

Teledetección de depósitos minerales ocultos mediante imágenes multiespectrales ASTER. Una revisión

Ramiro Santiago Chirinos

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Resultados destacados:

- ASTER sigue siendo una herramienta eficaz para la detección de minerales de alteración hidrotermal en contextos con buena exposición geológica.
- Su desempeño disminuye en sistemas cubiertos o con escasa expresión superficial, lo que limita la detección directa de mineralización oculta.
- La integración de datos ASTER con información geoquímica, estructural y multifuente mejora la fiabilidad del targeting.
- Los enfoques emergentes basados en aprendizaje automático y modelos de grafos muestran potencial para la detección de sistemas minerales ocultos.

Resumen: La identificación de depósitos minerales sin expresión superficial evidente constituye uno de los principales desafíos en exploración geológica. Este trabajo presenta una revisión sistemática de la literatura sobre el uso del sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) en la detección de alteraciones hidrotermales asociadas a depósitos minerales ocultos, evaluando tanto técnicas espectrales tradicionales (como cocientes de bandas y Análisis de Componentes Principales Dirigidos) como enfoques que integran información geoquímica y estructural mediante aprendizaje automático. Los resultados evidencian que, si bien ASTER mantiene una alta vigencia gracias a su cobertura VNIR-SWIR-TIR y acceso libre, persiste la ausencia de protocolos estandarizados y marcos comparativos que permitan integrar de manera sistemática datos espectrales, geoquímicos y estructurales. La literatura reciente muestra una transición desde enfoques puramente espectrales hacia esquemas multifuente apoyados en modelos supervisados y arquitecturas de aprendizaje profundo, los cuales tienden a mejorar la delimitación de zonas prospectivas en contextos con cobertura superficial significativa. En conjunto, la revisión destaca que el verdadero potencial de ASTER no radica en su uso aislado, sino en su integración dentro de flujos de trabajo reproducibles, coherentes con el enfoque de sistema mineral y orientados a la reducción de incertidumbre en la exploración de depósitos minerales ocultos.

Palabras clave: ASTER, alteración hidrotermal, depósitos minerales ocultos, revisión sistemática, PRISMA.

Remote sensing of hidden mineral deposits using ASTER multispectral imagery: A review

Abstract: The identification of mineral deposits lacking surface expression represents one of the major challenges in geological exploration. This study presents a systematic literature review, based on explicit selection criteria, on the use of the ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) sensor for detecting hydrothermal alterations associated with concealed mineralization. Both traditional spectral techniques -such as

To cite this article: Santiago Chirinos, R. 2026. Remote sensing of hidden mineral deposits using ASTER multispectral imagery: A review. *Revista de Teledetección*, 68, e24590. <https://doi.org/10.4995/raet.2026.24590>

* Corresponding author: csantiago@uni.edu.pe

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

band ratios and Directed Principal Component Analysis (DPCA)- and approaches integrating geochemical and structural information through machine learning algorithms are examined. The results indicate that, although ASTER remains highly relevant due to its VNIR-SWIR-TIR spectral configuration and open-access availability, there is still a lack of standardized protocols and comparative frameworks enabling the systematic integration of spectral, geochemical, and structural datasets. Recent literature shows a transition from purely spectral approaches toward multi-source schemes supported by supervised models and deep learning architectures, which tend to improve the delineation of prospective zones in areas with significant surface cover. Overall, the review highlights that the true potential of ASTER lies not in its isolated application, but in its integration within reproducible, mineral system-oriented workflows aimed at reducing uncertainty in the exploration of concealed mineral deposits.

Keywords: ASTER, hydrothermal alteration, concealed mineral deposits, systematic review, PRISMA.

1. Introducción

En las últimas décadas, la teledetección satelital se ha consolidado como una herramienta esencial para la exploración mineral, debido a su capacidad de detectar en superficie firmas espectrales asociadas a minerales de alteración hidrotermal, tales como filosilicatos, alunita, arcillas y óxidos de hierro (Sabins, 1999; Abrams et al., 2002; Rowan y Mars, 2003; Mars y Rowan, 2010; Pour y Hashim, 2012).

Diversos sensores han sido empleados con este propósito, entre ellos la serie Landsat, ampliamente utilizada por su largo historial y acceso gratuito, aunque con limitaciones en la cobertura SWIR (*Short-Wave Infrared*, infrarrojo de onda corta) (Roy et al., 2014). Más recientemente, Sentinel-2 ha ofrecido una resolución espacial superior (10–20 m) y acceso libre, aunque dispone de bandas SWIR, su resolución espectral es menor que la de ASTER para la discriminación mineralógica, lo que reduce su capacidad para caracterizar ciertos minerales (Drusch et al., 2012). Los sensores comerciales como WorldView o GeoEye aportan altísima resolución espacial, aunque su elevado costo y limitado espectro dificultan su aplicación a escala regional (Kruse, 2012). Por otro lado, los sensores hiperespectrales como Hyperion, EnMAP y PRISMA ofrecen un nivel de resolución espectral que permite un detalle mineralógico notable. Hyperion presenta limitaciones asociadas al ruido y a la degradación radiométrica (Pearlman et al., 2001), mientras que los sensores más recientes EnMAP (Stuffer et al., 2007; Guanter et al., 2015) y PRISMA (Bedini, 2022) han mejorado sustancialmente la calidad espectral. Aunque sus datos son gratuitos, su cobertura espacial es menos global que la de sensores multispectrales clásicos

y no incluyen bandas en el TIR (*Thermal Infrared*, infrarrojo térmico), lo cual condiciona su aplicación en ciertos contextos geológicos.

En este escenario comparativo, las imágenes del sensor ASTER destacan por su acceso libre, cobertura global y un diseño espectral que incluye bandas clave en las regiones VNIR (*Visible and Near Infrared*, infrarrojo cercano), SWIR y TIR, características que lo convierten en una plataforma estratégica para la detección de alteraciones hidrotermales.

En el contexto de esta revisión, se entiende por “depósito mineral oculto” aquel sistema mineralizado cuya expresión superficial es nula o limitada debido a cobertura sedimentaria, volcánica, coluvial o vegetal, o bien por truncamiento erosivo que elimina la porción mineralizada expuesta. En estos casos, la detección directa del cuerpo mineralizado mediante teledetección no es posible.

Por su parte, la alteración hidrotermal corresponde al conjunto de transformaciones mineralógicas y geoquímicas producidas por la circulación de fluidos asociados al sistema mineral, generando halos mineralógicos detectables espectralmente.

La relación entre ambos conceptos radica en que, aun cuando el depósito se encuentre oculto, los procesos hidrotermales pueden haber generado manifestaciones superficiales residuales (halos, gossans, cambios mineralógicos secundarios) que actúan como proxies indirectos del sistema mineral subyacente.

Identificar depósitos minerales ocultos bajo sedimentos, cobertura volcánica o vegetación



constituye uno de los retos más complejos de la exploración moderna, especialmente en regiones donde los recursos superficiales han sido ya ampliamente evaluados (Hronsky y Groves, 2008; Sillitoe, 2010). A medida que la exploración avanza hacia objetivos de exploración más profundos o enmascarados, resulta necesario recurrir a métodos capaces de reconocer señales indirectas de mineralización, incluso cuando la expresión superficial es mínima o inexistente (Carranza, 2011). Este escenario impulsa el uso de herramientas integradas incluyendo teledetección, geoquímica y análisis estructural que permitan reducir de manera eficiente las áreas objetivo sin depender exclusivamente de evidencias directas en superficie (McCuaig et al., 2010). El análisis multiespectral, particularmente mediante imágenes ASTER, se ha convertido en una herramienta eficaz y de bajo costo para este propósito (Pour y Hashim, 2011; Zhang et al., 2016; Pour et al., 2018).

Gracias a su acceso libre y cobertura global, el sensor ASTER ha sido ampliamente utilizado en regiones con geología diversa para mapear zonas de alteración hidrotermal y apoyar la identificación de ambientes propensos a albergar depósitos minerales, incluso en áreas parcialmente cubiertas por sedimentos o volcanismo (Abrams et al., 2002; Mars y Rowan, 2010; Pour et al., 2019). Diversos estudios han demostrado que, en contextos con cobertura superficial parcial, escasa vegetación y presencia de halos de alteración expuestos o someramente cubiertos, las bandas VNIR–SWIR permiten inferir firmas de alteración aun cuando la expresión superficial es limitada o discontinua (Rowan y Mars, 2003; Pour y Hashim, 2012; Zhang et al., 2016). No obstante, su aplicación efectiva requiere metodologías rigurosas de procesamiento espectral, así como una validación adecuada mediante información geológica y geoquímica de campo; en muchos casos, la integración con datos estructurales o modelos topográficos mejora significativamente la fiabilidad de los resultados (Carranza, 2011; McKay y Harris, 2016).

A pesar del uso generalizado del sensor, existe una falta de estandarización metodológica, y la literatura revisada presenta enfoques dispersos y resultados heterogéneos. Por ello, revisar de manera sistemática y crítica las aplicaciones de ASTER en la detección de alteración hidrotermal

es fundamental para clarificar su utilidad actual, sus limitaciones y su posición frente a sensores alternativos. Esta revisión busca sintetizar los principales avances logrados y establecer el marco conceptual que permita su uso adecuado en contextos de exploración mineral.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo sintetizar y evaluar críticamente la aplicación de imágenes ASTER en la detección de depósitos minerales ocultos, con énfasis en la identificación de alteraciones hidrotermales asociadas. A diferencia de otras revisiones generales sobre sensores de teledetección, este artículo se centra en las imágenes del sensor ASTER por su equilibrio entre disponibilidad gratuita, cobertura global y capacidad espectral en las regiones VNIR, SWIR y TIR, factores que lo convierten en una herramienta práctica para la exploración mineral en contextos económicos limitados.

De manera específica, esta revisión analiza las capacidades de ASTER en comparación con otros sensores empleados en exploración mineral, destacando tanto sus ventajas como sus limitaciones. Asimismo, examina las metodologías más utilizadas para el procesamiento y la interpretación de imágenes ASTER orientadas a la detección de alteraciones hidrotermales y depósitos minerales ocultos. A partir de esta síntesis crítica, se identifican los principales vacíos metodológicos presentes en la literatura y las oportunidades de investigación relacionadas con la integración de información geoquímica, estructural y litológica. Finalmente, se plantean perspectivas futuras que consideran la incorporación de técnicas emergentes de inteligencia artificial y enfoques multifuente para optimizar el uso de ASTER en la exploración mineral.

2. Metodología de revisión sistemática

Este trabajo se desarrolla bajo un enfoque de revisión sistemática siguiendo las directrices establecidas por la declaración PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Page et al., 2021). Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos como Scopus, Web of Science y ScienceDirect, utilizando combinaciones de palabras clave tales como “ASTER”, “alteración hidrotermal” (“*hydrothermal alteration*”),

“depósitos minerales ocultos” (“*concealed mineral deposits*”) y “exploración mineral basada en teledetección” (“*remote sensing-based mineral exploration*”). La búsqueda bibliográfica inicial arrojó un total de 57 referencias relevantes, las cuales incluyen tanto estudios conceptuales y metodológicos sobre el sensor ASTER como aplicaciones directas en exploración mineral. A partir de este conjunto inicial, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión estrictos con el fin de identificar únicamente aquellos trabajos que emplean imágenes ASTER de manera explícita en la detección de alteraciones hidrotermales y/o depósitos minerales ocultos, y que presentan una descripción metodológica suficiente y algún tipo de validación (de campo, geoquímica o cartográfica).

Como resultado de este proceso, 28 estudios cumplieron con los criterios finales y fueron seleccionados para el análisis detallado; dichos trabajos se resumen en la Tabla S1 incluida como material suplementario. El resto de las referencias identificadas se emplean como marco conceptual y estado del arte, aportando contexto sobre el desarrollo del sensor ASTER, los fundamentos espectrales y las tendencias metodológicas generales en exploración mineral por teledetección.

El periodo de análisis considerado abarca desde 2002 hasta 2024, incorporando tanto trabajos fundacionales tempranos del sensor ASTER como estudios aplicados recientes, lo que permite evaluar de manera integral la evolución de sus metodologías, alcances y limitaciones en la exploración de depósitos minerales ocultos. El flujo completo del

proceso de selección de artículos se resume en la Tabla 1, siguiendo el esquema PRISMA.

Los apartados siguientes distinguen el marco conceptual general (Sección 3) de los resultados derivados de estos 28 estudios (Sección 4).

3. Marco conceptual

3.1. Fundamentos del sensor ASTER y su potencial geológico

ASTER proporciona imágenes multiespectrales distribuidas en 14 bandas, con resoluciones espaciales de 15 metros en la región VNIR, 30 metros en el SWIR y 90 metros en el TIR (Abrams et al., 2002). Estas bandas permiten detectar firmas espectrales asociadas a minerales indicativos de alteración hidrotermal: arcillas (SWIR), óxidos de hierro (VNIR), y sílice o feldespatos potásicos (TIR) (Pour y Hashim, 2011; Zhang et al., 2016; Pour et al., 2018). Es importante señalar que el sensor presenta limitaciones operativas que afectan su aplicabilidad actual. En particular, el módulo SWIR dejó de funcionar en abril de 2008 debido a un fallo en los detectores, lo que restringe el uso de estas bandas a imágenes adquiridas antes de esa fecha (Abrams et al., 2015). Asimismo, el módulo SWIR requiere corrección del efecto *crosstalk*, fenómeno ampliamente documentado en la literatura, que debe ser tratado durante el preprocesamiento para asegurar interpretaciones espectrales confiables (Iwasaki et al., 2002). Para estudios posteriores a 2008, el uso de bandas

Tabla 1. Proceso de selección de artículos según las directrices PRISMA.

Fase	Descripción	Número de registros (n)
Identificación	Registros identificados en bases de datos (Scopus, Web of Science y ScienceDirect)	57
	Registros duplicados eliminados	0
Cribado	Registros evaluados por título y resumen	57
	Registros excluidos por no cumplir criterios (no ASTER, enfoque conceptual, otros sensores, métodos no aplicados)	29
Elegibilidad	Artículos evaluados a texto completo	28
	Artículos excluidos tras lectura completa	0
Incluidos	Estudios incluidos en la revisión sistemática (ASTER aplicado)	28
	Estudios incluidos en el análisis cualitativo y síntesis	28

Nota: Los criterios de inclusión y exclusión se aplicaron siguiendo las directrices PRISMA. Los estudios incluidos corresponden exclusivamente a trabajos que emplean imágenes ASTER de manera explícita en aplicaciones de exploración mineral.

SWIR se limita exclusivamente a la explotación del archivo histórico de imágenes pre-fallo.

Desde el punto de vista conceptual, la aplicación de ASTER en contextos de depósitos minerales ocultos se basa en el realce de contrastes espectrales asociados a procesos hidrotermales, más que en la detección directa del cuerpo mineralizado. En concreto, a la identificación de manifestaciones superficiales asociadas a procesos hidrotermales y metasomáticos (p. ej. halos de alteración, gossans, anomalías en el suelo o estrés vegetal) que actúan como indicadores indirectos del sistema mineral subyacente. Estas manifestaciones se generan por la circulación de fluidos, reacciones de alteración y procesos de dispersión que afectan la primera decena de centímetros o metros del perfil, y que son detectables por firmas espectrales (VNIR–SWIR) o por contrastes termo-emisivos (TIR) cuando las condiciones de cobertura lo permiten (Sabins, 1999; Rowan y Mars, 2003; Hedenquist y Lowenstern, 1994). Por tanto, la teledetección opera como una herramienta de cribado regional: permite acotar zonas de interés mediante *proxies* superficiales, pero no sustituye a la validación en campo, a la geoquímica de sedimentos y análisis de *float* (fragmentos de roca mineralizada transportados desde su fuente original), ni a los datos geofísicos, que son necesarios para confirmar la presencia y profundidad de la mineralización.

Los métodos descritos en esta revisión no son exclusivos del sensor ASTER, pero han sido ampliamente desarrollados y aplicados con este sensor debido a su combinación de bandas VNIR–SWIR y a la disponibilidad de datos de libre acceso. La Tabla 2, resume las técnicas más empleadas en

estudios basados en imágenes ASTER para la teledetección de minerales de alteración hidrotermal, describiendo sus fundamentos, las bandas utilizadas y los objetivos de cada método.

Estas técnicas pueden combinarse según el objetivo: filtrado espectral, realce visual, clasificación supervisada o análisis multivariante. En contextos de cobertura vegetal densa o recubrimiento sedimentario superficial, así como en áreas de morfología irregular las clasificaciones supervisadas (por ejemplo, máquinas de soporte vectorial (SVM) o bosques aleatorios (*Random Forest*)) tienden a ofrecer mejores resultados, porque permiten resaltar firmas específicas aun cuando el contraste espectral es débil. El método Análisis de Componentes Principales Dirigidos (*Directed Principal Component Analysis, DPCA*) consiste en orientar el análisis de componentes principales hacia bandas seleccionadas que contienen la mayor información diagnóstica del mineral objetivo, aumentando la separación entre firmas de alteración y ruido espectral. Por su parte, *Matched Filtering* (MF) aplica un filtrado espectral que compara la firma buscada con un miembro extremo espectral de referencia, maximizando la respuesta del objetivo y minimizando la contribución del fondo. Su variante MTMF (*Mixture Tuned Matched Filtering*) añade restricciones que minimizan falsas detecciones. En imágenes ASTER, estos métodos han sido empleados para mapear alunita, caolinita, clorita y otros minerales diagnósticos de alteración. Estas técnicas han demostrado ser particularmente eficaces al mapear alteraciones hidrotermales poco visibles o parcialmente enmascaradas (Boardman y Kruse, 2011; Pour y Hashim, 2012).

Tabla 2. Comparación de técnicas ASTER para la detección de minerales de alteración hidrotermal.

Técnica	Propósito principal	Bandas ASTER	Ventajas Clave	Limitaciones
Cocientes de Bandas (BR)	Resaltar firmas espectrales específicas	VNIR/SWIR	Simple, rápida	Afectada por topografía y sombra
PCA/DPCA	Separar señales dominantes/anomalías dirigidas	Todas	Elimina ruido DPCA enfoca en firmas claves	Interpretación más compleja
MF/MTMF	Detección supervisada de minerales-alteración	SWIR	Alta sensibilidad a minerales específicos	Requiere espectros objetivos bien definidos
FCC/Crosta	Realzar zonas de alteración en imágenes RGB	VNIR + SWIR	Visualización rápida de patrones de alteración	Subjetivo, dependiente de combinaciones RGB
ML (SVM, RF)	Clasificación automática de zonas alteradas	Todas + datos externos	Precisión alta si hay datos de entrenamiento	Requiere validación de campo y control de sobreajuste

Entre los índices espectrales específicos empleados en estudios puntuales se incluyen el *Quartz Index* (QI), el *Carbonate Index* (CI) y el *Relative Band Depth* (RBD), utilizados para resaltar minerales diagnósticos en el rango SWIR–TIR.

4. Resultados de la revisión sistemática

A partir del análisis conjunto de los 28 estudios incluidos en la revisión sistemática, se identificaron patrones comunes en cuanto a tipos de depósitos, técnicas ASTER empleadas, datos auxiliares utilizados y enfoques de validación. La Tabla 3 presenta una síntesis global derivada del conjunto de estos trabajos, mientras que la información individual de cada estudio y sus referencias se detalla en la Tabla S1.

En las secciones siguientes se discuten ejemplos representativos de los estudios incluidos en el corpus sistemático (n=28), mientras que otras referencias se utilizan únicamente como marco conceptual o contextual.

4.1. Métodos clásicos y supervisados aplicados al procesamiento de imágenes ASTER

Las técnicas clásicas han sido ampliamente utilizadas debido a su simplicidad, accesibilidad y capacidad para resaltar patrones de alteración a escalas regionales. Estas metodologías, aunque no son exclusivas de ASTER, han demostrado un desempeño consistente en prospección mineral

gracias a la configuración espectral del sensor en el rango VNIR–SWIR. A continuación, se describen los métodos más empleados y sus principales resultados en aplicaciones geológicas:

Cocientes de bandas (*Band Ratios*, BR): Los cocientes espectrales permiten realzar minerales específicos mediante el contraste entre bandas sensibles a absorciones diagnósticas. En los estudios analizados, las imágenes ASTER se utilizan comúnmente para resaltar óxidos de hierro mediante el cociente 2/1, correspondiente a las bandas 2 y 1 del VNIR (0,63-0,69 μm y 0,50-0,60 μm , respectivamente). Asimismo, la identificación de minerales arcillosos y filosilicatos, se basa en cocientes de SWIR previamente definidos (4/6 y 5/7), así como en el cociente 4/7, que combina las bandas 4 (1,60-1,70 μm) y 7 (2,235-2,285 μm). Estos cocientes han demostrado ser eficaces para el mapeo preliminar de zonas alteradas a escala regional (Rowan y Mars, 2003; Ninomiya, 2003; Pour y Hashim, 2012).

En una línea de automatización metodológica basada en índices espectrales, Rockwell (2012) desarrolló un procedimiento automatizado para el mapeo sistemático de mineralogía y tipos de alteración a partir de combinaciones de bandas ASTER, incorporando validación externa mediante comparación con datos hiperespectrales AVIRIS y cartografía de campo. Este enfoque representa un paso intermedio entre la aplicación manual de cocientes espectrales y la posterior incorporación de modelos supervisados más complejos.

Tabla 3. Síntesis global de los estudios incluidos (n = 28).

Criterio	Síntesis
Periodo de publicación	2003–2024
Tipos de depósito predominantes	Pórfido Cu, epitermal, VMS, polimetálico; además estudios de alcance multidepósito
Técnicas ASTER más utilizadas	<i>Band Ratios</i> , PCA / enfoques tipo Crosta
Uso de bandas ASTER	Predominio VNIR–SWIR; TIR en un subconjunto menor
Integración con geoquímica	Frecuente ($\approx 60\%$)
Uso de DEM / análisis estructural	Moderado ($\approx 40\text{--}45\%$)
Aplicación de ML / IA	En crecimiento ($\approx 30\text{--}35\%$; SVM, RF, CNN)
Tipo de validación predominante	Campo y/o geoquímica
Precisión reportada (cuando disponible)	Generalmente entre 75–95%

Nota: La síntesis presentada se deriva del análisis agregado de los 28 estudios seleccionados según el esquema PRISMA (Tabla 1) y detallados en la Tabla S1.

Análisis de Componentes Principales (PCA) y Análisis de Componentes Principales Dirigidos (DPCA): El PCA permite reducir la dimensionalidad y separar el ruido espectral de las variaciones relevantes para la detección de procesos de alteración hidrotermal y litológica. En ASTER, el DPCA (o técnica Crosta) aplica la transformación únicamente a bandas sensibles a minerales específicos, por ejemplo, las bandas 1,2,3,4 para óxidos de hierro y 4,5,6,7 para arcillas y filosilicatos (Crosta et al., 2003; Pour y Hashim, 2012). Este enfoque resalta halos hidrotermales sutiles y estructuras asociadas a sistemas mineralizados.

Filtrado coincidente (*Matched Filtering*, MF): Es un método semi-supervisado que compara la respuesta espectral de cada píxel con un componente espectral puro (*endmember*) obtenido de bibliotecas de referencia, maximizando la señal objetivo y minimizando la contribución del fondo espectral (Fereydooni y Mojeddifar, 2017). Asimismo, algunos estudios aplican el algoritmo *Constrained Energy Minimization* (CEM), un método de detección supervisada que minimiza la energía del fondo espectral mientras maximiza la respuesta del espectro objetivo, permitiendo resaltar firmas minerales específicas incluso en escenarios con interferencia espectral significativa (El-Desoky et al., 2021).

Composiciones en falso color (*False Color Composites*, FCC): Se generan asignando bandas no visibles (infrarrojo cercano o SWIR) a los canales RGB, en lugar de utilizar exclusivamente bandas del espectro visible. En imágenes ASTER, combinaciones como 4-6-8 o 4-5-7 permiten una visualización rápida de patrones de alteración hidrotermal y relaciones litológicas. Aunque subjetivas, son útiles como herramienta exploratoria para reconocimiento regional (Rowan y Mars, 2003).

Métodos de clasificación basados en aprendizaje automático: Dentro de los métodos reportados en los estudios analizados, se emplean principalmente clasificadores supervisados como Bosques Aleatorios (*Random Forest*, RF) y Máquinas de Soporte Vectorial (*Support Vector Machines*, SVM) para la delimitación de zonas alteradas a partir de imágenes ASTER, en algunos casos, integradas con datos auxiliares. Estos enfoques permiten combinar múltiples variables y generar mapas de prospectividad mineral, entendidos como representaciones espaciales que estiman la

probabilidad relativa de ocurrencia de mineralización en función de múltiples variables predictoras, lo cual resulta particularmente útil en la identificación indirecta de depósitos minerales ocultos. (Xu et al., 2019; Mohamed et al., 2023; Farahbakhsh et al., 2024; Bahrami et al., 2024).

4.2. Aplicaciones de ASTER en la exploración de depósitos minerales ocultos

Dentro del conjunto de los 28 estudios analizados, la aplicación de imágenes ASTER en estudios de exploración mineral ha generado resultados significativos en diversos tipos de depósitos minerales. En pórfidos cupríferos, por ejemplo, investigadores como Pour y Hashim (2012) demostraron que las bandas VNIR–SWIR permiten mapear zonas argílicas y potásicas con notable consistencia respecto a cartografías geológicas convencionales. En sistemas epitermales, Crosta et al. (2003) aplicaron PCA sobre bandas VNIR–SWIR para la identificación de minerales clave de alteración hidrotermal en la Patagonia argentina, mientras que Ducart (2007) integró imágenes ASTER con cartografía geológica y datos isotópicos para caracterizar zonas de alteración asociadas a mineralización aurífera en el prospecto Cerro La Mina. Respecto a depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS, *Volcanogenic Massive Sulphide*), Rajendran y Nasir (2017) analizaron la respuesta espectral de las bandas ASTER para el mapeo de zonas de alteración características de estos sistemas. Por el contrario, no se identificaron estudios que aplicaran imágenes ASTER de forma directa al análisis de depósitos tipo *skarn*, lo que sugiere una representación limitada de este tipo de sistemas en la literatura revisada. En conjunto, estos ejemplos demuestran que, bajo un procesamiento riguroso, ASTER sigue siendo una herramienta útil para la identificación preliminar de zonas mineralizadas y para priorización de objetivos regionales.

A pesar de su utilidad en entornos favorables, las técnicas clásicas de procesamiento enfrentan limitaciones cuando la superficie está cubierta por regolito, vegetación densa o materiales volcánicos recientes, lo que reduce el contraste espectral observable (Rajendran y Nasir, 2017; Mars y Rowan, 2006). No obstante, varios de los estudios analizados muestran que la integración de imágenes

ASTER con información geológica, geoquímica y estructural mejora significativamente la capacidad para delimitar zonas alteradas y refinar la capacidad predictiva de los modelos exploratorios (Rowan y Mars, 2003; Pour y Hashim, 2011).

El uso del sensor ASTER en exploración mineral ha evolucionado significativamente en las últimas dos décadas, pasando de aplicaciones básicas de mapeo geológico regional a técnicas avanzadas que permiten identificar alteraciones hidrotermales asociadas a depósitos minerales ocultos (Pour y Hashim, 2012). Aunque inicialmente se utilizaba principalmente como herramienta auxiliar en ambientes con afloramientos visibles, especialmente para mapeo litológico y reconocimiento de zonas de alteración expuestas (Rowan y Mars, 2003), con el tiempo su uso se ha ampliado hacia escenarios más complejos. En este contexto, ASTER ha sido aplicado incluso en regiones donde la mineralización se encuentra parcialmente cubierta por regolito, sedimentos o vegetación moderada, ya que los procesos hidrotermales suelen generar manifestaciones superficiales, como halos de alteración o cambios en la mineralogía secundaria, que actúan como indicadores indirectos detectables en las bandas VNIR–SWIR (Pour y Hashim, 2012).

Diversas técnicas espectrales han sido aplicadas al sensor ASTER para identificar minerales indicativos de alteración hidrotermal. Entre las más

utilizadas se encuentran los cocientes de bandas, que permiten resaltar minerales específicos mediante contrastes simples pero efectivos. Por ejemplo, el cociente entre las bandas 4 y 6, que corresponden al SWIR (1,600–1,700 μm y 2,185–2,225 μm , respectivamente), ha sido ampliamente empleado para realzar filosilicatos asociados a zonas argílicas, mientras que el cociente entre las bandas 5 y 7, que corresponden al SWIR (2,145–2,185 μm y 2,235–2,285 μm , respectivamente) permite realzar minerales ricos en grupos Al–OH, como illita, caolinita o alunita, frecuentemente vinculados a sistemas hidrotermales superficiales (Rowan y Mars, 2003; Mars y Rowan, 2006; Pour y Hashim, 2012). En contextos más complejos, estas aplicaciones se han complementado con enfoques multivariantes como el DPCA y el método Crosta, los cuales han permitido mejorar la discriminación de firmas de alteración en ambientes con señal superficial limitada. Asimismo, estudios recientes han incorporado técnicas de clasificación supervisada y el Mapeador de Ángulo Espectral (*Spectral Angle Mapper*, SAM), demostrando que la integración de múltiples métodos incrementa la robustez de los resultados y amplía el potencial de ASTER en la exploración de depósitos minerales ocultos (Pour y Hashim, 2012; Rajendran y Nasir, 2017).

La Figura 1 presenta un ejemplo aplicado del método SAM en un contexto real de exploración,

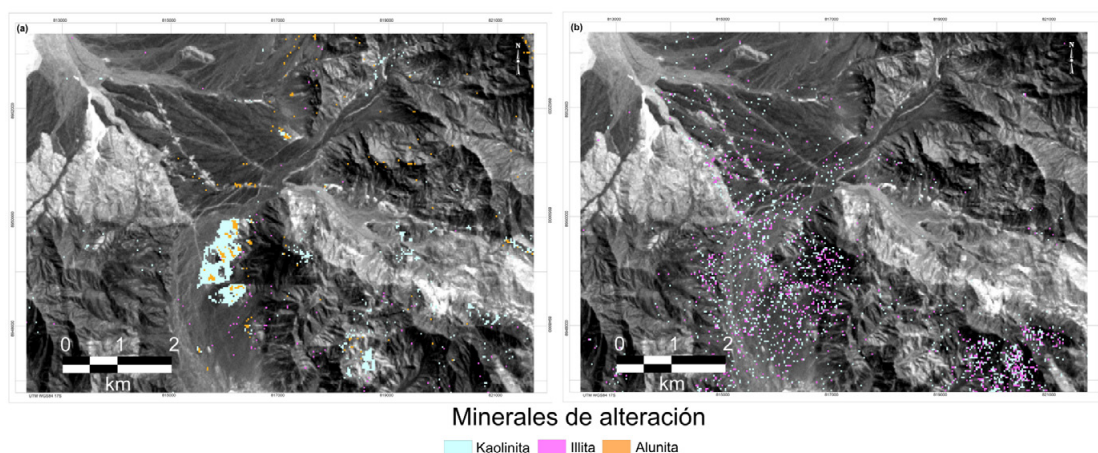


Figura 1. Comparación de resultados de dos técnicas de procesamiento espectral aplicadas a imágenes ASTER SWIR para la detección de minerales de alteración hidrotermal en el área de Casma (Ancash, Perú): (a) SAM y (b) MF. Los resultados se presentan superpuestos sobre la banda 3 (VNIR) como referencia. Mientras que SAM permite delimitar zonas de alteración con mayor coherencia espacial, MF muestra una respuesta más dispersa y de menor continuidad, lo que refleja una menor capacidad de discriminación espectral para los minerales analizados bajo las condiciones del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

ilustrando la capacidad de las técnicas espectrales para delimitar minerales de alteración hidrotermal a partir de datos ASTER. La mayor dispersión observada en MF podría estar asociada a su sensibilidad a mezclas espectrales y ruido, mientras que SAM tiende a restringir las detecciones a firmas espectrales más consistentes.

4.3. Delimitación de zonas asociadas a depósitos minerales ocultos mediante fusión ASTER y datos auxiliares

Diversos estudios revisados han evidenciado que la fusión de imágenes ASTER con datos geoquímicos, estructurales y mineralógicos incrementa de manera sustancial la capacidad para identificar sistemas mineralizados parcial o totalmente cubiertos (Di Tommaso y Rubinstein, 2007; Alimohammadi et al., 2015; El-Desoky et al., 2021). La Tabla 4 resume una selección representativa de estos trabajos, incluyendo tipo de depósito, técnicas ASTER empleadas, datos complementarios y principales resultados, y constituye la base para el análisis crítico desarrollado posteriormente.

En varios estudios, la validación de minerales de alteración se realizó mediante espectros de campo obtenidos con el *Portable Infrared Mineral Analyzer* (PIMA), ampliamente utilizado para distinguir minerales diagnósticos en sistemas hidrotermales (Ducart, 2007), mientras que análisis mineralógicos más detallados se validaron con espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y difracción de rayos X (XRD), técnicas recurrentemente empleadas para validar firmas espectrales derivadas de satélite (Beygi et al., 2020; Di Tommaso y Rubinstein, 2007). Asimismo, parámetros geomorfológicos derivados del modelo digital de elevación (DEM) se han utilizado para resaltar estructuras, dominios de erosión y controles geomorfológicos vinculados a mineralización (Di Tommaso y Rubinstein, 2007; Ducart, 2007; El-Desoky, et al., 2021; Bahrami et al., 2024).

En los estudios del corpus que integran datos geoquímicos, se aplicaron métodos de interpolación espacial como IDW para modelar anomalías regionales, mientras que la integración multi-fuente basada en lógica difusa, que asigna grados de pertenencia en lugar de límites estrictos, ha

Tabla 4. Estudios basados en imágenes ASTER que integran datos auxiliares y cuyo enfoque metodológico es aplicable a la delimitación de depósitos minerales ocultos. Se presentan cinco trabajos representativos del corpus sistemático (n = 28) seleccionados por combinar análisis espectral con información geoquímica, estructural, topográfica o mineralógica para mejorar la identificación de áreas prospectivas.

Estudio / Región	Tipo de depósito	Datos usados	Técnica ASTER	Integración auxiliar	Resultado y aplicabilidad
(Di Tommaso y Rubinstein, 2007) / Argentina	Pórfido Cu-Mo	VNIR, SWIR, TIR	BR, SAM, Quartz Index	PIMA, Micro-FTIR	Validación de halos de alteración filica, silícea y potásica.
(Alimohammadi et al., 2015) / Irán	Pórfido Cu-Au	SWIR, TIR	MF, RBD, índices espectrales PCA	Estudios de campo, XRD, Observaciones petrográficas	Detección de zonas argílicas bajo cobertura.
(El-Desoky et al., 2021) / Egipto	Au-Cu polimetálico	VNIR, SWIR, Estructural	PCA, Crosta, CEM	XRD, SEM (Microscopio Electrónico de Barrido)	Delineación de alteraciones sin afloramiento.
(Ousaid et al., 2023)/ Marruecos	Polimetálico (Cu, Ag, Pb) oculto	ASTER, Sentinel, DEM, Geoquímica Estructural	Ratios espectrales	Estadística Clásica, IDW, Fuzzy Logic	Encontrar áreas con mayor potencial para mineralización polimetálica.
(Beygi, et al., 2020), Irán	Pórfido Cu	VNIR, SWIR	BR, SAM,	Mapeo estructural, validación de campo (XRD)	Mapeo de alteración hidrotermal. Relación alteración-estructura.

demostrado reducir falsos positivos en ambientes con cobertura significativa (Ousaid et al., 2023; Shirmard et al., 2020). En conjunto, la evidencia sintetizada en la Tabla 4 indica que los enfoques híbridos, basados en la integración de imágenes ASTER con datos auxiliares, tienden a mejorar la delimitación de zonas alteradas y la coherencia espacial de los resultados en comparación con aplicaciones basadas únicamente en información espectral, según lo reportado en los estudios del corpus analizado, especialmente en regiones donde la mineralización carece de expresión superficial evidente. La ventaja de la fusión de datos se ilustra en la Figura 2, donde se evidencia que las anomalías geoquímicas de mayor intensidad

se concentran preferentemente en zonas con alteración argílica, en varios casos coincidiendo con ocurrencias minerales conocidas. Asimismo, se identifican áreas donde esta coincidencia se produce en ausencia de ocurrencias reportadas, lo que sugiere nuevos objetivos potenciales de exploración bajo cobertura.

4.4. Evaluación comparativa de métodos para exploración de depósitos minerales ocultos

A partir del análisis comparativo de los estudios incluidos en el corpus (n=28), se resume el rendimiento de los métodos más empleados para

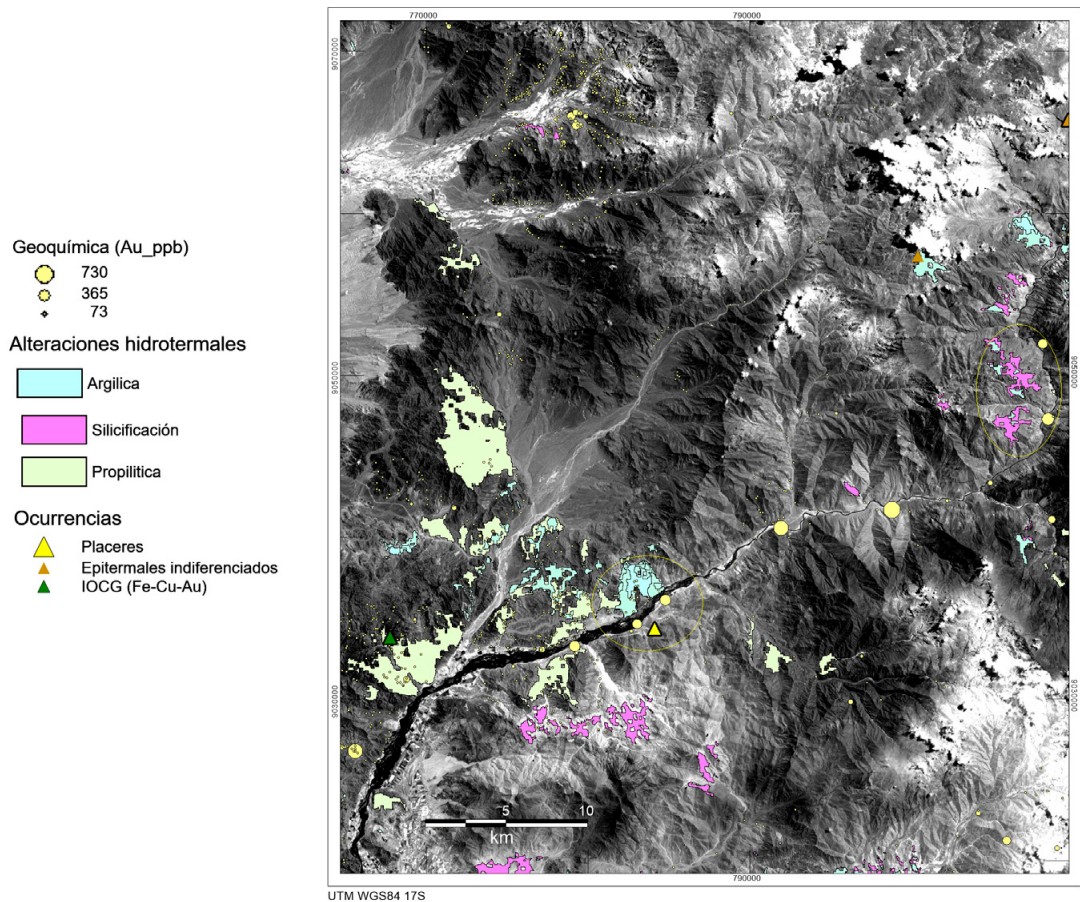


Figura 2. Integración de anomalías espectrales derivadas de imágenes ASTER con datos geoquímicos y ocurrencias minerales en el área de Casma (Ancash, Perú). Las zonas de alteración hidrotermal (argílica, silicificación y propilitica) se muestran sobre una base VNIR, junto con concentraciones de Au (ppb) clasificadas por intensidad y ocurrencias conocidas de mineralización. Las áreas resaltadas indican la coincidencia espacial entre anomalías geoquímicas de alta intensidad, alteración hidrotermal y ocurrencias minerales, lo que permite identificar zonas con mayor potencial prospectivo. Fuente: elaboración propia.



detectar zonas de alteración asociadas a depósitos minerales ocultos (Gopinathan et al., 2020; Shayganpour y Tangestani, 2023). Se consideran criterios como: precisión general reportada, robustez frente a ruido, complejidad computacional y aplicabilidad. La comparación de los métodos de detección de zonas de alteración asociadas a mineralización evidencia diferencias sustanciales en términos de precisión, ventajas operativas y limitaciones (ver Tabla 5).

Los métodos empíricos y estadísticos como BR y enfoques multivariantes tipo DPCA son ampliamente utilizados en etapas preliminares de exploración debido a su simplicidad y bajo costo computacional, con precisiones reportadas en la literatura del orden de ~70% para BR (Gopinathan et al., 2020) y hasta ~87%, para métodos estadísticos multivariantes (Shirmard et al., 2020). Cabe señalar que estas métricas no son estrictamente comparables entre estudios debido a diferencias en datos, escalas y criterios de validación.

Sin embargo, BR puede generar falsos positivos en zonas con vegetación o efectos de sombra, mientras que DPCA requiere una interpretación experta y puede no ser adecuado para todos los contextos geológicos, particularmente en escenarios con superposición espectral compleja

(Shirmard et al., 2020). En contraste, estudios recientes reportan que métodos avanzados basados en aprendizaje automático y profundo, tales como RF, SVM y Redes Neuronales Convolucionales (*Convolutional Neural Networks*, CNN), que en determinados estudios alcanzan valores superiores al 90% para clases mayoritarias o contextos específicos, aunque su desempeño puede variar significativamente en función del balance de datos y la representatividad de las clases (Xu et al., 2019; Mohamed et al., 2023; Farahbakhsh et al., 2024; Bahrami et al., 2024). Estos métodos presentan como principales limitaciones una mayor complejidad computacional y la necesidad de conjuntos de datos bien estructurados y validados.

5. Discusión

5.1. El uso de ASTER frente a otros sensores satelitales en exploración mineral

En la exploración mineral, ASTER sigue siendo una herramienta clave debido a su acceso libre, cobertura espectral (VNIR, SWIR, TIR) y aplicabilidad en la identificación de alteraciones hidrotermales. Si bien existen otras opciones, como Landsat y Sentinel-2, que también se utilizan

Tabla 5. Comparación crítica de métodos para la detección de alteraciones asociadas a depósitos minerales ocultos.

Técnica	Tipo de modelo	Precisión (%)	Ventajas clave	Limitaciones principales	Ejemplo aplicado y referencia
BR	Empírico	70–83	Simple, rápido, buena detección de óxidos/arcillas	Falsos positivos en zonas con vegetación o sombra	Sur de la India (Gopinathan P. et al., 2020)
PCA / ICA / MNF / FUZZY LOGIC	Estadístico	80–87	Método replicable y económico	Requiere interpretación experta	Torud-Chahshirin, Irán (Shirmard et al., 2020)
MF / MTMF	Semi-supervisado	90–93	Alta sensibilidad a firmas espectrales específicas	Depende de espectros de referencia bien definidos	Kowli-kosh, Irán (Shayganpour y Tangestani, 2023)
Random Forest (RF)	Supervisado	75–90 AUC:0.938	Robusto frente a ruido, integra múltiples capas	Riesgo de sobreajuste sin control	Hamissana, Sudán (Mohamed et al., 2023)
Support Vector Machines	Supervisado	85–89 AUC:0.889	Manejo de alta cobertura vegetal	Preprocesamiento complejo	Gulong, China (Xu et al., 2019)
Redes Neuronales CNN	Profundo	90–97	Detección de patrones espaciales complejos	Demanda computacional elevada	Sar-Cheshmeh, Irán (Bahrami et al., 2024)

Nota: Las métricas no son directamente comparables debido a diferencias en definición, datos de entrenamiento y criterios de validación.

en la exploración mineral, ASTER ocupa un lugar intermedio al ofrecer acceso global con un conjunto espectral útil para la detección de alteraciones sub-superficiales, a un costo accesible. Landsat, aunque tiene una serie temporal extensa, presenta un espectro limitado, mientras que Sentinel-2 ofrece una mayor resolución espacial, pero presenta menor resolución espectral en SWIR y no incorpora bandas TIR, lo que lo hace menos adecuado para ciertas aplicaciones de exploración.

Por otro lado, los sensores hiperespectrales, como EnMAP y PRISMA, ofrecen un elevado nivel de detalle mineralógico; sin embargo, su cobertura espacial efectiva es más limitada que la de los sensores multispectrales clásicos. En términos de cobertura espacial (*swath*), EnMAP (~30 km) y PRISMA (~30 km) presentan franjas significativamente más estrechas en comparación con ASTER (~60 km), Landsat (~185 km) y Sentinel-2 (~290 km), lo que implica una mayor resolución espectral a costa de una menor capacidad de cobertura regional. En consecuencia, su disponibilidad espacial menos continua y su aplicación se orienta principalmente a áreas específicas, lo que restringe su uso en estudios regionales extensos de exploración mineral. Asimismo, la ausencia de bandas en el rango TIR condiciona su aplicabilidad en la caracterización de ciertos procesos geológicos. En contraste, ASTER combina cobertura regional, acceso gratuito y bandas VNIR–SWIR–TIR, lo que lo convierte en una opción especialmente adecuada para la integración de información espectral en exploración mineral, especialmente en áreas con cobertura superficial

compleja, como en el caso de los depósitos minerales ocultos (Abrams y Yamaguchi, 2019). Como se señaló en la Sección 3.1, las limitaciones operativas del módulo SWIR desde 2008 deben considerarse al evaluar la aplicabilidad actual del sensor. La Tabla 6 resume las principales características de los sensores más relevantes y permite situar el rol estratégico de ASTER frente a ellos.

5.2. Métodos de análisis aplicados en imágenes ASTER

La exploración de depósitos minerales ocultos requiere ir más allá de las técnicas espectrales tradicionales. Los estudios analizados indican que, aunque las imágenes ASTER son útiles como herramienta inicial, no resultan suficientes para identificar depósitos minerales que carecen de manifestaciones superficiales visibles. La resolución espectral de ASTER permite detectar una variedad de alteraciones hidrotermales, pero la presencia de coberturas superficiales como vegetación densa o piroclásticas limita la capacidad de detectar firmas espectrales sutiles asociadas con depósitos minerales ocultos. Aunque una mayor resolución espectral puede ayudar a identificar una gama más amplia de características minerales, las coberturas superficiales siguen impidiendo que las alteraciones debajo de ellas sean detectadas directamente. La vegetación, por ejemplo, puede enmascarar las firmas espectrales de los minerales presentes en el suelo, y las capas piroclásticas pueden bloquear las señales provenientes de alteraciones hidrotermales subyacentes. En estos

Tabla 6. Comparación de sensores satelitales aplicados en exploración de depósitos minerales según elaboración propia a partir de la literatura citada.

Sensor	Resolución (espacial/ espectral)	Ventajas	Limitaciones en minería	Referencia
Landsat	30 m / bandas limitadas	Serie histórica amplia (1972-actualidad), gratuito	Cobertura SWIR incompleta	Roy et al. (2014)
Sentinel-2	10–20 m / 13 bandas	Alta resolución, acceso libre	No cubre SWIR extendido	Drusch et al. (2012)
WorldView	0.5–2 m / 8–16 bandas	Excelente resolución espacial	Muy costoso, espectro limitado	Kruse (2012)
Hyperion	30 m / 220 bandas (hiperespectral)	Capacidad para identificar minerales específicos	Cobertura limitada, ruido elevado	Pearlman et al. (2001)
ASTER	15–90 m / 14 bandas (VNIR–SWIR–TIR)	Cobertura global, gratuito, SWIR ideal para alteraciones	Resolución temporal baja, limitaciones operativas del módulo SWIR desde 2008	Abrams et al. (2002)

casos, se requieren técnicas adicionales, como la integración de información geoquímica o el uso de modelos basados en grafos, base conceptual de las Redes Neuronales Gráficas (GNN), para mejorar la detección de estos depósitos minerales ocultos. Los métodos tradicionales siguen siendo útiles como filtros preliminares, pero no deben usarse como evidencia concluyente. Mientras tanto, la interpretación visual como la de Crosta o FCC, sigue siendo una herramienta útil en fases exploratorias iniciales, aunque su subjetividad limita su aplicación en etapas más avanzadas del análisis. Esta limitación explica la transición observada en el corpus hacia enfoques multifuente y modelos supervisados discutidos en la Sección 4.4.

Los modelos supervisados, como SVM y RF, mejoran el enfoque en la búsqueda de depósitos minerales ocultos, aunque su efectividad depende fuertemente de la calidad del conjunto de datos. Las relaciones entre estructuras geológicas, drenajes y geoquímica rara vez se integran de manera formal en los modelos clásicos, lo cual representa una limitación importante en la precisión de los modelos predictivos. Dada la relevancia de estas variables en la formación de depósitos minerales, sería altamente recomendable integrarlas sistemáticamente en los enfoques tradicionales para mejorar la capacidad de predicción y la identificación de zonas mineralizadas.

En perspectiva futura, la incorporación de sensores hiperspectrales como PRISMA y EnMAP, en combinación con ASTER, tiene el potencial de mejorar significativamente la detección de alteraciones hidrotermales en contextos geológicos complejos. Como se resume en la Tabla 7, estos sensores aportan un mayor detalle mineralógico en el rango VNIR–SWIR, lo que resulta particularmente útil para la identificación de minerales guía bajo cobertura vegetal o con mineralogía mixta. No obstante, su ausencia de bandas TIR

limita su capacidad para caracterizar alteraciones más profundas, aspecto en el que ASTER mantiene una ventaja estratégica.

En este sentido, la fusión de datos entre ASTER y sensores hiperspectrales emergentes permitiría aprovechar de manera complementaria la cobertura regional y el rango espectral VNIR–SWIR–TIR de ASTER, junto con la mayor resolución espectral de sensores como PRISMA y EnMAP, lo que podría optimizar la selección de áreas prospectivas para depósitos minerales ocultos (Lavaei et al., 2025, en prensa). Adicionalmente, tal como se indica en la Tabla 7, la integración de estos conjuntos de datos con modelos de aprendizaje profundo basados en grafos, como las Redes Neuronales Gráficas (Graph Neural Networks, GNN), representa una línea de desarrollo emergente. Estos enfoques, en los que las relaciones espaciales, estructurales y geoquímicas entre distintos elementos geológicos pueden ser representadas explícitamente, permiten capturar interacciones complejas entre variables espectrales, geoquímicas y estructurales, especialmente en escenarios donde las señales mineralógicas se encuentran fragmentadas o no presentan una expresión superficial clara.

5.3. Tendencias metodológicas emergentes y líneas de desarrollo

A pesar de la amplia utilización de imágenes ASTER en exploración mineral, la revisión evidencia que no se ha establecido un protocolo ampliamente aceptado para su aplicación en la detección de depósitos minerales ocultos. La mayoría de los estudios se centran en técnicas clásicas como BR o DPCA, pero carecen de una estandarización metodológica que facilite la comparación entre regiones y contextos geológicos.

Otro vacío importante es la escasa integración de ASTER con otras fuentes de información. Si

Tabla 7. Sensores hiperspectrales recientes con potencial en la exploración de depósitos minerales ocultos.

Sensor	Resolución	Ventajas	Aplicabilidad	Referencia
PRISMA	30 m / hiperspectral	Mayor resolución espectral (400–2500 nm) que sensores multiespectrales tradicionales como ASTER	Detección de minerales guía aún bajo vegetación	Bedini (2022)
EnMAP	30 m / hiperspectral	Alta fidelidad espectral y acceso programado a escala global	Ideal para halos con mineralogía mixta	Guanter et al. (2015)

bien algunos trabajos combinan datos espectrales con cartografía geológica básica, son limitados los estudios que integran de forma sistemática información geoquímica, estructural y litológica para generar modelos predictivos robustos. Esta carencia reduce el potencial de ASTER como herramienta para buscar objetivos en fases tempranas de exploración. La Figura 3 ilustra de manera conceptual y no operativa un enfoque integrador que responde a esta limitación identificada, y representa una oportunidad clave para futuras investigaciones.

Asimismo, se observa un déficit en la aplicación sistemática de metodologías emergentes, como algoritmos de aprendizaje automático, modelos basados en grafos (GNN) y enfoques de fusión multifuente, lo que limita la capacidad actual de detección de anomalías hidrotermales en ambientes complejos.

Estos enfoques, aún poco explorados en la literatura, representan una oportunidad significativa para avanzar hacia procedimientos más automáticos, reproducibles y aplicables a gran escala. En este contexto, trabajos recientes que no cumplen los criterios estrictos de inclusión definidos en la Sección 2 (por ejemplo, por integrar múltiples sensores sin uso explícito de ASTER o por haber sido

publicados fuera del periodo analizado) muestran una transición metodológica desde enfoques espectrales clásicos hacia esquemas de integración multifuente apoyados en técnicas de aprendizaje automático. Estudios publicados a partir de 2021 muestran que la combinación de imágenes ASTER con datos geoquímicos, estructurales y de otros sensores ópticos permiten mejorar de forma consistente la delimitación de zonas de alteración hidrotermal y la prospectividad mineral, especialmente en áreas cubiertas o con señal superficial fragmentada (Mohamed et al., 2023; Shirazi et al., 2022; Liu et al., 2023; Hajaj et al., 2024). En conjunto, estos vacíos justifican la necesidad de realizar investigaciones adicionales que no solo sistematizan el conocimiento existente, sino que también identifican líneas de investigación futuras orientadas a fortalecer el papel de ASTER en la exploración de depósitos minerales ocultos.

Más allá del corpus sistemático analizado ($n=28$), la literatura reciente muestra un crecimiento significativo en el uso de modelos de aprendizaje automático para analizar datos ASTER y combinarlos con información geoquímica, estructural y topográfica. Estos enfoques permiten mejorar la precisión en la predicción de zonas mineralizadas ocultas al integrar diversas fuentes de datos que

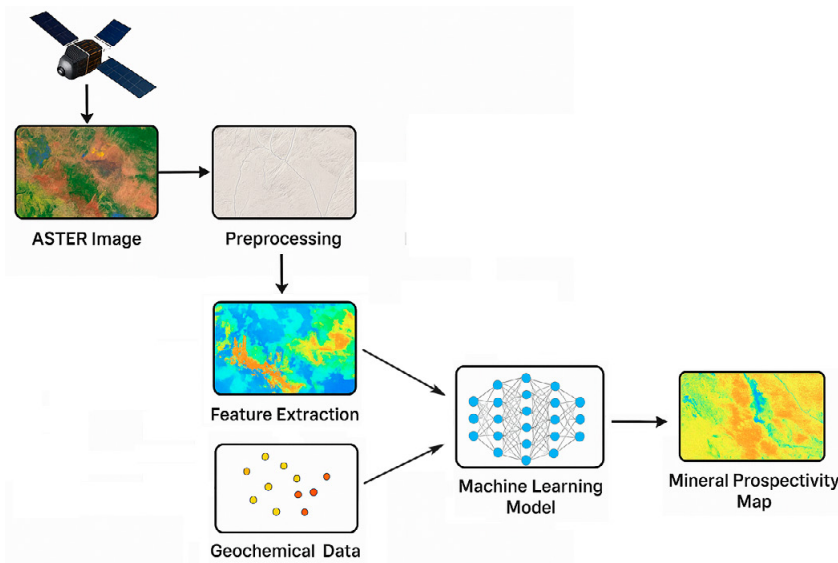


Figura 3. Esquema conceptual de integración multifuente, derivado de la literatura revisada, que ilustra una oportunidad de investigación para la detección de depósitos minerales ocultos mediante la combinación de imágenes ASTER, datos geoquímicos y enfoques de aprendizaje automático. Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada.



tradicionalmente se analizaban de forma independiente. Los métodos son los siguientes:

Máquinas de Soporte Vectorial (SVM): Método supervisado utilizado en exploración minera para la identificación de zonas de alteración hidrotermal, especialmente en contextos con datos limitados o de difícil adquisición. Este algoritmo ha demostrado ser particularmente eficaz cuando se combinan índices espectrales con datos geoquímicos, como se ha reportado en estudios incluidos en el corpus analizado, por ejemplo, en mineralización de cobre en áreas áridas de China (Xu et al., 2019). Su capacidad para manejar conjuntos de datos pequeños y su robustez frente al ruido hacen de SVM una herramienta valiosa en situaciones donde los datos de campo son escasos.

Bosques aleatorios (RF): Modelo supervisado basado en árboles de decisión, que ha ganado popularidad en exploración mineral debido a su alta precisión y capacidad para manejar datos complejos y ruidosos. En la exploración mineral, RF se ha utilizado para clasificar zonas con alteraciones hidrotermales, especialmente en estudios sobre depósitos polimetálicos. Fuera del corpus sistemático analizado, estudios recientes como el realizado en Sudán (Behnia et al., 2023), indican que este modelo es especialmente útil en campañas de exploración donde los datos geoquímicos están bien distribuidos, pero la señal espectral es débil o incierta. La capacidad de RF para manejar grandes cantidades de datos y detectar patrones no evidentes a simple vista lo hace muy adecuado para esta aplicación.

Redes Neuronales Convolucionales (CNN): Método de aprendizaje profundo especialmente eficaz para detectar patrones espaciales complejos en datos geoespaciales multibanda. Su uso se está extendiendo en el análisis de imágenes ASTER tratadas como representaciones espaciales multivariadas, mostrando resultados prometedores en la identificación de alteraciones hidrotermales incluso en contextos con señal superficial limitada. En particular, estudios recientes han demostrado que las CNN pueden identificar patrones espaciales asociados a sistemas hidrotermales que no presentan manifestaciones superficiales claras (Farahbakhsh et al., 2024). Aunque estos modelos requieren conjuntos de datos de entrenamiento adecuados y mayor capacidad computacional, su capacidad para modelar relaciones espaciales no

lineales los convierte en herramientas prometedoras para el análisis integrado de datos espectrales, geológicos y geoquímicos en exploración mineral.

Redes Neuronales Gráficas (GNN): Son una metodología emergente en exploración mineral que permite modelar relaciones espaciales explícitas entre muestras geoquímicas, estructuras geológicas y píxeles espectrales mediante grafos irregulares. A diferencia de enfoques basados en grillas regulares, como las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) o modelos supervisados clásicos, las GNN operan sobre grafos espaciales no estructurados, lo que les permite representar de manera más realista la conectividad entre datos heterogéneos en contextos geológicos complejos (Zuo et al., 2023). Aunque su aplicación aún se encuentra en fases iniciales, estudios piloto han mostrado resultados prometedores en regiones con múltiples capas de cobertura o geometrías estructurales complejas (Sihombing et al., 2024). En particular, se han empleado para integrar datos geoquímicos, espectrales y estructurales en entornos de difícil acceso, permitiendo la identificación de zonas mineralizadas bajo sedimentos o vegetación, donde las aproximaciones tradicionales presentan limitaciones. Estos desarrollos evidencian un potencial relevante para ampliar las capacidades predictivas en la prospección de depósitos minerales ocultos. No obstante, su consolidación como herramientas operativas exige aún una validación geológica sistemática y evaluaciones comparativas en distintos contextos geológicos y condiciones de aplicación.

6. Perspectivas futuras

A partir de las tendencias identificadas en la sección anterior, se delinean algunas perspectivas para el uso de imágenes ASTER en exploración mineral. El avance en la aplicación de imágenes ASTER para la exploración de depósitos minerales ocultos requiere trascender el uso aislado de técnicas individuales y avanzar hacia marcos metodológicos estandarizados y reproducibles. Una prioridad futura consiste en desarrollar protocolos comparables que permitan evaluar de manera homogénea el rendimiento de distintos enfoques en contextos geológicos diversos.

Asimismo, resulta fundamental fortalecer la integración explícita del enfoque de sistemas

minerales, incorporando de manera sistemática variables estructurales, geoquímicas y geomorfológicas dentro de esquemas predictivos coherentes. La validación de campo y la disponibilidad de conjuntos de datos abiertos y bien documentados serán determinantes para mejorar la confiabilidad y transferibilidad de los modelos prospectivos.

Finalmente, la consolidación de flujos de trabajo integrados multiescala, que articulen información espectral, geológica y geoquímica bajo criterios metodológicos consistentes, permitirá posicionar a ASTER como una herramienta estratégica dentro de esquemas modernos de exploración orientados a la identificación de depósitos minerales ocultos.

7. Conclusiones

El análisis realizado confirma que, pese al avance de nuevos sensores ópticos e hiperespectrales, ASTER continúa siendo una herramienta estratégica en la exploración mineral debido a su acceso libre, cobertura global y configuración espectral VNIR-SWIR-TIR, particularmente útil para la detección de alteraciones hidrotermales.

La revisión sistemática evidencia que ASTER ha sido aplicado con éxito en diversos contextos geológicos mediante técnicas clásicas y enfoques basados en aprendizaje automático, lo que confirma su vigencia en la exploración de yacimientos minerales, incluidos aquellos depósitos minerales ocultos sin expresión superficial evidente. Sin embargo, persiste la ausencia de protocolos estandarizados y de esquemas comparativos que integren de manera sistemática información espectral, geoquímica, estructural y litológica.

Más que ser sustituido por sensores más recientes, el futuro de ASTER radica en su integración dentro de flujos de trabajo multifuente reproducibles, apoyados en marcos metodológicos coherentes y validados geológicamente. En este sentido, el desarrollo de modelos predictivos coherentes con el enfoque de sistemas minerales representa un paso clave para fortalecer su aplicabilidad en la identificación de depósitos minerales ocultos.

En síntesis, esta revisión no solo confirma la vigencia de ASTER en la exploración mineral moderna, sino que también delimita los retos metodológicos que deben abordarse para consolidar

su papel dentro de esquemas de exploración integrados, especialmente en contextos geológicos complejos.

Agradecimientos

Se agradecen los comentarios del Dr. Crosta sobre una versión preliminar de este artículo. Como es de costumbre, cualquier error u omisión es responsabilidad del autor.

Financiación

El presente trabajo no ha recibido financiación específica de organismos públicos, privados ni sin ánimo de lucro.

Contribuciones de los autores

El autor es responsable de la concepción del estudio, la recopilación y análisis de la información, la redacción del manuscrito y la revisión final del contenido.

Conflictos de intereses

El autor declara no tener conflictos de intereses.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Durante la preparación de este trabajo, el autor utilizó herramientas de inteligencia artificial generativa (ChatGPT, OpenAI) con el fin de apoyar la revisión del estilo académico, la claridad del lenguaje y la organización del manuscrito. Tras el uso de esta herramienta, el autor revisó, editó y validó críticamente todo el contenido, asumiendo plena responsabilidad sobre la exactitud, originalidad e integridad científica del trabajo presentado.

Material suplementario

Disponible en: <https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/24590/18389>

Referencias

- Abrams, M., Hook, S., Ramachandran, B. 2002. *ASTER Users Handbook* (Version 2). NASA Jet Propulsion Laboratory / U.S. Geological Survey LP DAAC.
- Abrams, M., Tsu, H., Hulley, G., Iwao, K., Pieri, D., Cudahy, T., Kargel, J. 2015. The ASTER after fifteen years: Review of global products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.01.013>



- Abrams, M., Yamaguchi, Y. 2019. Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing*, 11(11), Article 1394. <https://doi.org/10.3390/rs11111394>
- Alimohammadi, M., Alirezaei, S., Kontak, D.J. 2015. Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of the Daraloo-Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran. *Ore Geology Reviews*, 70, 290–304. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.010>
- Bahrami, H., Esmacili, P., Homayouni, S., Pour, A.B., Chokmani, K., Bahroudi, A. 2024. Machine learning-based lithological mapping from ASTER remote-sensing imagery. *Minerals*, 14(2), Article 202. <https://doi.org/10.3390/min14020202>
- Bedini, E. 2022. Investigation of quartz-alunite epithermal gold deposits using PRISMA satellite imagery: Examples from Goldfield, Nevada, USA and Rodalquilar, Spain. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 12(5), 216–224. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v12.5.p216-224>
- Behnia, P., Harris, J., Liu, H., Jørgensen, T.R.C., Naghizadeh, M., Roots, E.A. 2023. Random forest classification for volcanogenic massive sulfide mineralization in the Rouyn-Noranda area, Quebec. *Ore Geology Reviews*, 161, Article 105612. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105612>
- Beygi, S., Talovina, I.V., Tadayon, M., Pour, A.B. 2020. Alteration and structural features mapping in Kachomesqal zone, Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration. *International Journal of Image and Data Fusion*, 12(2), 155–175. <https://doi.org/10.1080/19479832.2020.1838628>
- Boardman, J.W., Kruse, F.A. 2011. Analysis of imaging spectrometer data using N-dimensional geometry and a mixture-tuned matched filtering approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(11), 4138–4152. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2161585>
- Carranza, E.J.M. 2011. Geocomputation of mineral exploration targets. *Computers & Geosciences*, 37(12), 1907–1916. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.11.009>
- Crosta, A.P., de Souza Filho, C.R., Azevedo, F., Brodie, C. 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24(21), 4233–4240. <https://doi.org/10.1080/0143116031000152291>
- Di Tommaso, I., Rubinstein, N. 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 32(1–2), 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004>
- Drusch, M., del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Ducart, D.F. 2007. *Alteração hidrotermal do prospecto aurífero Cerro La Mina, Los Menucos, Patagônia Argentina: Geologia, sensoriamento remoto e isótopos estáveis* [Doctoral dissertation, Universidade Estadual de Campinas].
- El-Desoky, H.M., Soliman, N., Heikal, M.A., Abdel-Rahman, A.M. 2021. Mapping hydrothermal alteration zones using ASTER images in the Arabian-Nubian Shield: A case study of the northwestern Allaqi District, South Eastern Desert, Egypt. *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 5, Article 100060. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100060>
- Farahbakhsh, E., Goel, D., Pimparkar, D., Muller, R., Chandra, R. 2024. Remote sensing data processing using convolutional neural networks for mapping alteration zones. In *Proceedings of the International Conference on Machine Intelligence for GeoAnalytics and Remote Sensing (MIGARS 2024)*. <https://doi.org/10.1109/MIGARS61408.2024.10544529>
- Fereydooni, H., Mojeddfar, S. 2017. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.010>
- Gopinathan, P., Parthiban, S., Magendran, T., Al-Quraishi, A.M.F., Singh, A.K., Singh, P.K. 2020. Mapping of ferric (Fe³⁺) and ferrous (Fe²⁺) iron oxides distribution using band ratio techniques with ASTER data and geochemistry of Kanjamalai and Godumalai, Tamil Nadu, South India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100306>
- Guanter, L., Kaufmann, H., Segl, K., Foerster, S., Rogass, C., Chabrilat, S., Sang, B. 2015. The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for Earth observation. *Remote Sensing*, 7(7), 8830–8857. <https://doi.org/10.3390/rs70708830>
- Hajaj, S., El Harti, A., Jellouli, A., Pour, A.B., Missar Himyari, S., Hamzaoui, A., Hashim, M. 2024. ASTER data processing and fusion for alteration minerals detection: Implications for cupriferous mineralization exploration in the western Anti-Atlas, Morocco. *Artificial Intelligence in Geosciences*, 5, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.aiig.2024.100077>

- Hedenquist, J.W., Lowenstern, J.B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519–527. <https://doi.org/10.1038/370519a0>
- Hronsky, J.M.A., Groves, D.I. 2008. Science of targeting: Definition, strategies, targeting and performance measurement. *Australian Journal of Earth Sciences*, 55(1), 3–12. <https://doi.org/10.1080/08120090701581356>
- Iwasaki, A., Fujisada, H., Akao, H., Shindou, O., Akagi, S. 2002. Enhancement of spectral separation performance for ASTER/SWIR. In *Proceedings of SPIE* (Vol. 4486, pp. 42–50). <https://doi.org/10.1117/12.455140>
- Kruse, F.A. 2012. Mapping surface mineralogy using imaging spectrometry. *Geomorphology*, 137(1), 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.032>
- Lavaei, R., Niroomand, S., Pour, A.B., Soleymani, M. 2025. Integration of ASTER and PRISMA remote sensing satellite imagery for mapping lithology, alteration and structural features associated with the Kuh-e-Janja Cu-Au $\pm$ Mo porphyry deposit, SE Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 38, Article 101578. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101578>
- Liu, C., Qiu, C., Wang, L., Feng, J., Wu, S., Wang, Y. 2023. Application of ASTER remote sensing data to porphyry copper exploration in the Gondwana region. *Minerals*, 13, Article 501. <https://doi.org/10.3390/min13040501>
- Mars, J.C., Rowan, L.C. 2006. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using ASTER data and logical operator algorithms. *Geosphere*, 2(3), 161–186. <https://doi.org/10.1130/GES00044.1>
- Mars, J.C., Rowan, L.C. 2010. Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 2011–2025. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.008>
- McCuaig, T.C., Beresford, S., Hronsky, J. 2010. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. *Ore Geology Reviews*, 38(3), 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.008>
- McKay, G., Harris, J.R. 2016. Comparison of the data-driven random forests model and a knowledge-driven method for mineral prospectivity mapping: A case study for gold deposits around the Hurwitz Group and Nueltin Suite, Nunavut, Canada. *Natural Resources Research*, 25(2), 125–143. <https://doi.org/10.1007/s11053-015-9274-z>
- Mohamed Taha, A.M., Xi, Y., He, Q., Hu, A., Wang, S., Liu, X. 2023. Investigating the capabilities of various multispectral remote sensors data to map mineral prospectivity based on random forest predictive model: A case study for gold deposits in Hamissana area, NE Sudan. *Minerals*, 13(1), Article 49. <https://doi.org/10.3390/min13010049>
- Ninomiya, Y. 2003. A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2003)* (Vol. 3, pp. 1552–1554). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294172>
- Ousaid, L., El Amrani, M., Hahou, Y., Ben Atmane, M., Aafir, Z., Diani, K., Courba, S., LamChaimech, A., Ben Dris, M.A., Abdou, S., Ifiliss, A. 2023. Prediction of new polymetallic mineralization prospectivity zones using a combination of remote sensing, geology and geochemistry data in the northeastern part of the Saghro inlier, Moroccan Anti-Atlas belt. *Environmental Earth Sciences*, 82(24), Article 584. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11285-4>
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. 2021. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pearlman, J., Carman, S., Segal, C., Jarecke, P., Clancy, P., Browne, W. 2001. Overview of the Hyperion imaging spectrometer for the NASA EO-1 mission. In *Proceedings of the IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Vol. 7, pp. 3036–3038). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2001.978246>
- Pour, A.B., Park, T.-Y.S., Park, Y., Hong, J.K., Pradhan, B. 2019. Fusion of DPCA and ICA algorithms for mineral detection using Landsat-8 spectral bands. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2019)*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898241>
- Pour, A.B., Park, T.Y.S., Park, Y., Hong, J.K., Zoheir, B., Pradhan, B., Ayoobi, I., Hashim, M. 2018. Application of multi-sensor satellite data for exploration of Zn-Pb sulfide mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland. *Remote Sensing*, 10(8), Article 1186. <https://doi.org/10.3390/rs10081186>

- Pour, A.B., Hashim, M. 2011. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploration of porphyry copper deposits using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6), 1309–1323. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.07.017>
- Pour, A.B., Hashim, M. 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 44, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.009>
- Rajendran, S., Nasir, S. 2017. Characterization of ASTER spectral bands for mapping alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 88, 317–335. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.016>
- Rockwell, B.W. 2012. *Description and validation of an automated methodology for mapping mineralogy, vegetation, and hydrothermal alteration type from ASTER satellite imagery with examples from the San Juan Mountains, Colorado* (Scientific Investigations Map 3190). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sim3190>
- Rowan, L.C., Mars, J.C. 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 350–366. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00127-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00127-X)
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., Scambos, T.A., Schaaf, C.B., Schott, J.R., Sheng, Y., Vermote, E.F., Belward, A.S., Bindshadler, R., Cohen, W.B., Gao, F., Hipple, J.D., Zhu, Z. 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Sabins, F.F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3–4), 157–183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
- Shayganpour, S., Hashemi Tangestani, M. 2023. Mapping of rock outcrops as a prerequisite for lithogeochemical sampling surveys based on spatial distribution analysis: An application of ASTER data, southern Iran. *Journal of Geological Remote Sensing*, 1(1), 1–20.
- Shirazi, A., Hezarkhani, A., Beiranvand Pour, A., Shirazy, A., Hashim, M. 2022. Neuro-Fuzzy-AHP (NFAHP) technique for copper exploration using ASTER and geological datasets in the Sahlabad mining area, East Iran. *Remote Sensing*, 14, 5562. <https://doi.org/10.3390/rs14215562>
- Shirmard, H., Farahbakhsh, E., Pour, A.B., Muslim, A.M., Müller, R.D., Chandra, R. 2020. Integration of selective dimensionality reduction techniques for mineral exploration using ASTER satellite data. *Remote Sensing*, 12(8), Article 1261. <https://doi.org/10.3390/rs12081261>
- Sihombing, F.M.H., Palin, R.M., Hughes, H.S.R., Robb, L.J. 2024. Improved mineral prospectivity mapping using graph neural networks. *Ore Geology Reviews*, 172, Article 106215. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106215>
- Sillitoe, R.H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Stuffer, T., Kaufmann, C., Hofer, S., Förster, K.P., Schreier, G., Mueller, A., Eckardt, A., Bach, H., Penné, B., Benz, U., Haydn, R. 2007. The EnMAP hyperspectral imager: An advanced optical payload for future applications in Earth observation programmes. *Acta Astronautica*, 61(1–6), 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2007.01.033>
- Xu, K., Wang, X., Kong, C., Feng, R., Liu, G., Wu, C. 2019. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring gold deposits based on SVM and PCA using ASTER data: A case study of Gulong. *Remote Sensing*, 11(24), Article 3003. <https://doi.org/10.3390/rs11243003>
- Zhang, T., Yi, G., Li, H., Wang, Z., Tang, J., Zhong, K., Li, Y., Wang, Q., Bie, X. 2016. Integrating ASTER and Landsat-8 OLI data for hydrothermal alteration mineral mapping in the Duolong porphyry Cu-Au deposit, Tibetan Plateau, China. *Remote Sensing*, 8(11), 890. <https://doi.org/10.3390/rs8110890>
- Zuo, R., Xiong, Y., Wang, Z., Wang, J., Kreuzer, O.P. 2023. A new generation of artificial intelligence algorithms for mineral prospectivity mapping. *Natural Resources Research*, 32(5), 1859–1869. <https://doi.org/10.1007/s11053-023-10237-w>