

## Metodología multicriterio SIG para la evaluación del potencial de recursos auríferos en la cuenca del Alto Chicama - La Libertad

Multicriteria SIG methodology for the evaluation of the potential of gold resources in the Alto Chicama Basin – La Libertad

Orlando Alex Siccha-Ruiz<sup>1,2,\*</sup> 

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

<sup>2</sup> Escuela de Minas, Universidad privada César Vallejo, campus Carretera Pimentel km 3.5, Chiclayo, Perú

\* Autor correspondiente: [orlando.siccha@unitru.edu.pe](mailto:orlando.siccha@unitru.edu.pe) (O. Siccha)

DOI: [10.17268/rev.cyt.2024.04.03](https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2024.04.03)

### RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el potencial de recursos auríferos en la Cuenca del Alto Chicama (CAC) utilizando una metodología multicriterio basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se seleccionaron criterios clave como unidades geológicas, concesiones mineras metálicas, fallas geológicas, depósitos minerales metálicos, datos geoquímicos y análisis provenientes de sensores remotos, los cuales fueron ponderados y modelados en un entorno SIG para generar un mapa integral de zonificación del potencial aurífero. Los resultados del análisis multicriterio revelan que las zonas norte y sureste de la cuenca exhiben un elevado potencial aurífero, sugiriendo que estas áreas son particularmente favorables para futuras exploraciones mineras. Estas zonas destacan por su correlación con características geológicas y geoquímicas críticas, lo que valida la eficacia del modelo propuesto. En conclusión, la combinación de SIG y metodologías multicriterio ha demostrado ser una herramienta robusta y eficaz para la planificación estratégica en exploración minera.

**Palabras clave:** Sistema de información geográfica; evaluación multicriterio; potencial aurífero

### ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the gold resource potential in the Alto Chicama Basin (CAC) using a multi-criteria methodology based on Geographic Information Systems (GIS). Key criteria such as geological units, metallic mining concessions, geological faults, metallic mineral deposits, geochemical data, and remote sensing analyses were selected, weighted, and modeled in a GIS environment to generate a comprehensive zoning map of gold potential. The results of the multi-criteria analysis reveal that the northern and southeastern areas of the basin exhibit high gold potential, suggesting that these areas are particularly favorable for future mining exploration. These zones stand out due to their correlation with critical geological and geochemical characteristics, validating the effectiveness of the proposed model. In conclusion, the combination of GIS and multi-criteria methodologies has proven to be a robust and effective tool for strategic planning in mining exploration.

**Keywords:** Geographic information systems; multicriteria evaluation; gold potential

### 1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han revolucionado la comprensión de lo que ocurre en la superficie de un territorio, facilitando la obtención de información actualizada que permite una planificación adecuada y una administración eficiente de los recursos naturales (RRNN) (Martin, 1985). El uso de los SIG es particularmente valioso en la determinación del potencial de recursos auríferos de un territorio, ya que proporcionan herramientas avanzadas para gestionar y analizar la información espacial disponible.

Como señala Chuvieco (2010), los SIG son herramientas fundamentales para la gestión de la información territorial, permitiendo diferentes aproximaciones y simplificando la complejidad de los datos en mapas resultantes. Esta capacidad para manejar información territorial es lo que distingue a los SIG de otras herramientas, facilitando la visualización y análisis de grandes volúmenes de datos geoespaciales.

Desde los trabajos pioneros de Bertalanffy (1964), Leopold (1971), Carpenter (1976), y Lee (1982) la combinación de SIG y EMC ha evolucionado significativamente. En España, destacan las aportaciones de Gómez (1992) y Estevan (1984), que junto con los desarrollos de los equipos dirigidos por González Bernáldez y



González Alonso en diversas universidades españolas, han establecido una sólida base metodológica para la aplicación de estas herramientas en la gestión territorial y la evaluación de recursos minerales.

La teoría subyacente a la EMC ha sido desarrollada y refinada por numerosos investigadores, incluyendo a Canter (1977), Canter y Hill (1979), Carter (1985), Clark (1980), y Lee (1982). Estas metodologías han sido aplicadas en diversas áreas, destacándose en la evaluación de recursos minerales y territoriales Nijkamp y Van Delft (1977), Nijkamp (1990), Voogd (1983) y Roy (1987).

En los últimos años, se han llevado a cabo diversos estudios que han aplicado Sistemas de Información Geográfica (SIG) y metodologías multicriterio para la evaluación de recursos minerales en diferentes regiones del mundo. Nihar et al. (2010) desarrollaron un enfoque basado en un árbol de decisiones y evaluaciones multicriterio para el mapeo del potencial mineral en el cinturón de esquisto Hutti-Maski. Ottone (2021) propuso una clasificación multicriterio de proyectos de minería de oro en la Guyana Francesa, con el objetivo de estandarizar los tipos de proyectos mineros para facilitar la evaluación de riesgos a nivel territorial. De manera similar, Dominic y Ofori (2023) elaboraron modelos predictivos que caracterizan zonas de alto potencial aurífero en el área de licencia de prospección (PL) de Josephine, en el noroeste de Ghana. Estos modelos se basaron en métodos fundamentados en datos, como la relación de frecuencia y el valor de la información, utilizando ocho factores geocientíficos relacionados con la mineralización. Además, estas metodologías han sido empleadas en otros contextos. Por ejemplo, Olakunle y Isaac (2020) aplicaron un análisis de decisiones multicriterio utilizando la técnica de procesamiento de jerarquía analítica de Saaty para determinar la distribución del potencial de aguas subterráneas en áreas densamente pobladas de la metrópolis de Ibadan, en el suroeste de Nigeria. Algaput et al. (2021) utilizaron un método de evaluación multicriterio flexible basado en SIG para identificar las áreas más adecuadas que permitan alcanzar un balance anual positivo de energía no renovable. Asimismo, (Sulaiman & Mustafa, 2023) emplearon el proceso de jerarquía analítica (AHP) y técnicas geoespaciales para identificar sitios potenciales de agua subterránea en Zakhó.

Gajere et al (2024) utilizó modelos de decisión multicriterio basados en SIG para la exploración de barita en Benue Trough, Nigeria. Integraron sistemáticamente datos geoespaciales sobre geofísica, teledetección y atributos estructurales y litológicos para prospeccionar zonas potenciales de barita dentro de la depresión Benue de Nigeria Central (MBT). Se utilizó la evaluación de atributos de correlación para establecer la relación entre las ocurrencias de depósitos minerales y los datos geoespaciales, mientras que la integración de datos se implementó utilizando los modelos multicriterio optimización multiobjetivo por análisis de proporciones (MOORA), técnica para el orden de preferencia por similitud con solución ideal (TOPSIS) y evaluación de proporciones aditivas (ARAS). Madani (2011) generó un mapa de favorabilidad para la exploración de oro en el área de la mina de oro Bulghah utilizando la integración de conjuntos de datos geográficos dentro de un entorno SIG. Los análisis de datos espaciales y la integración de diferentes conjuntos de datos geográficos se llevan a cabo con base en una técnica de ponderación e impulsada por el conocimiento. El proceso de integración implica la ponderación y puntuación de diferentes capas que afectan la mineralización de oro en el área de estudio utilizando el método de superposición de índices dentro del entorno PCI Geomatica. Tende et al. (2021) emplearon sistemáticamente varios métodos que involucraban análisis de Fry, análisis de correlación de distancias, gráficos de área de predicción, así como modelos predictivos basados en el conocimiento, incluidos TOPSIS, ARAS y MOORA, para desentrañar los atributos geológicos espaciales relacionados con la mineralización de oro. Adicionalmente, llevaron a cabo la validación estadística de los modelos predictivos fundamentados en el conocimiento, utilizando el análisis de la curva ROC/AUC (Característica Operativa del Receptor/Área Bajo la Curva). Krois y Schulte (2014) realizaron una evaluación multicriterio basada en SIG con el objetivo de identificar ubicaciones potenciales para la implementación de técnicas de conservación de suelo y agua en la cuenca del Ronquillo, al norte de Perú. Este enfoque consideró criterios ambientales para la evaluación de sitios y empleó el Proceso Analítico Jerárquico como método de toma de decisiones. Los datos espaciales fueron procesados mediante un sistema de información geográfica, y los sitios potenciales fueron clasificados a través de una evaluación multicriterio basada en factores meteorológicos, hidrológicos, topográficos, agronómicos y pedológicos. Esta metodología se aplicó para determinar ubicaciones adecuadas para la construcción de terrazas y sistemas de diques en la cuenca del Ronquillo, situada en los Andes del norte de Perú. Costa et al. (2020) utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis multicriterio a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), este estudio tuvo como objetivo mapear el potencial de aguas subterráneas para el municipio de Itabira (MG), uno de los mayores centros mineros de Brasil. Se utilizaron mapas temáticos de uso y ocupación del suelo, suelo, geología, pendiente, densidad de lineamientos y densidad de drenaje para evaluar el potencial en la región. A partir de la evaluación de estos parámetros y sus clases, se asignaron ponderaciones mediante el método PAH en función de la influencia de cada uno de ellos para favorecer la infiltración de agua y la recarga de acuíferos. Los mapas temáticos se integraron en un entorno SIG, generando un mapa del potencial de aguas subterráneas del municipio dividido en cinco clases de potencial: muy bajo, bajo, moderado, alto

y muy alto. Rekik y El Alimi (2023) propusieron una evaluación preliminar de la idoneidad del terreno para la construcción de instalaciones híbridas solares y eólicas (PV-eólica, PV-CSP y CS-eólica) en Tataouine, sur de Túnez. Para este fin, se desarrolló una metodología MCDA basada en SIG basada en una extensa revisión de la literatura y la retroalimentación de expertos, teniendo en cuenta el clima, la topografía, la accesibilidad y los factores ambientales. Finalmente, Takam et al. (2021) evaluaron el estado de las áreas forestales protegidas en el distrito minero de cobre Solwezi de Zambia, propenso a la fragmentación forestal. Además, este estudio identificó áreas adecuadas para la conservación, basándose en criterios estandarizados que combinan el análisis de decisiones de criterios múltiples (MCDA) y el enfoque SIG. Se desarrolló un modelo de idoneidad para la selección de las áreas adecuadas y la eliminación de las no adecuadas, utilizando SIG y el proceso analítico jerárquico (AHP). En este modelo se utilizaron cinco criterios de idoneidad y dos criterios de restricción.

Otras investigaciones como la de Mammadli et al. (2020) indicaron que la cantidad y diversidad de los parámetros dieron origen a la idea de desarrollar una herramienta de decisión utilizando un modelo de análisis de decisiones de múltiples criterios como el Proceso Analítico Jerárquico. La estructura sin precedentes de la herramienta toma en consideración todos los parámetros y genera preferencias con respecto a tres opciones diferentes para cada producto básico. Por lo tanto, un producto básico en un proyecto minero podría caracterizarse como un producto principal (un producto líder y otros coproductos), como un subproducto y, finalmente, como desecho. Li et al. (2022) exploran métodos favorables para evaluar el desempeño de la minería verde (GMP) de las minas de oro subterráneas. Primero, de acuerdo con las características específicas de las minas de oro subterráneas, se formula un sistema de criterios de evaluación para GM (minería verde). Mientras tanto, los pesos se calculan utilizando una técnica integrada de DEMATEL y ANP gris, que considera la correlación entre los indicadores. Posteriormente, propusieron la metodología de solución para la evaluación del desempeño con base en la normalización de los indicadores. Otra investigación de Pouresmaeli et al. (2024) analizaron los principios y conceptos básicos de los métodos MCDM (toma de decisiones multicriterio), incluida la capacidad de priorizar y sopesar criterios múltiples y conflictivos y ayudar a los tomadores de decisiones a evaluar diversas opciones. Según los resultados, se han publicado 1579 artículos MCDM en minería desde el inicio hasta el 15 de abril de 2023, y realizaron un análisis cuantitativo de estos artículos. Asimismo, De Simon et al. (2019) utilizaron el AFP (Análisis de función de paisaje) para evaluar los resultados de 20 años de proyectos de recuperación ambiental en una mina de oro. Se desarrollaron diez mapas base: Declividad, Estratificación de Vegetación/Fisonomía, Fracturas y fallas, Grado de compactación/estructura del suelo, Características de erosión, Estabilidad geotécnica, Hidrogeología local, Grado de aislamiento de fragmentos, Suelos y Drenaje. Estos se combinaron para dar lugar a tres mapas intermedios: Erosión y estabilidad del suelo, Vegetación y Agua. Con la unión de estos tres mapas, fue posible crear el mapa con el análisis final del desempeño de la recuperación ambiental, esto se relaciona con esta investigación al desarrollar y crear mapas de diferentes clases para analizar información importante de una determinada zona. Asimismo, Verga et al. (2018) desarrollaron un modelo que permitiera elegir las minas a intervenir, teniendo en cuenta los distintos factores que permiten evaluar sus efectos externos (medio ambiente, salud pública, paisaje y utilidad para la arqueología industrial). Emplearon un análisis multicriterio mediante el proceso de jerarquía analítica, en el que se compara cada factor principal, resultado y mina, para generar un modelo de evaluación innovador que garantizaba la maximización del valor global de la intervención, en comparación con otros dos métodos (intervención clasificada según la mayor severidad global y clasificada según la relación coste-beneficio). En otros enfoques de evaluación de potencial minero, se tiene a la investigación de Ogah y Abubakar (2024), emplearon el proceso analítico jerárquico (AHP) para delinear el potencial de mineralización en los cinturones de esquisto notables en el noroeste de Nigeria. Se tomaron en consideración conjuntos de datos aeromagnéticos y aeroradiométricos de alta resolución. Esto se logró mediante el uso de técnicas avanzadas de mejora de la señal para estudiar las estructuras, identificar las zonas de alteración hidrotermal (que podrían servir como vía para la mineralización) y comprender los entornos geológicos. Entre las técnicas de mejora se encuentran el primer gradiente vertical, la señal analítica, el análisis de la cuadrícula CET y el pórfido, la deconvolución de Euler y la relación K/Th. Dean (2022) incluyó múltiples perspectivas en el análisis participativo de múltiples criterios (es decir, opciones, objetivos/criterios, ponderaciones y puntuaciones), al tiempo que se abordan diferentes puntos de vista. Finalmente, en el punto de inteligencia artificial se tiene la investigación de Abdelrasoul et al. (2022) proporcionaron una descripción general concisa del desarrollo de métodos de selección múltiple utilizando una red neuronal de retropropagación en cascada hacia adelante (CFBPNN). Se discutieron y compararon numerosos métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM). La comparación incluye varios factores, como la aplicabilidad, la subjetividad, los datos cualitativos y cuantitativos, la sensibilidad y la validez. Se presenta y discute la aplicación de la inteligencia artificial utilizando CFBPNN. La mina de hierro de Chengchao fue seleccionada para esta investigación para elegir el método de minería óptimo.

La necesidad de contar con un plan guía exhaustivo que complemente el mapa metalogénico del territorio y facilite la predicción de la distribución del contenido de hierro en los mantos carboníferos de la Cuenca del Alto Chicama (CAC) ha sido el motor para desarrollar este estudio. La región del Alto Chicama se sitúa en una secuencia sedimentaria que abarca desde el Mesozoico, delimitada al oeste por la estructura del Batolito de la Costa y al este por la cuenca preandina del Marañón Fold Thrust Belt. Esta secuencia incluye sedimentos clásticos, conformando un área minera de gran relevancia para los procesos de subsistencia. A lo largo de su historia, la región ha experimentado ciclos tectónicos de transgresión y regresión marina, lo que ha dado lugar a una columna sedimentaria que supera los 6,000 metros de espesor. Aunque se han registrado actividades magmáticas desde el Jurásico, con niveles andesíticos presentes en los grupos Pucará y Zaña, la secuencia más reciente está compuesta principalmente por formaciones del Cenozoico, pertenecientes al Grupo Calipuy. Las fases tectónicas indican que la secuencia mesozoica completa fue sometida a dos etapas de deformación progresiva durante la orogenia andina: una Fase Peruana y una fase posterior, inferida a partir de la discordancia angular observada en la base de los depósitos volcánicos del Eoceno del Grupo Calipuy, vinculada a la Fase Inca Montgomery (2012).

La Cuenca del Alto Chicama es reconocida por la alta calidad de su carbón, especialmente en la región de Baños Chimú, donde las antracitas son extremadamente puras, con pocas o ninguna intercalación de pizarras. En contraste, la región sureste presenta mantos carboníferos con mayor contenido de azufre y frecuentes capas de pizarras, ubicados principalmente en la base de la Formación Chimú. Estudios en minas como Callacuyán y Tres Amigos revelan un contenido de carbón fijo entre el 70% y 80%, mientras que en Shulchuanca y Yanahuanca, el carbón es semiantracítico o bituminoso, con un contenido de volátiles bajo y un carbón fijo entre 60% y 70%. En el noroeste, en áreas como Huayoay y Baños Chimú, el carbón es predominantemente antracítico, con un contenido de carbón fijo entre el 78% y 82%.

Geológicamente, la Cuenca del Alto Chicama (CAC) se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias y volcánicas, que abarcan un periodo desde el Jurásico Superior hasta el Cuaternario. Las rocas sedimentarias, que se extienden de norte a sur, incluyen formaciones mesozoicas como Chicama, Chimú y Carhuaz, alcanzando espesores de hasta 4,000 metros en el borde oriental de la cuenca. En el borde occidental, las formaciones consisten en una mezcla de rocas volcánicas y sedimentarias del Jurásico Superior al Cretácico Inferior, destacando la Formación Casma y el Grupo Calipuy, con espesores superiores a 2,000 metros. Las rocas sedimentarias de la CAC están plegadas en un anticlinal orientado de Noroeste a Sureste, cortadas por fallas que facilitan la mineralización aurífera. La intensa deformación y plasticidad de los estratos ha potenciado la presencia de oro en la región, además de depósitos epitermales asociados a procesos hidrotermales, similares a los depósitos de Santa Rosa y La Arena Montgomery (2012).

Basado en estudios previos de teledetección realizados en la zona de Lagunas Norte por Minera Barrick, así como en análisis geoquímicos llevados a cabo durante visitas de campo organizadas por el Instituto Geológico Minero Metalúrgico del Perú (INGEMMET), se efectuó un análisis SIG multicriterio para evaluar los datos disponibles y generar un mapa que permita predecir la ubicación de yacimientos con alto contenido de oro en las estructuras carboníferas de la CAC. La estructura del presente estudio se organiza de la siguiente forma: en la Sección 2, se describen los materiales y métodos utilizados, detallando la metodología SIG multicriterio empleada, los criterios seleccionados y su justificación. La Sección 3 presenta los resultados obtenidos del análisis, con un enfoque en la identificación de áreas con alto potencial aurífero en la Cuenca del Alto Chicama, y se discuten. Finalmente, en la Sección 4, se presentan las conclusiones del estudio y se sugieren posibles direcciones para futuras investigaciones.

## 2. METODOLOGÍA

Este estudio combina Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Multicriterio (EMC) para evaluar el potencial aurífero en la Cuenca del Alto Chicama, Perú. A continuación, se detalla el enfoque metodológico, desde la selección de criterios hasta la integración y representación de los resultados.

### 2.1. Selección y justificación de los criterios

La metodología empleada se fundamenta en la técnica del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) desarrollada por Saaty (1980), la cual permite comparar y ponderar criterios múltiples. Se seleccionaron seis criterios fundamentales: unidades geológicas, concesiones mineras metálicas, fallas geológicas, depósitos minerales metálicos, datos geoquímicos y sensores remotos. Estos criterios fueron elegidos por su relevancia directa en la identificación de potenciales áreas auríferas, y su selección está respaldada por estudios previos que demuestran su influencia en la mineralización aurífera.

- Unidades geológicas: Se ponderaron en mayor medida debido a su influencia directa en la localización de depósitos minerales, basada en la formación geológica de la región.

- Concesiones mineras metálicas: Este criterio refleja la actividad minera en la zona, lo que indica áreas con interés histórico y exploratorio.
- Fallas geológicas: Las fallas son conducentes a la mineralización, lo que justifica su alta ponderación.
- Depósitos minerales metálicos: Estos son indicadores directos de mineralización previa, y se ponderaron en función de su proximidad y relevancia.
- Datos geoquímicos y sensores remotos: Aunque con una ponderación menor, estos datos proporcionan información complementaria crucial para la identificación de anomalías mineralógicas.

## 2.2. Integración en el SIG y generación de mapas de potencial

Los datos ponderados fueron integrados en un entorno SIG, donde se superpusieron las capas correspondientes a cada criterio. El SIG permitió una visualización integrada del potencial aurífero, facilitando la identificación de áreas prioritarias para la exploración. La representación final de los resultados se realizó utilizando la simbología y la escala de colores del Manual de Evaluación de Recursos y Potencial Minero 2016 del INGEMMET. Cada área cartográfica fue clasificada en niveles de potencial que van de “Muy bajo” a “Muy alto” (ver Tablas 1 y 2).

**Tabla 1.** Codificación de colores según el nivel

SIMBOLOGÍA		
Nivel	Área de impacto	Código RGB
Muy elevado		217-120-140
Elevado		255-127-74
Moderado		152-230-0
Bajo		255-255-115
Muy bajo		210-235-255

**Tabla 2.** Criterios de evaluación

Nivel	Valor asignado	Clasificación cartográfica
Muy elevado	3	“Muy alto potencial”
	2.9	
	2.8	
	2.7	
	2.6	
Elevado	2.5	“Alto potencial”
	2.4	
	2.3	
	2.2	
	2.1	
Moderado	2	“Medio potencial”
	1.9	
	1.8	
Bajo	1.7	“Bajo potencial”
	1.6	

Nivel	Valor asignado	Clasificación cartográfica
	1.5	
	1.4	
	1.3	
Muy bajo	1.2	“Muy bajo potencial”
	1.1	
	1	

### 2.3. Procedimiento de evaluación multicriterio

El AHP se aplicó para establecer la importancia relativa de cada criterio, siguiendo un enfoque sistemático de comparación por pares. Las variables se agruparon en intervalos y se puntuaron según su impacto en el potencial aurífero. La escala de medida varía de 1/9 (extremadamente menos importante) a 9 (extremadamente más importante) (véase **Tabla 3** y **Tabla 4**), permitiendo una gradación precisa en la ponderación de factores Barredo (1996); y Moreno y Escobar (2000).

Se generó una matriz de comparación por pares, donde cada criterio fue evaluado en relación con los demás, para obtener un peso ponderado que refleja su influencia en el modelo final (ver **Figura 1**). Este proceso asegura que las decisiones en cuanto a la ponderación sean coherentes y estén basadas en datos empíricos, minimizando posibles sesgos.

**Tabla 3.** Escala de evaluación para la asignación de juicios de valor

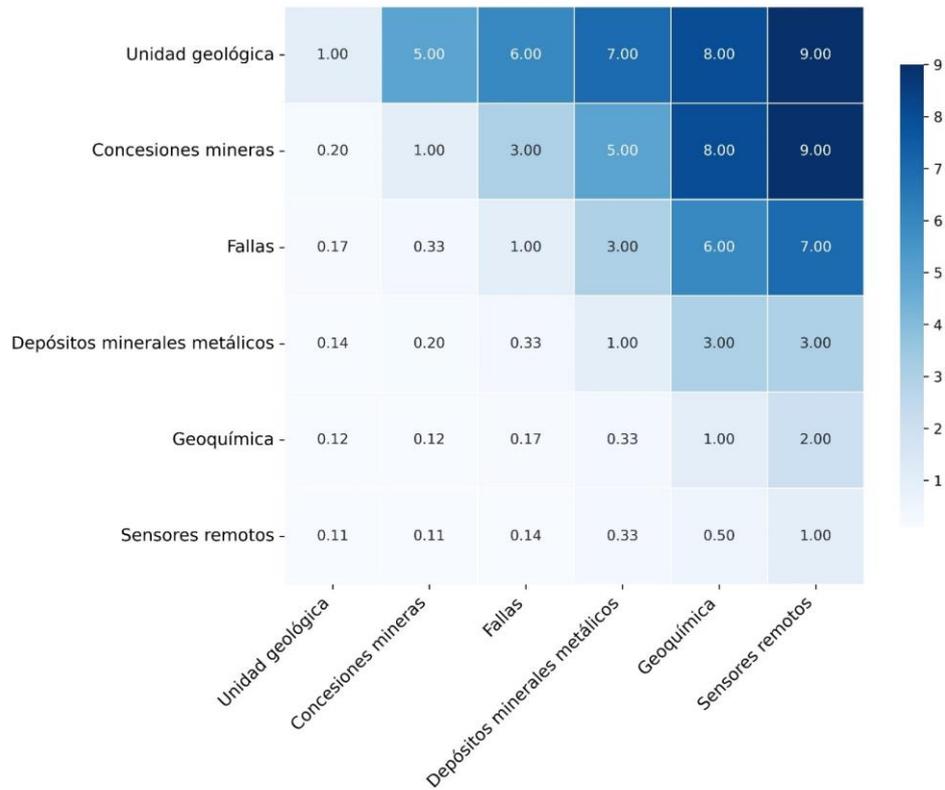
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Mínimo	Muy bajo	Bajo	Ligeramente bajo	Igual	Ligeramente alto	Alto	Muy Alto	Máximo

*Nota.* Obtenido de Saaty (1980).

**Tabla 4.** Escala para evaluar la intensidad de los juicios

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual relevancia	Ambos elementos tienen una contribución equitativa al criterio o propiedad evaluada.
3	Ligeramente más relevante un elemento sobre el otro	La experiencia y el juicio tienden a favorecer uno de los elementos en comparación con el otro.
5	Claramente más relevante un elemento sobre el otro	La experiencia y el juicio muestran una clara preferencia por un elemento sobre el otro.
9	Mucho más relevante un elemento que el otro	Un elemento tiene una dominancia significativa, comprobada en la práctica.
9	Extremadamente relevante un elemento sobre el otro	Un elemento ejerce una dominancia máxima en comparación con el otro.

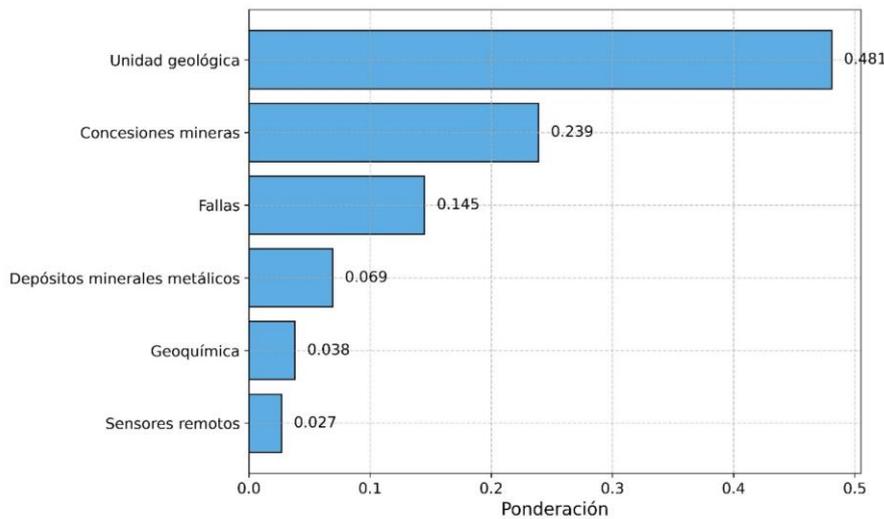
*Nota.* Obtenido de Moreno (2002).



**Figura 1.** Matriz de comparaciones pareadas para el potencial metálico

2.5 Representación e interpretación de resultados

Los resultados fueron representados mediante un mapa de zonificación que muestra las áreas de alto, medio y bajo potencial aurífero. La interpretación de estos resultados se realizó considerando la geología local, los patrones de mineralización conocidos y los datos adicionales obtenidos de sensores remotos y análisis geoquímicos. Las áreas de "Muy alto" potencial identificadas en el mapa sugieren nuevas oportunidades de exploración que coinciden con las observaciones geológicas previas. La **Figura 2** muestra los pesos de los atributos del potencial metálico, la cual se observa que la proporción de la consistencia es de 0.089, siendo menor a 0.100. Asimismo, el atributo con el mayor peso es la unidad geológica con 0.481, seguido de concesiones mineras y fallas con 0.481 y 0.239, respectivamente.



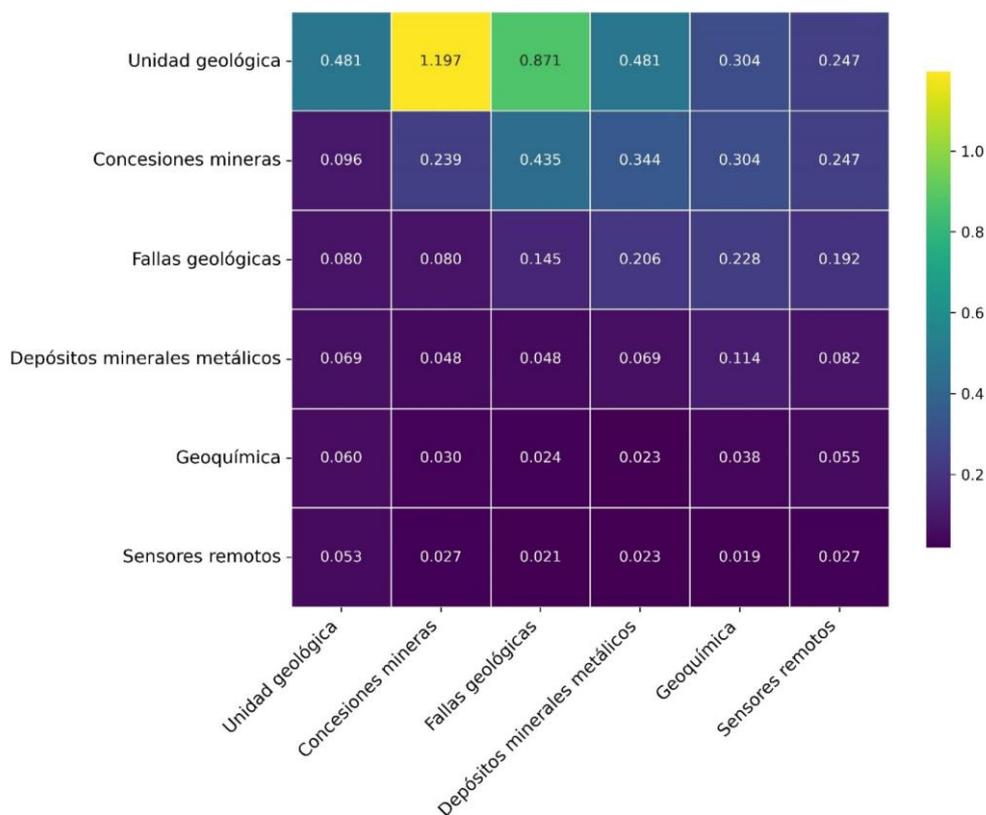
**Figura 2.** Ponderación de los atributos

A continuación, se presenta un resumen de los valores ponderados de cada una de las variables utilizadas en el análisis multicriterio. En la **Tabla 5** se indican los valores asignados a cada variable, así como su clasificación en términos de alto o bajo potencial aurífero. Los valores ponderados obtenidos se han clasificado en base al promedio de los valores ponderados (0.166). las variables con un valor ponderado mayor o igual a este umbral se consideran de alto potencial, mientras que aquellas por debajo del promedio se clasifican como bajo potencial.

**Tabla 5.** Clasificación de las variables según su ponderación en el análisis multicriterio

Variable	Valor ponderado	Clasificación (Alto/Bajo potencial)
Unidad geológica	0.481	Alto potencial
Concesiones mineras	0.239	Alto potencial
Fallas geológicas	0.145	Bajo potencial
Depósitos minerales metálicos	0.069	Bajo potencial
Geoquímica	0.038	Bajo potencial
Sensores remotos	0.027	Bajo potencial

De acuerdo con el proceso analítico jerárquico aplicado a las seis variables estudiadas(criterios), se tiene la ponderación para Unidad Geológica 48.1%, Concesiones Mineras Metálicas 23.9%, Fallas Geológicas 14.5%, Depósitos minera-les Metálicos 6.9%, Geoquímica y Sensores Remotos 2.7%, generando un total de 100% (véase **Figura 3**).

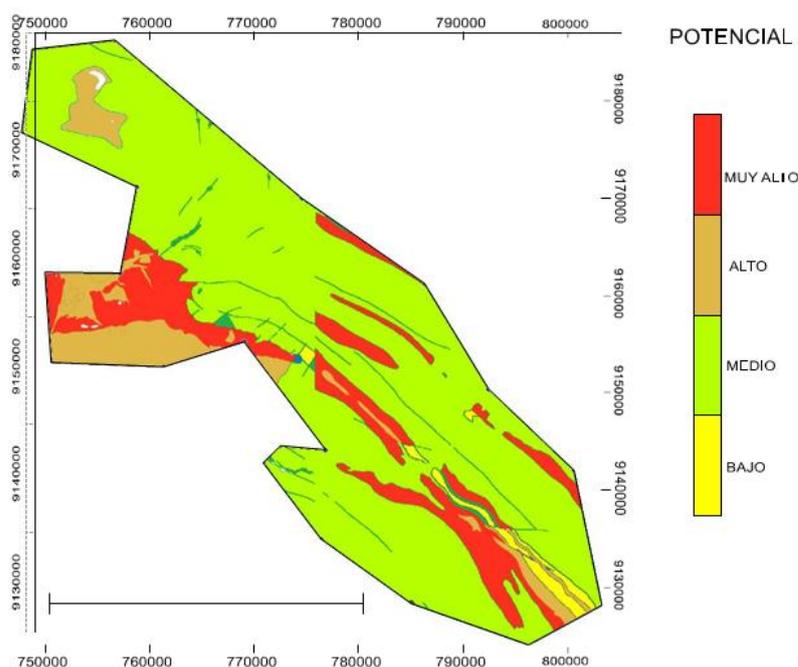


**Figura 3.** Vector de ponderación sumada

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

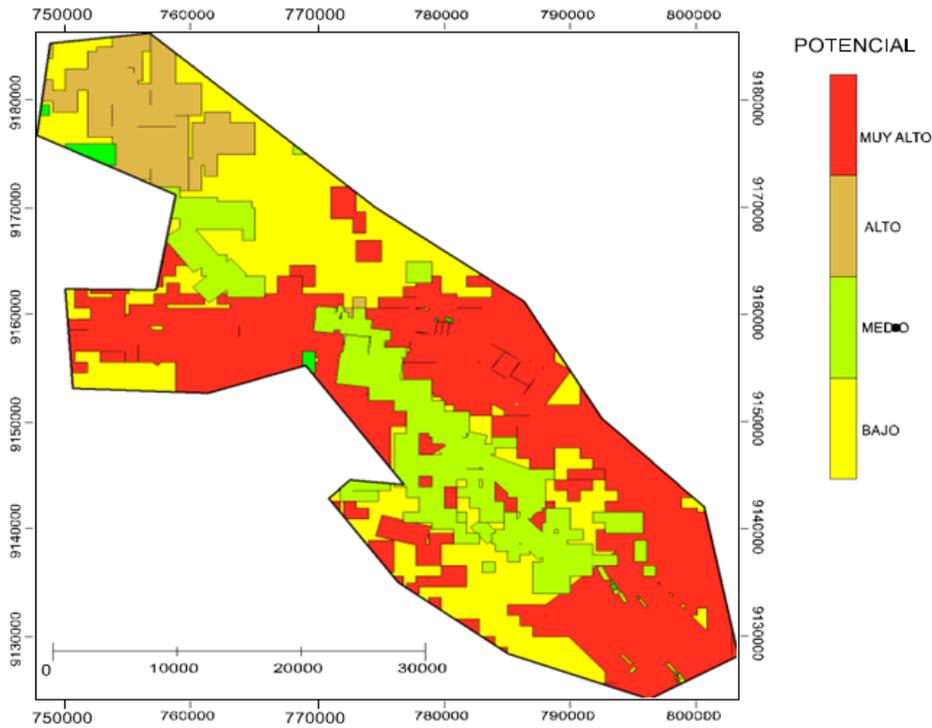
El análisis multicriterio realizado en este estudio ha permitido una evaluación detallada del potencial minero en la Cuenca del Alto Chicama. A través de la integración de múltiples capas de información geoespacial, se ha generado un mapa que clasifica el área de estudio según su potencial aurífero. Esta metodología proporciona una base sólida para la toma de decisiones en exploración minera, priorizando aquellas áreas que presentan condiciones geológicas favorables.

La **Figura 4** muestra la zonificación del potencial aurífero según la variable “unidad geológica”. Las áreas de “muy alto” y “alto” potencial (rojo y naranja) se concentran en el sector central y sur de la cuenca, destacándose como regiones prioritarias para la exploración. Estos resultados son consistentes con los estudios pioneros de (Bertalanffy, 1964), (Leopold, 1971), y (Carpenter, 1976) quienes establecieron la relevancia de las unidades geológicas en la determinación del potencial mineral. Además, esta concentración geográfica del potencial aurífero refleja patrones similares observados por (Gómez, 1992) y (Estevan, 1984) en España, donde las unidades geológicas específicas se correlacionan estrechamente con la presencia de depósitos minerales.



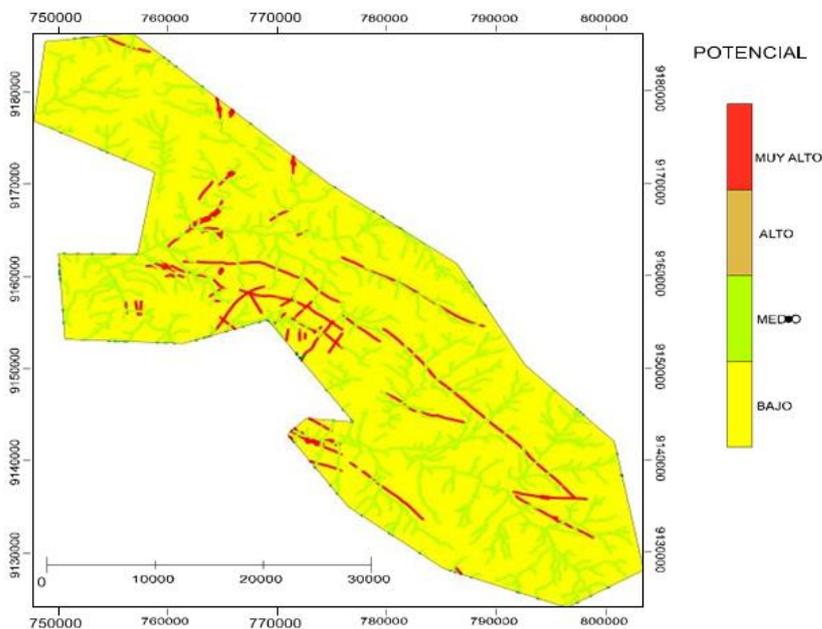
**Figura 4.** Variable unidad geológica

La **Figura 5** ilustra cómo las concesiones mineras influyen en el potencial aurífero de la región. Las áreas con “muy alto” y “alto” potencial (rojo y naranja) coinciden con regiones de intensa actividad minera, lo que indica condiciones geológicas favorables que han sido reconocidas previamente por la industria. Este hallazgo se alinea con la investigación de (Ottone, 2021), quien propuso una clasificación multicriterio de proyectos mineros para estandarizar la evaluación de riesgos en territorios con concesiones mineras. Asimismo, estudios como los de (Nihar, Jothimani, & Tripathy, 2010) también subrayan la utilidad de integrar datos de concesiones mineras en la evaluación del potencial mineral, como se ha demostrado en el cinturón de esquisto Hutti-Maski.



**Figura 5.** Variable concesiones mineras

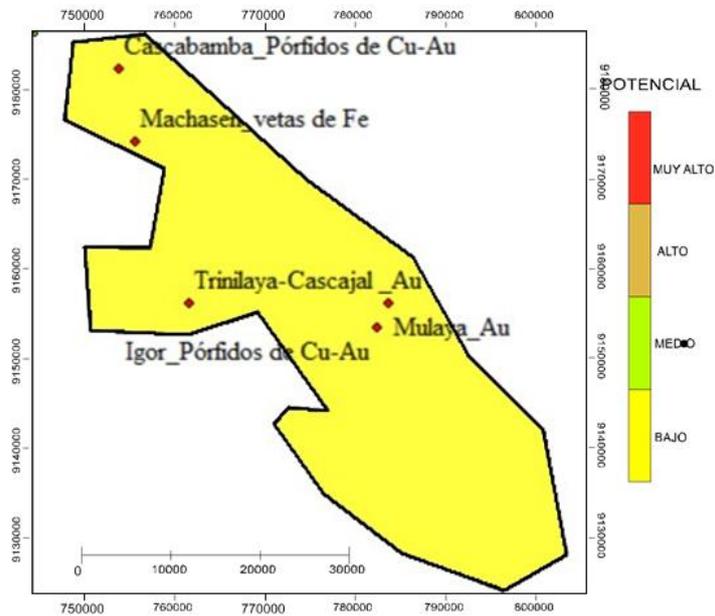
En la **Figura 6**, se observa que las fallas geológicas juegan un papel crucial en la mineralización aurífera. Las zonas de “muy alto” potencial (rojo) se alinean a lo largo de las principales fallas, lo que respalda la teoría de que estas estructuras actúan como conductos para los fluidos mineralizantes.



**Figura 6.** Variable fallas

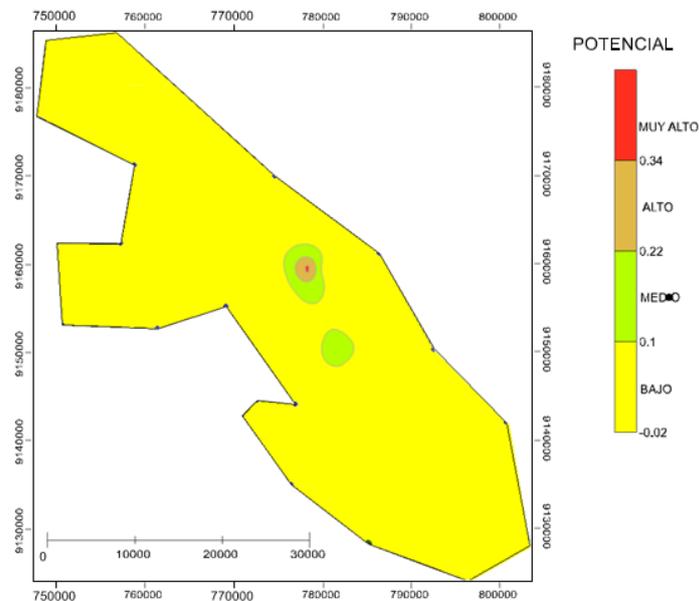
La **Figura 7** revela que, a pesar de que la mayor parte del área se clasifica como de “bajo” potencial (amarillo), los puntos marcados indican la ubicación de depósitos metálicos conocidos, como pórfidos de Cu-Au y vetas de Fe, lo que sugiere que, a pesar del bajo potencial general del área, existen depósitos puntuales de interés mineralógico que podrían ser objetivos específicos para exploración detallada. Esto resalta la importancia de

considerar la ubicación de depósitos conocidos en la evaluación del potencial mineral de la región. Este resultado es congruente con las conclusiones de (Canter & Hill, 1979) y (Carter, 1985), quienes destacaron la importancia de considerar la ubicación de depósitos metálicos existentes al evaluar el potencial minero de una región.



**Figura 7.** Variable depósitos metálicos

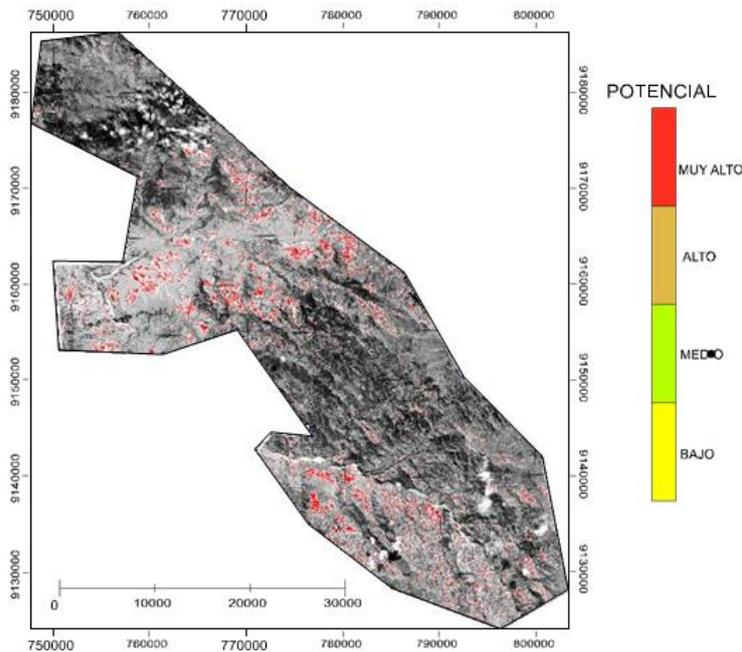
La **Figura 8** muestra la distribución del potencial aurífero basado en datos geoquímicos. Aunque el potencial general es bajo (amarillo), las anomalías geoquímicas detectadas en áreas específicas sugieren la presencia de concentraciones elevadas de elementos asociados con la mineralización aurífera.



**Figura 8.** Variable geoquímica

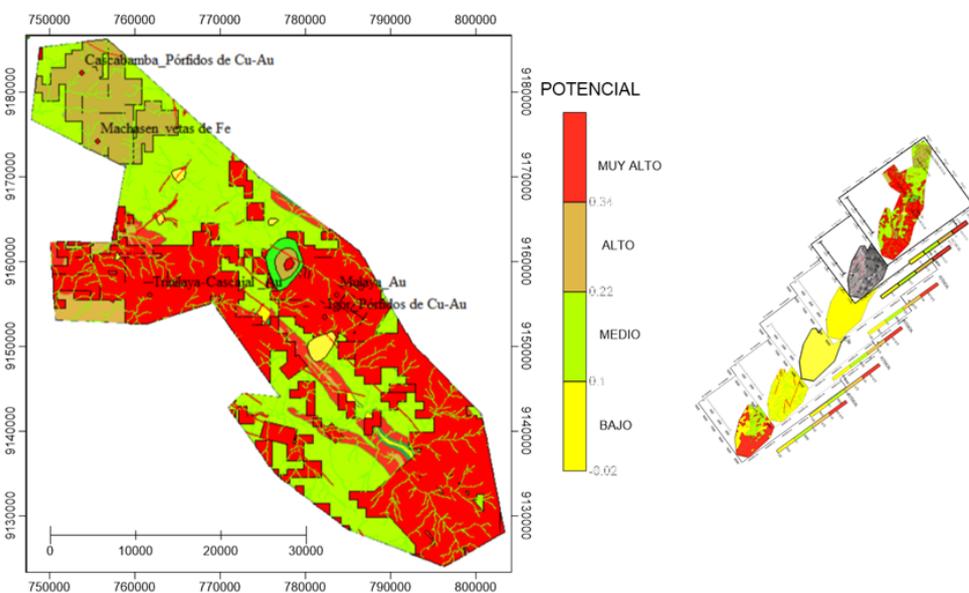
Finalmente, la **Figura 9**, que integra datos de sensores remotos, muestra que las anomalías superficiales detectadas en la región, aunque dispersas, presentan un "muy alto" potencial aurífero en ciertas áreas. Este hallazgo subraya la eficacia de los sensores remotos como una herramienta crítica para la identificación de áreas de

interés en la exploración aurífera, apoyando las conclusiones de (Sulaiman & Mustafa, 2023), quienes demostraron la utilidad de estas tecnologías en la identificación de sitios de exploración en diferentes contextos geológicos.



**Figura 9.** Variable sensores remotos

La **Figura 10** sintetiza los resultados de todas las variables estudiadas, presentando un mapa integral del potencial aurífero en la Cuenca del Alto Chicama. Las áreas de “muy alto” y “alto” potencial (rojo y naranja) coinciden con las zonas identificadas previamente mediante la integración de datos geológicos, geoquímicos y de sensores remotos, la cual se ubica el alto potencial en zona norte y sur de la Cuenca. Este enfoque multidimensional, que combina diversas fuentes de información, se alinea con las metodologías avanzadas descritas por (Nijkamp & Van Delft, 1977), (Roy, 1987), y (Triantaphyllou, 2000), quienes han demostrado que la combinación de múltiples criterios en un marco SIG-EMC puede mejorar significativamente la precisión en la evaluación del potencial mineral.



**Figura 10.** Mapa potencial minero metálico aurífero de alto Chicama

#### 4. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra la eficacia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) combinados con la Metodología de Evaluación Multicriterio (EMC) para la evaluación del potencial aurífero en la Cuenca del Alto Chicama (CAC). A través de la integración de diversas capas de datos geológicos, geoquímicos, y de sensores remotos, se ha logrado identificar áreas clave con un alto potencial para la exploración aurífera, lo que proporciona una base sólida para la planificación estratégica en la industria minera. Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos en regiones similares, lo que refuerza la validez de los métodos aplicados y su aplicabilidad en diferentes contextos geológicos.

El análisis ha revelado que las unidades geológicas, las fallas tectónicas y la distribución de las concesiones mineras son los factores más determinantes en la identificación de zonas de alto potencial aurífero. Las áreas identificadas como de “muy alto” y “alto” potencial se concentran principalmente en el sector central, norte y sur de la cuenca, alineándose con las principales estructuras geológicas y depósitos metálicos conocidos. Estas zonas representan objetivos prioritarios para futuras actividades de exploración, con la posibilidad de contribuir significativamente al desarrollo económico mediante la explotación de recursos auríferos. El estudio también subraya la importancia de las herramientas geoespaciales avanzadas, como los sensores remotos, en la detección de anomalías superficiales que podrían indicar la presencia de mineralización oculta. Esta capacidad para integrar y analizar grandes volúmenes de datos georreferenciados refuerza el valor de los SIG y la EMC como metodologías esenciales para la exploración minera moderna.

Las limitaciones de este estudio incluyen la dependencia de la calidad de los datos disponibles y la subjetividad en la asignación de ponderaciones en la evaluación multicriterio. Esto puede afectar la precisión de las predicciones en áreas con datos insuficientes o de baja resolución. Futuros estudios deberían enfocarse en validar los resultados mediante datos de campo adicionales y explorar la aplicación de técnicas de aprendizaje automático para mejorar la precisión del modelo y reducir la subjetividad en el proceso de evaluación.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdelrasoul, M., Wang, G., Kim, J., Ren, G., Abd, M., Ali, M., & Abdellah, W. (2022). Review on the Development of Mining Method Selection to Identify New Techniques Using a Cascade-Forward Backpropagation Neural Network. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1). doi:https://doi.org/10.1155/2022/6952492
- Algaput, B., López, A., Hernández, P., Tabanoglu, O., & Hermoso, N. (2021). A GIS-Based Multicriteria Assessment for Identification of Positive Energy Districts Boundary in Cities. *Energies*, 14(22), 7517. doi:https://doi.org/10.3390/en14227517
- Barredo, J. (1996). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (Primera ed.). Madrid: Ra-Ma.
- Bertalanffy, L. (1964). *An outline of general system theory*. London: British Journal of the Philosophy of Science,.
- Carpenter, R. (1976). The Scientific Basis of NEPA. *Environmental Law Reporter*(3), 25-46.
- Carter, L. (1985). *Environmental impact of agricultural production activities*. Michigan: Lewis Publishers.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental : la observación de la tierra desde el espacio* (Primera ed.). Barcelona: Ariel.
- Clark, B. (1980). *manual for the assessment of major development proposals*. London: Her Majesty's Stationery Office.
- Costa, J., Rodrigues, P., & Maria, E. (2020). Avaliação do potencial de recarga de águas subterrâneas utilizando análise de dados multicritério GIS: um estudo de caso no distrito de Itabira, Minas Gerais, sudeste do Brasil. *Geociências*. doi:https://doi.org/10.5902/2179460X40433
- De Simoni, B., & Praca, M. (2019). Assessment of rehabilitation projects results of a gold mine area using landscape function analysis. *Applied Geography*, 108, 22-29. doi:https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.05.005
- Dean, M. (2022). Including multiple perspectives in participatory multi-criteria analysis: A framework for investigation. *Evaluation*, 28(4). doi:https://doi.org/10.1177/13563890221123822
- Dominic, E., & Ofori, P. (2023). Prediction of gold mineralization zones using spatial techniques and geophysical data: A case study of the Josephine prospecting licence, NW Ghana. *Heliyon*, 9(11). doi:https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22398

- Estevan, M. (1984). *Evaluación de Impacto Ambiental*. Madrid, España: Mapfre.
- Gajere, J., Adekeye, O., Tende, A., & Aminu, M. (2024). GIS-based multi-criteria decision models for barite exploration in Nigeria's Benue Trough. *Scientific Reports*(14). doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-024-63996-8>
- Gómez, D. (1992). *Evaluación de Impacto Ambiental*. Madrid: Agrícola Española S.A.
- Krois, J., & Schulte, A. (2014). GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru. *Applied Geography*, 51, 131-142. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.04.006>
- Lee, N. (1982). The future development of environmental impact assessment. *J. Environmental Manage*, 14, 71-90.
- Leopold, L. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact*. Washington: Geological survey, Circular 645.U.S. Dept. Interior.
- Li, Y., Zhao, G., Wu, P., & Qiu, J. (2022). An Integrated Gray DEMATEL and ANP Method for Evaluating the Green Mining Performance of Underground Gold Mines. *Sustainability*, 14(11), 6812. doi:<https://doi.org/10.3390/su14116812>
- Madani, A. (2011). Knowledge-driven GIS modeling technique for gold exploration, Bulghah gold mine area, Saudi Arabia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 14(2), 91-97. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.10.001>
- Mammadli, A., Barakos, G., & Mischo, H. (2020). *DEVELOPING A MULTI CRITERIA DECISION ANALYSIS TOOL FOR ALL PARAMETERS AFFECTING THE CO – AND BY – PRODUCT PRODUCTION IN MINING PROJECTS: THE CASE STUDY OF CHOVDAR GOLD – ORE – DEPOSIT IN AZERBAIJAN*. Thesis.
- Martin, F. (1985). Using a geographic information system for forestland mapping and magnament. *Photogrammetric Engi-neering and Remote Sensing*.
- Montgomery, F. (2012). *Metallogenetic controls on miocene high-sulphidation epithermal gold mineralization, alto Chicama district*. Tesis, Queen's University, Canada.
- Moreno, J. (2002). El proceso analítico jerárquico. Fundamentos. Metodología y Aplicaciones. *Revista electrónica de Comunicaciones y trabajos de ASEPUMA*, 21-53.
- Nihar, S., Jothimani, P., & Tripathy, K. (2010). Multi-criteria analysis in GIS environment for Natural Resource Development – A Case Study on Gold Exploration. *Geospatial World*.
- Nijkamp, P. (1990). *Multicriteria evaluation in physical planning*. Elsevier Science Publishers: The Netherlands.
- Nijkamp, P., & Van Delft, A. (1977). *Multi-criteria analysis and decision making*. The Netherlands: Martinus Nijhoff.
- Ogah, A., & Abubakar, F. (2024). Solid mineral potential evaluation using integrated aeromagnetic and aeroradiometric datasets. *scientific reports*, 14. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-024-52270-6>
- Olakunle, O., & Isaac, K. (2020). A multi-criteria decision analysis for groundwater potential evaluation in parts of Ibadan, southwestern Nigeria. *Applied Water Science*, 10(228). doi:<https://doi.org/10.1007/s13201-020-01311-2>
- Ottone, S. (2021). Gold mining in French Guiana: A multi-criteria classification of mining projects for risk assessment at the territorial scale. *The Extractive Industries and Society*, 8(1), 32-43. doi:<https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.06.020>
- Pouresmaieli, M., Ataei, M., Qarahaslou, A., & Barabadi, A. (2024). Multi-criteria Decision-making Methods for Sustainable Decision-making in the Mining Industry (A Comprehensive Study). *Journal of Mining and Environment*, 15(2), 683-706. doi:<https://doi.org/10.22044/jme.2023.13662.2528>
- Rekik, S., & El Alimi, S. (2023). A spatial perspective on renewable energy optimization: Case study of southern Tunisia Using GIS and multicriteria decision making. *Energy Exploration & Exploitation*, 42(1). doi:<https://doi.org/10.1177/01445987231210962>
- Roy, B. (1987). *Methodologie multicritere d'aide a la decision*. París: Ed. Económica.
- Saaty, T. (1980). *The Analytical Hierrarchy Process*. Nueva York: Editorial Mc Graw Hill.

- Sulaiman, W., & Mustafa, Y. (2023). Geospatial Multi-Criteria Evaluation Using AHP–GIS to Delineate Groundwater Potential Zones in Zakho Basin, Kurdistan Region, Iraq. *Earth*, 4(3), 655-675. doi:<https://doi.org/10.3390/earth4030034>
- Takam, X., Kanungwe, F., Raphael, V., & Phiri, D. (2021). Modelling areas for sustainable forest management in a mining and human dominated landscape: A Geographical Information System (GIS)-Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) approach. *Annals of GIS*, 343-357. doi:<https://doi.org/10.1080/19475683.2022.2026469>
- Tende, A., Aminu, M., Amuda, A., Gajere, J., Usman, H., & Shinkfati, F. (2021). A spatial reconnaissance survey for gold exploration in a schist belt. *Heliyon*, 7(11). doi:<https://doi.org/10.1016%2Fj.heliyon.2021.e08406>
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multicriteria decision making methods: a comparative study*. The Netherlands: Kluwer.
- Verga, P., Cardadeiro, E., Amado, J., & Fernandes, C. (2018). The use of multi-criteria analysis in the recovery of abandoned mines: a study of intervention in Portugal. *RAUSP Management Journal*, 53(2), 214-224.
- Voogd, H. (1983). *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. Londres.