



---

# METAMORPHIA: CLASIFICACIÓN DE ROCAS METAMÓRFICAS MEDIANTE IA SIMBÓLICA

---

A PREPRINT

Ronny López 

Silvana Hermosa 

Genesis Campos 

Sonia Gualán 

Christian Mejía-Escobar

Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental (FIGEMPA)  
Universidad Central del Ecuador  
Quito, Ecuador

ralopez@uce.edu.ec, smhermosa@uce.edu.ec, gdcampos@uce.edu.ec, sdgualan@uce.edu.ec,  
cimejia@uce.edu.ec

## ABSTRACT

La clasificación de rocas metamórficas constituye un proceso complejo que requiere experiencia especializada y la aplicación sistemática de criterios mineralógicos y texturales. En este contexto, la Inteligencia Artificial Simbólica representa una alternativa adecuada, ya que permite formalizar el conocimiento experto mediante reglas lógicas explícitas, garantizando trazabilidad y explicabilidad en los resultados.

En esta investigación se desarrolló MetamorphIA, un sistema web de clasificación petrológica basado en Prolog, implementado mediante el intérprete Tau Prolog en JavaScript. El modelo utiliza un motor de inferencia lógico capaz de emular el razonamiento deductivo de un geólogo, evaluando parámetros observables como la foliación, el tamaño de grano, características distintivas y minerales índice.

La base de conocimiento integra hechos y reglas deterministas para ocho litologías metamórficas principales, infiriendo no solo el nombre de la roca, sino también su grado metamórfico y su posible protolito. La herramienta fue desplegada como una aplicación web accesible globalmente, permitiendo consultas en tiempo real sin necesidad de procesamiento en servidores externos.

Los resultados demuestran que la IA simbólica es efectiva en dominios donde el conocimiento puede estructurarse de manera formal, constituyendo un aporte relevante para la enseñanza y el soporte a la identificación de rocas metamórficas en contextos académicos y de campo.

**Keywords:** Inteligencia Artificial Simbólica, Prolog, Tau Prolog, Clasificación, Rocas Metamórficas

## 1. Introducción

La clasificación de rocas requiere un alto nivel de experiencia y la aplicación sistemática de criterios visuales y mineralógicos. En el contexto de la petrología metamórfica, este proceso se basa en reglas deterministas bien establecidas, lo que lo convierte en un candidato ideal para la aplicación de la **Inteligencia Artificial (IA) Simbólica**. A diferencia de los enfoques conexionistas (como el aprendizaje automático o *Machine Learning*), que dependen de patrones estadísticos extraídos de grandes volúmenes de datos, la IA simbólica se fundamenta en la representación explícita del conocimiento humano a través de hechos y reglas lógicas. Esto permite una trazabilidad y explicabilidad total de los resultados, una característica crítica en sistemas de soporte a la decisión científica (1).

Para la implementación de este sistema, denominado *MetamorphIA*, se seleccionó **Prolog** (*Programming in Logic*), el lenguaje estándar por excelencia para la programación lógica. Prolog

permite modelar el razonamiento experto mediante un motor de inferencia que utiliza mecanismos de unificación y *backtracking* (retroceso) para validar hipótesis contra una base de conocimiento predefinida. Con el objetivo de integrar esta capacidad de cómputo en una arquitectura web accesible y descentralizada, se utilizó **Tau Prolog**, un intérprete de Prolog desarrollado íntegramente en JavaScript. Esta herramienta permite la ejecución del motor de inferencia directamente en el lado del cliente (navegador web), facilitando la interacción en tiempo real sin latencia de servidor y garantizando la portabilidad del sistema (2).

Desde la perspectiva de las ciencias de la Tierra, las rocas metamórficas son el producto de la transformación de rocas preexistentes, denominadas *protolitos*, sometidas a variaciones de presión ( $P$ ), temperatura ( $T$ ) y tiempo ( $t$ ), sin alcanzar la fusión total (3). El algoritmo de clasificación implementado en este sistema pondera cuatro parámetros observables fundamentales para determinar la litología:

- La presencia o ausencia de **foliación** (estructura planar derivada de esfuerzos dirigidos).
- El **tamaño de grano** (textura blástica), que suele incrementar con el grado metamórfico.
- **Características distintivas**, tales como el clivaje pizarroso, el brillo satinado o el bandeamiento gnéisico.
- El **mineral guía** o índice predominante en la muestra.

La identificación de **minerales índice** es el pilar fundamental de esta clasificación, ya que estos actúan como indicadores geo-termobarométricos del grado metamórfico alcanzado. Siguiendo los principios clásicos de las zonas metamórficas descritos inicialmente por George Barrow, la aparición secuencial de minerales como la clorita (indicador de bajo grado) hasta la sillimanita (indicador de alto grado) delimita las condiciones termodinámicas de formación (4).

Asimismo, el sistema establece la correlación genética entre la roca resultante y su posible protolito. Por ejemplo, vincula una filita o un esquisto con un protolito pelítico (como una lutita), o una anfibolita con un protolito máfico (como un basalto) (5). Este enfoque sistemático permite al software emular el proceso deductivo que realiza un geólogo en campo o laboratorio, transformando observaciones cualitativas en una clasificación petrológica rigurosa.

## 2. Propuesta

Ante la necesidad de sistematizar el conocimiento experto en petrología y hacerlo accesible mediante herramientas modernas, este trabajo presenta el desarrollo de *MetamorphIA*. Se trata de un sistema de clasificación de rocas metamórficas fundamentado en la Inteligencia Artificial Simbólica, diseñado para emular el razonamiento deductivo de un geólogo.

### 2.1. Modelo lógico de clasificación

El núcleo del sistema se basa en la premisa de que las rocas metamórficas son el producto de la transformación de rocas preexistentes (*protolitos*) mediante procesos que implican variaciones de Presión ( $P$ ), Temperatura ( $T$ ) y tiempo ( $t$ ). Estas transformaciones dejan huellas observables y cuantificables que el sistema utiliza como criterios de entrada.

El modelo no opera como una caja negra probabilística, sino que evalúa hechos deterministas. Para determinar la clasificación litológica, el diseño conceptual establece cuatro parámetros jerárquicos de evaluación:

1. **Estructura (Foliación):** Discriminante primario que separa las rocas sometidas a esfuerzos dirigidos (foliadas) de aquellas con texturas granoblásticas o masivas.

2. **Textura y Grano:** El tamaño de los blastos (fino, medio, grueso) se utiliza como indicador de la intensidad de la recristalización.
3. **Característica Distintiva:** Variable cualitativa para rasgos diagnósticos específicos (e.g., fisilidad, brillo satinado, bandeamiento) que permiten diferenciar litologías transicionales.
4. **Mineralogía Guía:** Uso de *minerales índice* como marcadores geo-termobarométricos (e.g., clorita vs. sillimanita) para acotar las condiciones de formación.

## 2.2. Base de conocimiento

La arquitectura del conocimiento del sistema busca vincular las observaciones visuales con la génesis de la roca. Se propone que el sistema no solo entregue una etiqueta, sino una reconstrucción del contexto geológico a través de una respuesta tripartita:

- **Identificación Litológica:** El nombre petrográfico normalizado (e.g., Esquistos).
- **Grado Metamórfico:** La inferencia cualitativa de las condiciones  $P - T$ .
- **Protolito Posible:** La determinación de la roca madre original, estableciendo relaciones petrogenéticas inversas (e.g., Filita  $\leftarrow$  Lutita).

Esta propuesta integra la rigurosidad de la clasificación petrológica clásica con la accesibilidad de las tecnologías web, permitiendo validar observaciones de campo mediante un asistente lógico automatizado.

## 3. Metodología

### 3.1. Funcionamiento

La construcción de *MetamorphIA* se llevó a cabo integrando componentes de desarrollo web moderno con técnicas de Inteligencia Artificial Simbólica. La metodología se divide en dos componentes principales: la arquitectura funcional del sitio web (interfaz y control) y la implementación lógica del motor de inferencia.

#### 3.1.1. Funcionamiento y arquitectura web

El sistema fue desarrollado como una Aplicación de Página Única (SPA) que se ejecuta íntegramente en el lado del cliente (Client-Side), eliminando la necesidad de servidores backend para el procesamiento lógico. La arquitectura se compone de tres capas interconectadas:

1. **Capa de Presentación (HTML5 y CSS):** La estructura semántica del sitio se definió mediante HTML5. Para la interfaz de usuario, se diseñó un formulario dinámico que contiene elementos de selección (`<select>`) correspondientes a las variables geológicas: foliación, tamaño de grano, característica distintiva y mineral guía. El diseño visual y la respuesta se gestionaron mediante el framework *Tailwind CSS*, haciendo que la interfaz sea amigable en dispositivos móviles y de escritorio.
2. **Capa de control (JavaScript):** Actúa como el puente entre la interfaz humana y el motor lógico. Esta capa utiliza lógica imperativa para:
  - Capturar los eventos del DOM (e.g., clic en el botón “Identificar Roca”).
  - Validar que todos los campos requeridos hayan sido seleccionados.
  - Traducir las entradas del lenguaje natural a sintaxis lógica. Por ejemplo, si el usuario selecciona “Sí” en foliación, JavaScript genera la cadena `assertz(foliacion(si))`.

- Gestionar la visualización de resultados, incluyendo la selección dinámica de una imagen de referencia basada en la clasificación obtenida.

3. **Motor de inferencia (Tau Prolog):** Se implementó la biblioteca *Tau Prolog*, un intérprete de Prolog escrito en JavaScript. Al activarse la clasificación, este componente recibe los hechos temporales del usuario, carga la base de conocimiento y ejecuta el algoritmo de resolución para deducir la respuesta.

Para la fase de despliegue, el archivo HTML junto con la carpeta conteniendo las fotografías de cada una de las rocas se alojaron en **Netlify**. Esta es una plataforma gratuita especializada en la publicación de sitios web estáticos que permite cargar directamente el directorio del proyecto para su disponibilidad inmediata en la web (6).

El flujo de operación final inicia cuando el usuario ingresa los parámetros observados. JavaScript inyecta estos datos como hechos dinámicos en la sesión de Prolog y lanza la consulta objetivo. Si el motor encuentra una coincidencia lógica, devuelve un objeto JSON que JavaScript procesa para mostrar el nombre de la roca, el grado metamórfico, el protolito y renderizar la fotografía correspondiente desde el servidor.

## 3.2. Implementación

La lógica del sistema reside en los archivos de código Prolog que contienen el motor de inferencia basado en hechos y reglas. A continuación, se detalla la construcción de cada uno.

### 3.2.1. Implementación de hechos

En esta parte se definen los hechos o verdades establecidos para las rocas metamórficas. Para lo cual se codificaron ocho tipos de rocas metamórficas: *filita*, *pizarra*, *esquistos*, *gneis*, *migmatita*, *mármol*, *cuarcita* y *anfíbolita*.

Para cada una de estas rocas, se implementaron hechos estáticos que las relacionan con sus propiedades intrínsecas:

- **Protolitos posibles:** La roca original de la que provienen.
- **Minerales guía:** Los minerales índice que permiten su identificación.

Debido a la extensión del código, la lista completa de hechos implementados se encuentra disponible en los anexos.

### 3.2.2. Implementación de reglas

Las reglas definen la lógica condicional que permite al sistema clasificar una muestra basándose en las observaciones del usuario.

**Regla principal** El objetivo central de la clasificación es obtener el nombre de la roca, su grado metamórfico y su posible protolito. Esto se orquesta mediante la regla general:

```
clasificar_roca(Roca, Grado, Protolito)
```

El funcionamiento de esta regla se divide en dos pasos lógicos secuenciales:

1. Primero, se ejecuta el predicado `clasificar(Roca, Grado)`. Aquí, el motor de inferencia busca entre todas las reglas específicas definidas (para pizarra, filita, gneis, etc.) cuál coincide con los datos ingresados por el usuario. Por ejemplo, si los datos coinciden con las condiciones del gneis, la variable `Roca` se unifica con “gneis” y la variable `Grado` con “alto”.

2. Posteriormente, se ejecuta la función `findall(P, protolito_posible(Roca, P), Protolito)`. Esta instrucción encuentra todos los valores `P` tales que el hecho `protolito_posible(Roca, P)` sea verdadero y los almacena en la lista `Protolito`. Así, si la roca fue clasificada como Pizarra en el paso anterior, el sistema buscará en la base de hechos que el protolito de la pizarra es la lutita, guardando este valor para mostrarlo en el resultado final.

**Reglas específicas** Las reglas específicas determinan la clasificación litológica si se satisfacen un conjunto de condiciones. La sintaxis utilizada es:

```
clasificar(Roca, Grado) :- condicion 1, condicion 2, ..., condicion N.
```

El operador `:-` denota una implicación lógica (“es verdad si”), y la coma funciona como un operador lógico *AND* (“y”), obligando a que se cumplan todas las condiciones secuencialmente hasta llegar al punto final.

Por ejemplo, para clasificar una roca como **Pizarra** de muy bajo grado, deben cumplirse cuatro condiciones estrictas: que presente foliación, tenga grano fino, su característica sea romperse en láminas y que el mineral seleccionado por el usuario (*M*) sea verificado como un mineral índice válido para la pizarra (como clorita o sericita).

```
clasificar(pizarra, muy_bajo) :-
    foliacion(si),
    grano(fino),
    caracteristica(se_rompe_en_laminas),
    mineral(M),
    mineral_indice(pizarra, M).
```

De esta manera se verifican las reglas para las ocho rocas metamórficas. El sistema aprovecha la flexibilidad de Prolog para manejar información parcial. En el caso de rocas que no presentan todas las características texturales, como la **Cuarcita**, el motor ignora las entradas irrelevantes (tamaño de grano y característica), basándose únicamente en la foliación y el mineral:

```
clasificar(cuarcita, variable) :-
    foliacion(no),
    mineral(cuarzo).
```

El conjunto completo de reglas para todas las rocas se detalla en los anexos del presente informe.

## 4. Resultados

Como resultado principal de esta investigación, se obtuvo la implementación funcional de *MetamorphIA*, accesible globalmente a través de la web. La aplicación integra exitosamente el motor de inferencia simbólica con una interfaz gráfica intuitiva, permitiendo la clasificación en tiempo real sin necesidad de software externo.

La interfaz final (Figura 1) presenta un panel de control con cuatro selectores dinámicos correspondientes a las variables geológicas definidas. Al procesar una consulta, el sistema despliega una tarjeta de resultados que incluye la identificación taxonómica de la roca, su grado metamórfico, el protolito asociado y una imagen petrográfica de referencia para validación visual.

**MetamorphIA**  
Clasificador de Rocas Metamórficas

1. ¿Presenta Foliación? Sí (Foliada)

2. Tamaño de Grano Fino (No visible a simple vista)

3. Característica Distintiva Se rompe en láminas planas  
Seleccione "Ninguna" si la roca es masiva.

4. Mineral Índice / Predominante Sericita

**Identificar Roca**

**Resultado del Análisis**

TIPO DE ROCA  
**Pizarra**

GRADO METAMÓRFICO  
**Muy Bajo**

PROTOLITO POSIBLE  
*lutita*

Figura 1: Interfaz de usuario de MetamorphIA mostrando la clasificación de una roca.

La herramienta se encuentra publicada y operativa, permitiendo el acceso libre para fines educativos y de consulta mediante el siguiente enlace:

<https://gentle-malasada-b1a9e6.netlify.app/>

## 5. Conclusiones

1. Inteligencia Artificial Simbólica demostró ser efectiva para la clasificación petrológica, un dominio donde el conocimiento puede formalizarse mediante reglas deterministas explícitas. A diferencia de los modelos de *caja negra*, el uso de Prolog garantizó una trazabilidad total del proceso deductivo, asegurando que cada diagnóstico esté respaldado por una cadena lógica de evidencias geológicas verificables, lo cual es indispensable para la validez científica.
2. bien el sistema clasifica con éxito, su naturaleza determinista presenta limitaciones frente a la complejidad natural de las muestras geológicas. La IA simbólica depende intrínsecamente de la calidad y exhaustividad de las reglas codificadas por el experto humano, mostrando rigidez ante rocas con texturas transicionales o excepciones a la norma. Para

superar esto, trabajos futuros podrían beneficiarse de un enfoque híbrido que integre redes neuronales para el reconocimiento visual de texturas con la lógica simbólica para la validación taxonómica.

3. integración del motor de inferencia en una plataforma web de acceso libre constituye un aporte valioso para la educación en Ciencias de la Tierra. Al transformar un proceso de identificación complejo en una herramienta interactiva y visual, se facilita el aprendizaje autodidacta y se proporciona un recurso de apoyo inmediato para estudiantes y personas que están iniciando su estudio en rocas metamórficas.

## 6. Datos disponibles y código

La base de conocimiento en Prolog que sustenta la aplicación MetamorphIA puede consultarse en [https://drive.google.com/file/d/1Xw0j6TUUSyyacJBhIBG18bw4bievqb5A/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1Xw0j6TUUSyyacJBhIBG18bw4bievqb5A/view?usp=drive_link)

## Referencias

- [1] Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson.
- [2] Berzal, F., Matés, J. A., & Paniza, M. (2018). *Tau Prolog: A Prolog interpreter for the web. Theory and Practice of Logic Programming*.
- [3] Winter, J. D. (2014). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd ed.). Pearson Education.
- [4] Bucher, K., & Grapes, R. (2011). *Petrogenesis of Metamorphic Rocks* (8th ed.). Springer-Verlag.
- [5] Yardley, B. W. D. (1989). *An Introduction to Metamorphic Petrology*. Longman Earth Science Series.
- [6] Netlify. (2024). *Netlify: Composable Web Platform*. Recuperado de <https://www.netlify.com>

## Sobre los autores



**Silvana Marjorie Hermosa**

Silvana Marjorie Hermosa es estudiante de Geología en la Universidad Central del Ecuador. Ha realizado pasantías en EP PETROECUADOR, en el activo Lago Agrio-Libertador, así como en PetroTech, en el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), en el ECU 911, desempeñándose en áreas de modelamiento geológico, cartografía regional, estadística y análisis de datos.

Cuenta con formación en registros eléctricos, sedimentología, petrografía, sistemas de información geográfica y estadística, y ha participado en cursos especializados de interpretación de registros de pozos, incluyendo el curso “*Preparación inteligente de registros de pozos para estudios integrados de yacimientos (Norte y Sur América)*”, donde se aplican técnicas de inteligencia artificial para el análisis e integración de datos geológicos y geofísicos.

Sus intereses académicos se centran en la aplicación de inteligencia artificial y aprendizaje profundo en la interpretación sísmica, registros de pozos y modelamiento geológico.



**Genesis Dayana Campos Duicela**

Genesis Dayana Campos Duicela es estudiante de décimo semestre de Ingeniería en Geología en la Universidad Central del Ecuador, con formación orientada al análisis geológico aplicado. Realizó pasantías preprofesionales en la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM), donde adquirió experiencia en revisión técnica de información geológica, normativa minera y gestión de datos institucionales. Posteriormente, desarrolló pasantías en el Centro de Investigación Quito - EP

PETROECUADOR, en el área de investigación, fortaleciendo conocimientos en análisis de información del sector hidrocarburífero, apoyo a procesos petrográficos y generación de informes técnicos. Asimismo, ha participado en actividades académicas y técnicas vinculadas al Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), complementando su formación en geología aplicada, además, cuenta con una participación activa en asociaciones técnicas como la AAPG – Capítulo Estudiantil UCE y la Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador (AIME). Su trayectoria refleja un interés constante por la investigación aplicada y el trabajo interdisciplinario.



**Sonia Deifilia Gualán Cartuche**

Sonia Deifilia Gualán Cartuche es estudiante de décimo semestre de Ingeniería en Geología en la Universidad Central del Ecuador. Ha desarrollado experiencia académica y práctica en interpretación geológica, análisis petrográfico, petrofísica y elaboración de informes técnicos.

Realizó prácticas preprofesionales en el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), participando en cartografía geológica y planificación mediante SIG, y en EP Petroecuador, en el CIQ (Centro de Investigaciones Quito) colaborando en ensayos de porosidad y permeabilidad, ensayos de daños a la formación y elaboración de informes. Además, cuenta con interés y experiencia en el uso de Inteligencia Artificial aplicada a la geología, especialmente en interpretación automatizada de datos sísmicos mediante técnicas de aprendizaje profundo. Complementa su formación con participación en proyectos ambientales y sociales enfocados en sostenibilidad.



**Ronny Alexander López Tasiguano**

Ronny Alexander López Tasiguano estudiante de décimo semestre de la carrera de Ingeniería en Geología en la Universidad Central del Ecuador, con formación orientada a la geología aplicada. Geólogo de campo participando en levantamiento geológico para el proyecto vial Warintz en Morona Santiago.

Realizó prácticas preprofesionales en la empresa Terrahidro, donde adquirió experiencia en la ejecución de ensayos de penetración estándar (SPT), apertura de calicatas, muestreo y descripción geotécnica de suelos, así como en actividades relacionadas con la construcción y evaluación de pozos hidrogeológicos. Posteriormente, desarrolló prácticas en el Centro de Investigaciones Quito, EP PETROECUADOR, en el área de investigación, fortaleciendo conocimientos en petrografía, análisis mediante coregamma espectral y microscopía electrónica de barrido (MEB), además de brindar soporte técnico en la elaboración de informes para concesiones mineras y gestión de riesgos geológicos. Actualmente, participa activamente en el concurso Imperial Barrel Award.