisis digital predictivo de depósitos de fluorita en noreste de México.

## Agradecimientos

Queremos dejar constancia de agradecimiento a los revisores del presente trabajo, al Dr. Adrián

Martínez Vargas (Senior Resource Geologist), y a un revisor anónimo, cuyos comentarios constructivos en el uso de las metodologías de integración de datos y aspectos de carácter geológico vinculados con los depósitos de fluorita en el noreste de México, respectivamente, permitieron mejorar el manuscrito. También deseamos agradecer al Dr. Tendai Njila, de la Universidad de Harare, Zimbabwe, por sus acertados comentarios al manuscrito y mapas de pronósticos elaborados. Por último, queremos dejar constancia de nuestro agradecimiento a la Universidad Autónoma de Coahuila por permitirnos desarrollar este trabajo en el marco de las investigaciones geológicas aplicadas a la metalogenia del noreste de México.

## Referencias

- Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F., 2005, Measuring performance of mineral-potential maps: Natural Resources Research, 14 (1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11053-005-4674-0>
- Agterberg, F.P.; Bonham-Carter, G.F., Wright, D.F., 1990, Statistical pattern integration for mineral exploration, In: Computer Applications in Resource Estimation Prediction and Assessment for Metals and Petroleum, Gaal, G. & Merriam, D.F. (eds.), Pergamon Press, Oxford, 1-21. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037245-7.50006-8>
- Anderson, T.H., Schmidt, V.A., 1983, The evolution of Middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean Sea region during Mesozoic time: Geological Society of America Bull, 94, 941-966. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<941:TEOMAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<941:TEOMAA>2.0.CO;2)
- Araújo, M., Pearson, R., Thuiller, W., Erhard, M., 2005, Validation of species climate impact models under climate change. Global Change Biology, 11, 1504-15. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01000.x>
- Aronoff, S., 1989, Geographic information systems: a management perspective: Ottawa, Canada, WDL Publications, 294 p.



- Azpeitia-Caballero, A., 2007, Minerales de los distritos mineros metálicos Zimapán, Pachuca-Real del Monte, Molango y su aplicación didáctica, Estado de Hidalgo, 99p.
- Benomar, T.B., Hu, G., Bian, F., 2009, A predictive GIS model for potential mapping of copper, lead, and zinc in langping area, China: *Geo-Spatial Information Science*, 12 (4), 243-250. <https://doi.org/10.1007/s11806-009-0089-0>
- Berry, J.K., 1993, *Beyond Mapping: concepts, algorithms, and issues in GIS*: Fort Collins, Colorado, USA, GIS World Books, 266 p.
- Bonham-Carter, G.F., 1994, *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*: Ottawa, Canada, Pergamon, 398 p.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F., 1988, Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1585-1592. <https://doi.org/10.1029/SC010p0015>
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F., 1989, Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential, en Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F. (eds.), *Statistical applications in the earth sciences: Geological Survey of Canada Paper* 89-9, 171-183. <https://doi.org/10.4095/128059>
- Brown, W.M., Gedeon, T.D., Groves, D.I., Barnes, R.G., 2000, Artificial neural networks: a new method for mineral prospectively mapping: *Australian Journal of Earth Sciences*, 47, 757-770. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2000.00807.x>
- Burrough, P.A., 1986, *Principles of geographical information systems for land resources assessment*: Oxford, Reino Unido, Clarendon Press, 194 p. <https://doi.org/10.1080/10106048609354060>
- Camprubí, A., González-Partida, E., Richard, A., Boiron, M.C., González-Ruiz, L.E., Aguilar-Ramírez, C.F., Fuentes-Guzmán, E., González-Ruiz, D., Legouix, C., 2019, MVT-Like Fluorite Deposits and Oligocene Magmatic-Hydrothermal Fluorite-Be-U-Mo-P-V Overprints in Northern Coahuila, Mexico: *Minerals*, 9 (1), 58. <https://doi.org/10.3390/min9010058>
- Carranza, E. J. M., 2004, Weights of evidence modeling of mineral potential: a case study using small number of prospects, *Abra, Philippines: Natural Resources Research*, 3, 173-187. <https://doi.org/10.1023/B:NARR.0000046919.87758.f5>
- Cox, D.P., Singer, D.A., 1986, *Mineral deposits models (eds.): USGS Bulletin* 1693, 379 p. <https://doi.org/10.3133/b1693>
- DeCelles, PG., Graham, S.A., 2015, Cyclical processes in the North American Cordilleran orogenic system: *Geology*, 43, 499-502. <https://doi.org/10.1130/G36482.1>
- González-Partida, E., Carrillo-Chavez, Grimmer A., Pironon, J., 2002, Petroleum-rich Fluid inclusion in fluorite, La Purisima Mine Coahuila, México: *International Geology Review*, 44(8), 755-764. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.44.8.755>
- González-Partida, E., Carrillo-Chávez, A., Grimmer, J.O.W., Pironon, J., Mutterer, J., Levresse, G., 2003, Fluorite deposits at Encantada-Buenavista, Mexico: products of Mississippi Valley type processes: *Ore Geology Review*, 23, 107-124. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(03\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(03)00018-0)
- González-Sánchez, F., Puente-Solís, R., González-Partida, E., Camprubí, A., 2007, Estratigrafía del Noreste de México y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59 (1), 43-62. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a4>
- Gonzalez-Sánchez, F., Camprubi A., González-Partida E., Puente Solia R., Canet C., Centeno-Garcia E., Atudorei V., 2009, Regional stratigraphy and distribution of epigenetic stratabound celestine, fluorine, barite and Pb-Zn deposits in the MVT province of northeastern Mexico: *Mineralium Deposita*, 44, 343-361. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0212-4>

- Goldhammer, R. K., 1999, Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast of Mexico, in Bartolini, C., Wilson, J.L., and Lawton, T.F., eds., Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico: Geological Society of North America, Special Paper 340, 1-58. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2340-X.1>
- Harris, D., Zurcher, L., Stanley, M., Marlow, J., Pan, G., 2003, A comparative analysis of favorability mappings by weights of evidence, probabilistic neural networks, discriminant analysis, and logistic regression: Natural Resources Research, 12, (4), 241-255. <https://doi.org/10.1023/B:NARR.0000007804.27450.e8>
- Harris, J.R., Lemkow, D., Jefferson, C., Wright, D., Falck, H., 2008, Mineral potential modelling for the greater Nahanni ecosystem using GIS based analytical methods: Natural Resources Research, 17(2), 51-78. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69496-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69496-0_11)
- Jianping, C., Gongwen, W., Changbo, H., 2005, Quantitative prediction and evaluation of mineral resources based on GIS: A case study in Sanjiang region, southwestern China: Natural Resources Research, 14 (4), 285-294. <https://doi.org/10.1007/s11053-006-9005-6>
- Keppie, F., 2018, What caused rifting in the Gulf of Mexico and why it matters: Stratigraphic and thermal implications. AAPG Hedberg: Geology of Middle America—the Gulf of Mexico, Yucatan, Caribbean, Grenada and Tobago Basins and Their Margins In: “Integration of the geology of the area from the southern onshore of North America to the northern onshore of South America”, Guadalajara, Spain, July 2-5, 2018.
- Kim, J.H., Kee, W.S., Seo, S.K., 1996, Geological structures of the Yeoryang-Imgye area, northern part of Mt. Taebaek Region, Korea: The Journal of the Geological Society of Korea, 32(1), 1-15.
- Knox-Robinson, C.M., 2000, Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralization potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia: Australian Journal of Earth Sciences, 47(5), 929-941. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2000.00816.x>
- Lee, S., Ryu, J.H., Kim, I.S., 2007, Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea: Landslide, 4(4), 327-338. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0088-x>
- Levesse G., Tritlla, Villareal, J., González-Partida, E., 2006, The “El Pilote” fluorite skarn: A crustal deposit in the understanding and interpretation of the origin and mobilization of F from northern Mexico deposits: Journal of Geochemical Exploration, 89 (1-3), 205-209. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.11.042>
- Liu, Y., Zhou, K., Xia, Q., 2017, A MaxEnt model for mineral Prospectivity Mapping: Natural Resources Research, 25, 299-313. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9355-2>
- Luna, I. D., Espinosa, I. J., Escobar, I. J., Moreno, I. M., 2008, Carta geológico-Minera Manuel Benavides H13-9 Escala 1: 250 000 y Carta Geológico-Minera San Miguel H13-12. Pachuca, Hidalgo, México: Servicio Geológico Mexicano. 2 Mapas.
- McAnulty, W.N., Sewell, C.R., Atkinson, D.R., Rasberry, J.M., 1963, Aguachile Beryllium-Bearing Fluorspar District, Coahuila, Mexico: GSA Bulletin, 74, 735-744. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1963\)74\[735:ABFDCM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[735:ABFDCM]2.0.CO;2)
- Oh, H.J., Lee, S., 2008, Regional Probabilistic and Statistical Mineral Potential, Mapping of Gold – Silver Deposits Using GIS in the Gangreung Area, Korea: Resource Geology, 58 (2), 171 – 187. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00050.x>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Schapire, R. E., 2006, Maximum entropy modeling of species geographic distributions: Ecological

- Modelling, 190 (3), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S., Dudík, M., 2008, Modeling of species distributions with Maxent: new extension and a comprehensive evaluation: *Ecography*. 31(2), 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2007.5203.x>
- Pindell, J. L., Kennan, L., 2009, Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update, in K.H. James, M.A. Lorente, and J.L. Pindell, eds., *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate*: Geological Society, London, Special Publication 328, p. 1–55. <https://doi.org/10.1144/sp328.1>
- Pindell, J., Miranda C. E., Cerón, A., Hernández, L., 2016, Aeromagnetic Map Constrains Jurassic-Early Cretaceous Synrift, Break Up, and Rotational Seafloor Spreading History in the Gulf of Mexico In: Lowery, C. M., Snedden, J.W., Rosen, N. C. (Ed.), *Mesozoic of the Gulf Rim and Beyond: New Progress in Science and Exploration of the Gulf of Mexico Basin*: SEPM Society for Sedimentary Geology, Vol: 35. <https://doi.org/10.5724/gcs.15.35.0123>
- Rigol-Sánchez, J. P., Chica-Olmo, M., Rodríguez-Galiano, V., y Pardo-Igúzquiza, E., 2011a, Cartografía predictiva mediante SIG de depósitos epitermales de oro en Cabo de Gata, Almería, España: *Boletín Geológico y Minero*, 122, 4, 517-530.
- Rigol-Sánchez, J.P., Chica-Olmo, M., Pardo-Igúzquiza, E., Rodríguez-Galiano, V., Chica-Rivas, M., 2011b, Análisis e integración de datos espaciales en investigación de recursos geológicos mediante Sistemas de Información Geográfica: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63 (1), 61-70. <https://doi.org/10.18268/bsgm2011v63n1a5>
- Romo-Ramírez, J.R., Herrera-Monreal, J.C., Rodríguez-Rodríguez, J.S., Larrañaga-Obregón, G., 2001, Informe de la carta geológico-minera San Miguel, clave H13-12, escala 1:250000, Estados de Coahuila y Chihuahua: Saltillo, Coahuila, México, Consejo de Recursos Minerales, 40 p.
- Routhier, P., 1980, Oú sont les métaux pour l'avenir *Mémoire B.R.G.M.* No. 105, 410 p.
- Salvador, A., 1991, Origin and development of the Gulf of Mexico basin, in Salvador, A. (ed.), *The Gulf of Mexico Basin*, The Geology of North America: Geological Society of America, Vol. J, 389–444. <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-J.389>
- Sánchez-Bermeo, G., Jiménez Hernández, A., Caballero Martínez, J.A., 2002, Informe de la Carta Geológico-Minera Manuel Benavides Clave H13-9, Escala 1:250000, Estados de Coahuila y Chihuahua; Consejo de Recursos Minerales, Gerencia de Geología y Geoquímica, Oficina Regional Coahuila: Saltillo, Coahuila, México, 23 p.
- Sandwell, D. T., Müller, R. D., Smith, W. H. F., Garcia, E., Francis, R. 2014. New global marine gravity model from Cryo-Sat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346, 6205, 65-67. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>.
- Stern, R., y Dickinson, W., 2010, The Gulf of Mexico is a Jurassic backarc basin: *Geosphere*, 6(6), 739–754. <https://doi.org/10.1130/ges00585.1>
- Tritlla, J., Levresse, G., Corona-Esquivel, R., Banks, D., Lamadrid, H., Bourdet, J., 2006, Depósitos de Pb-Zn-Cu-Ba-F-Sr epigenéticos estratoligados en series sedimentarias en relación con salmueras de cuenca: depósitos de tipo “Mississippi Valley” (MVT) y similares en México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 103-139. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n1a4>
- Wilson, J.L., 1990, Basement structural controls on Mesozoic carbonate facies in Northeastern Mexico. A review. In: Tucker, M., Wilson, J.L., Crevello, P.D., Sarg, J.F. and Read, J.F. (ed.), *Carbonate platforms, facies, sequences and evolution*: International Association of Sedimentologists Special Publication, 9, 235-255. <https://doi.org/10.1002/9781444303834.ch9>