

Biomarcadores: la química que guarda memoria de la vida

Griselda Valenti¹

¹ Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO, UNSa-CONICET); e-mail: grivalenti7@gmail.com

En la nota breve de la edición anterior (véase [Valenti 2025. Temas B&GNOA, vol. 15](#)) vimos que la geoquímica es la ciencia que explora cómo los elementos y compuestos químicos se transforman y circulan en la Tierra. Fue como asomarnos a la “gran cocina del planeta” y observar cómo los ingredientes (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, entre muchos otros más) se mezclaban y reaccionaban para dar forma a los minerales, los organismos, el agua y la atmósfera.

Pero dentro de esa inmensa cocina química hay un ingrediente especial: la vida. Los organismos, desde bacterias hasta plantas y animales, también dejan su huella en la química terrestre. Y esas huellas, además de ser visibles como fósiles o restos orgánicos, muchas veces se esconden en moléculas que sobreviven al paso del tiempo. A esas moléculas las llamamos **biomarcadores**.

La geoquímica orgánica estudia cómo esa materia de origen orgánico (seres vivos) se transforma en el subsuelo y da origen a los combustibles fósiles (conocidos como hidrocarburos). En ese proceso, los biomarcadores son protagonistas: son moléculas que sobrevivieron millones de años y que funcionan como huellas químicas capaces de revelar el origen, la historia y la calidad de los hidrocarburos (Figura 1). Podemos pensarlos como brújulas que guían, por ejemplo, la exploración hacia nuevas fuentes de energía.

Hidrocarburo es el término químico general que engloba a los compuestos formados, en su mayoría, por átomos de carbono e hidrógeno. Estos átomos pueden formar largas cadenas o anillos libres o fusionados entre sí, teniendo distintas propiedades físicas y químicas según su estructura. Los hidrocarburos son la familia química base que compone el petróleo (o crudo), pero también pueden existir en estado gaseoso (gas natural) o sólido (betún), todos ellos actúan como fuente de energía no renovable.

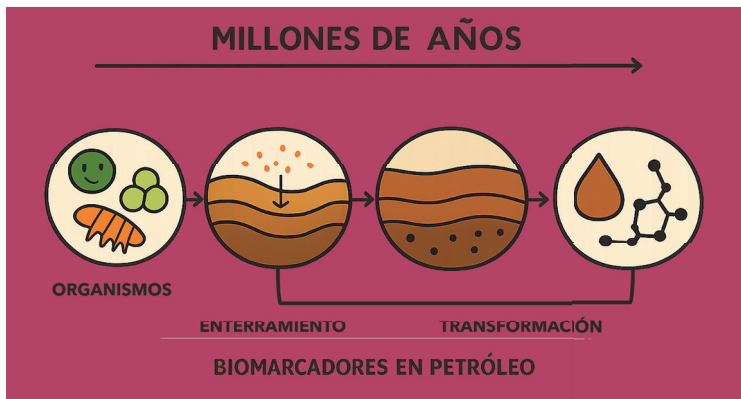


Figura 1. Línea de tiempo ilustrativa del viaje de un biomarcador, desde su origen biológico hasta su detección en el petróleo. Imagen generada por inteligencia artificial (Copilot).

Existen distintas huellas para distintas historias

Los biomarcadores no son todos iguales. Dependiendo del contexto, pueden hablarnos de distintas cosas:

Los *biomarcadores médicos* son los más conocidos. Las moléculas como la glucosa, el colesterol o ciertas proteínas en la sangre son un claro ejemplo. Estos biomarcadores, funcionan como “semáforos” que alertan sobre enfermedades o riesgos a la salud de las personas.

Cuando hablamos de *biomarcadores ambientales* nos referimos a compuestos que reflejan la calidad del aire, del agua o del suelo. Por ejemplo, la presencia de metales pesados en peces por exposición a un río contaminado por afluentes de industrias, el exceso de nitratos en agua por fertilizantes que se refleja en la calidad de la biota que crece allí, entre muchos otros. En este caso, actúan como detectives forenses capaces de detectar los contaminantes presentes y las fuentes de dónde provienen en base a su química.

Los *biomarcadores geológicos* son los más fascinantes para quienes miran hacia el pasado de la Tierra. Se trata de moléculas orgánicas que quedaron atrapadas en rocas y sedimentos, y que permiten reconstruir cómo era la vida y el ambiente hace millones de años atrás.

Así como un detective analiza distintas pistas en una escena del crimen, los científicos estudiamos diferentes biomarcadores para entender qué ocurrió en un organismo, un ecosistema o incluso en la Tierra primitiva. En la industria del petróleo¹, los biomarcadores geológicos son los más estratégicos porque nos cuentan la historia de la materia orgánica que dio origen a los hidrocarburos, y, aunque muchas veces no conservan su forma original, podemos descifrar de qué molécula derivan.

¹ La industria del petróleo abarca los procesos globales de exploración, extracción, refinación, transporte y comercialización de hidrocarburos, siendo un pilar fundamental para la economía mundial y energética.

Para hacer más clara esta idea, les voy a mencionar el caso del colesterol haciendo foco en su estructura química (Figura 2). Cuando un organismo muere y queda enterrado, a cierta profundidad comienzan a actuar sobre él la temperatura y la presión (etapa conocida como diagénesis) modificando la estructura química inicial. El colesterol libera el grupo funcional oxhidrilo (-OH) y completa uno de los anillos aromáticos (anillos de carbono con dobles enlaces C=C, pasan a formar enlaces simples C-C por adición de un hidrógeno), cambiando su estructura química y convirtiéndose en otro compuesto conocido como colestano. A simple vista parecen el mismo compuesto, pero si hacemos foco en su estructura química notaremos los cambios. Si sigue aumentando la presión y la temperatura, lo que ocurrirá es que poco a poco se van a ir liberando los hidrógenos de los anillos aromáticos compensando las cargas con dobles enlaces C=C (se generan anillos aromáticos). Y en una etapa más avanzada, perderán las cadenas de carbonos anexadas a los anillos (perderán esos "brazos" que salen de las estructuras cíclicas), adquiriendo formas aún más simples. Estos compuestos serán los esteranos. Ahora bien, si en el laboratorio encontramos la presencia de esteranos en un petróleo,

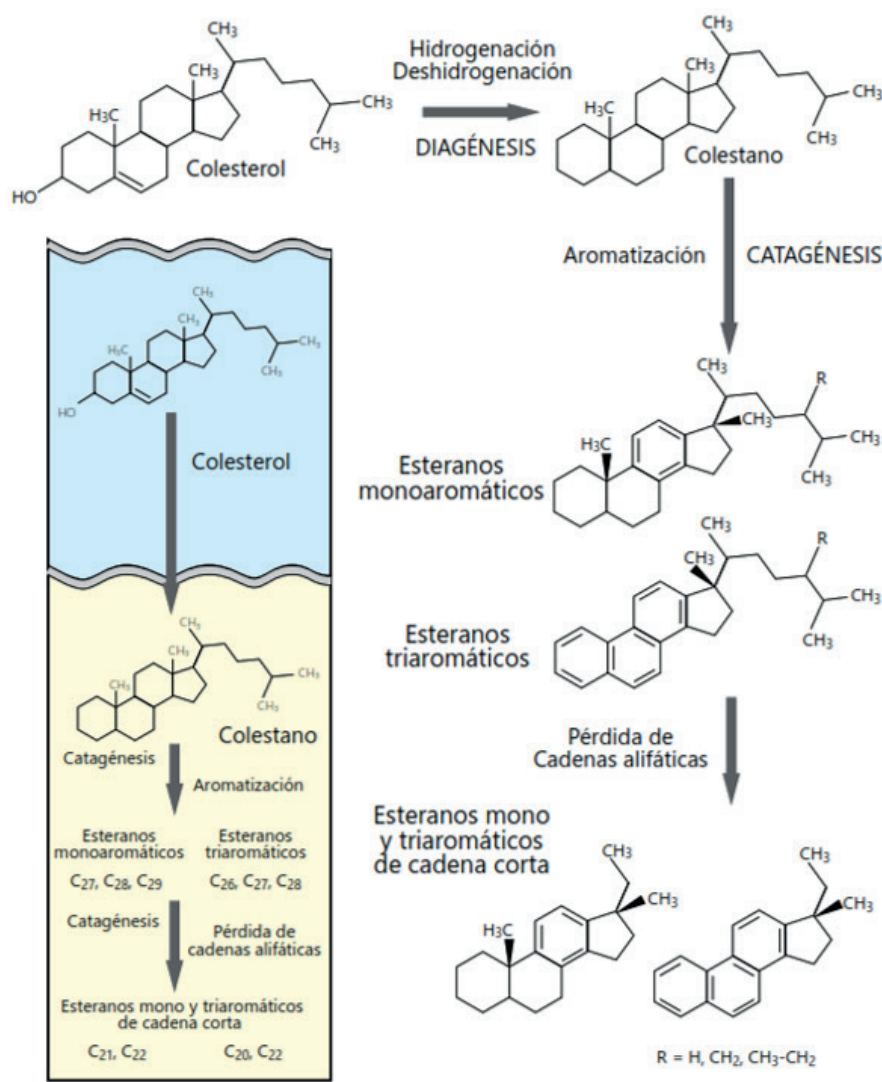


Figura 2. Relación entre un precursor biológico (colesterol) y los cambios en su estructura hasta la formación de biomarcadores específicos. Tomada de López (2013, 2025).

no estamos identificando la presencia de colesterol, pero sí sabemos que a través del tiempo y de los cambios en las condiciones físicas, el colesterol da como producto final un esterano. Es por esto que, el esterano es un biomarcador cuyo compuesto precursor es el colesterol, presente en muchos organismos eucariotas, y nos hablan de los organismos vivos que le dieron origen a ese petróleo. Es así que, a partir de la presencia de un biomarcador, podemos reconstruir la historia de un petróleo.

Existen muchos biomarcadores de aplicación en hidrocarburos, y cada uno de ellos nos brinda una información clave según el objetivo de búsqueda (Tabla 1). Esta información la podemos descifrar a partir de la ausencia o presencia de estos biomarcadores en los crudos. Para ver algunos ejemplos ir al Cuadro 1.

Tabla 1: Resumen de las utilidades de los biomarcadores aplicados a petróleos.

OBJETIVO	BIOMARCADORES CLAVE	¿QUÉ REVELAN?
Origen de la materia orgánica	Esteranos (algas), Hopanos (bacterias), Triterpanos (plantas terrestres)	Tipo de organismos (algas, bacterias, plantas) que originaron el crudo*
Ambiente de depositación	Relación Pristano/Fitano, Hopanos, Gammacerano	Condiciones del entorno donde se acumuló la materia orgánica (marino, lacustre, continental)
Condiciones de preservación	Hopanos resistentes, relación Hopano/Esterano	Nivel de oxígeno y degradación durante el enterramiento
Madurez térmica	Utiliza relaciones moleculares entre biomarcadores	Grado de transformación por temperatura y presión (ventana de generación)
Correlación crudo-roca madre**	Firma química compartida en biomarcadores	Comparación molecular para rastrear el origen del petróleo

*crudo: en la industria se utilizan los términos crudo y petróleo como sinónimos (mezcla compleja de hidrocarburos y otras sustancias del subsuelo)

**roca madre: se refiere a la roca en la que se depositó la materia orgánica y dió origen al petróleo

¿Cómo se leen las huellas químicas?

Descubrir biomarcadores en rocas no es tan simple como abrirlas y mirar qué hay dentro. Se necesitan técnicas de laboratorio muy precisas que permiten “desarmar” la química de los sedimentos y revelar las moléculas escondidas (Figura 3).

El primer paso en el laboratorio es extraer la materia orgánica de la roca o del crudo usando solventes especiales.

Después, las moléculas se separan según su tamaño y propiedades mediante un proceso llamado cromatografía gaseosa (CG). En la cromatografía gaseosa se volatiliza la muestra, luego se

Cuadro 1. Algunos ejemplos clave de biomarcadores en petróleos

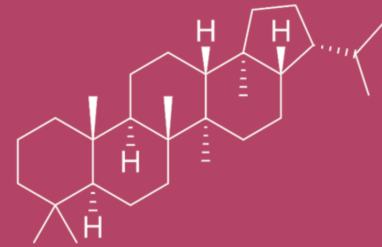
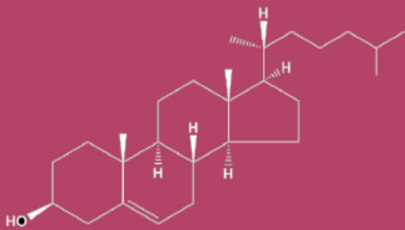
• Los biomarcadores **Pristano (P)** y **Fitano (F)**, son hidrocarburos de cadenas largas, claves para identificar petróleos, por lo que suelen ser de referencia a nivel mundial. Derivan de la cadena lateral de la clorofila. Se utiliza la relación entre ambos (P/F) como indicador de los niveles de oxígeno (O₂) durante la sedimentación:

$P/F > 1$ → Ambiente más oxigenado

$P/F < 1$ → Ambiente sin o con poco oxígeno

Son como “huellas digitales” que revelan si el ambiente era más aireado o más compacto.

• Los **Hopanos** son hidrocarburos que se caracterizan por tener una estructura química de cinco anillos de carbono fusionados. En términos simples, son moléculas derivadas de bacterias (organismos procariotas), por lo que estos biomarcadores indican la presencia de vida microscópica muy antigua.



• Los **Esteranos** son hidrocarburos con una estructura química formada por cuatro anillos de carbono fusionados. Estos biomarcadores derivan de los esteroides (como por ejemplo, el colesterol), lípidos presentes en algas y animales. Permiten reconstruir la evolución de organismos eucariotas, según el compuesto encontrado, y su ambiente de deposición (si era terrestre, marino o lacustre).

la hace pasar por un tubo pequeño por medio de una corriente gaseosa, y a la salida se detectan los compuestos presentes, los cuales se ordenan como lo hacen los corredores de una maratón según su velocidad. Es decir, el más rápido sale primero y el más lento a lo último.

Finalmente, se identifica y cuantifica cada molécula en el espectrómetro de masas (MS por su sigla en inglés, *Mass Spectrometry*) por su “huella digital” química, es decir su relación masa/carga, constituyendo una técnica muy precisa a la hora de reconocer sustancias. Es por esto que este equipo permite saber exactamente de qué compuesto se trata, como si leyéramos el código de barras único de cada molécula.

El resultado final es una huella dactilar química (conocida como *fingerprint*, por su nombre en inglés) que revela qué biomarcadores están presentes y en qué cantidad. A partir de leer esta huella y ver qué biomarcadores se encontraron, podemos reconstruir la historia de ese petróleo: descifrar el origen de la materia orgánica, el ambiente en que vivió y cómo se preservó a lo largo del tiempo.

Aplicaciones estratégicas en la industria

Dentro de la industria del petróleo los biomarcadores se analizan con distintos fines:

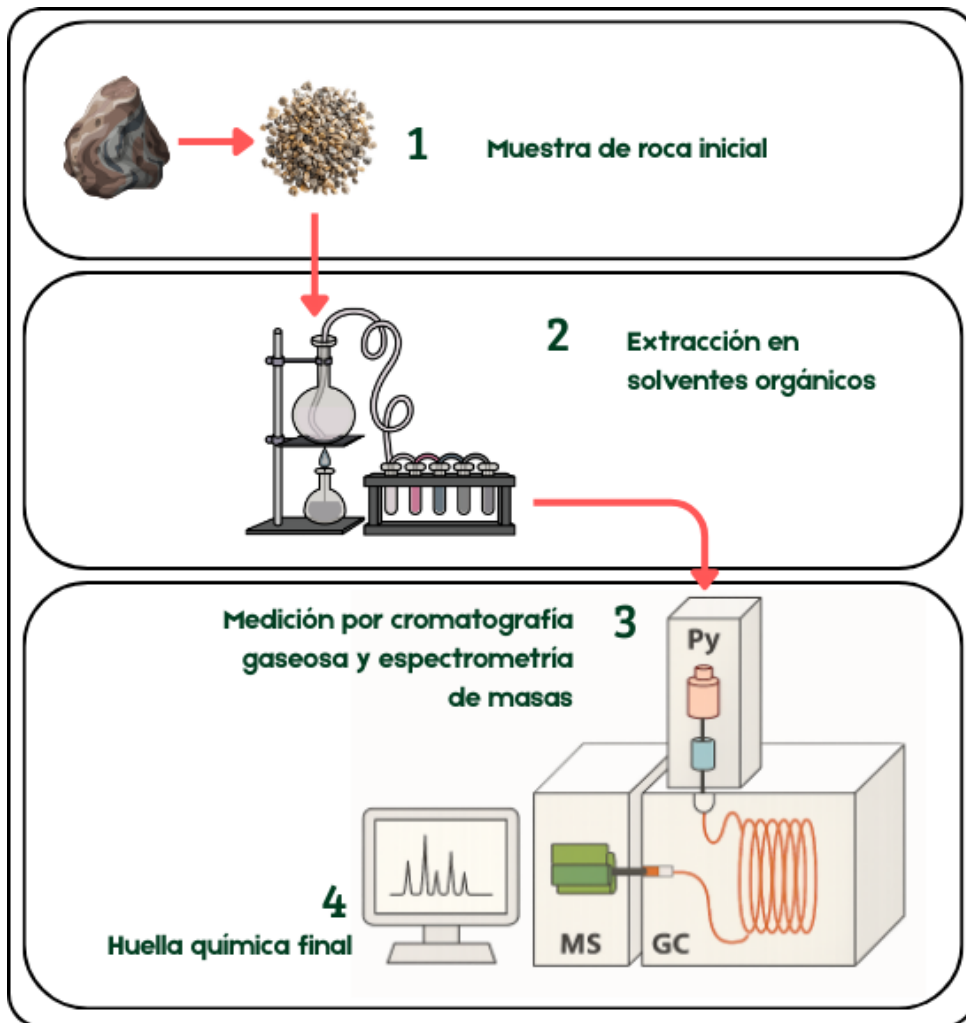


Figura 3. Secuencia esquemática de análisis en laboratorio: (1) muestra inicial: trozo de roca y su disgregación física (molienda), (2) extracción de la materia orgánica con solventes, (3) introducción en el cromatógrafo gaseoso (GC) y su detección en el espectrómetro de masas (MS), (4) huella química obtenida como resultado (*fingerprint*).

En la exploración de petróleo, los biomarcadores son como pistas en un mapa del tesoro. Cada molécula encontrada, usada como vimos antes y en el Cuadro 1, ayuda a decidir dónde perforar, evitando hacerlo a ciegas y ahorrando millones de dólares en inversión.

En la producción, los biomarcadores funcionan como termómetros de calidad: permiten distinguir crudos livianos de pesados y anticipar cómo se comportarán en la etapa de refinación.

Son compuestos claves a la hora de definir políticas de inversión y producción, ya que aportan información confiable sobre el potencial y las características del recurso.

Más allá del petróleo

Los biomarcadores son aliados silenciosos en múltiples escenarios científicos. Como detectives químicos, rastrean huellas invisibles que revelan procesos pasados y presentes, desde un río contaminado hasta la posibilidad de vida en otros planetas.

Su utilidad se extiende mucho más allá de la industria energética:

- **Impacto ambiental:** permiten rastrear derrames de hidrocarburos, identificar procesos de degradación y evaluar la salud de ecosistemas acuáticos y terrestres.
- **Astrobiología:** en la búsqueda de vida extraterrestre, los biomarcadores ofrecen pistas sobre si alguna vez existieron organismos en otros planetas como Marte, basándose en moléculas similares a las que encontramos en la Tierra.
- **Arqueología molecular:** ayudan a reconstruir dietas, ambientes y prácticas antiguas a partir de restos orgánicos conservados en cerámicas, suelos o huesos.
- **Cambio climático:** el análisis de sedimentos ricos en biomarcadores permite entender cómo variaron los ecosistemas, las temperaturas y los ciclos biológicos a lo largo del tiempo.
- **Energías alternativas:** en biocombustibles, los biomarcadores permiten evaluar el origen de la materia prima y su calidad, contribuyendo a un desarrollo energético más sostenible.
- **Medicina personalizada:** más allá de los biomarcadores clásicos (glucosa, colesterol), hoy se usan para diseñar tratamientos a medida, por ejemplo, en oncología, donde ciertas moléculas indican qué terapia será más efectiva.
- **Forense ambiental y criminalística:** análisis de biomarcadores en suelos, aguas o incluso tejidos humanos para rastrear contaminantes, drogas o venenos, aportando pruebas en investigaciones judiciales.
- **Agricultura y suelos:** biomarcadores que permiten evaluar la fertilidad, la presencia de microorganismos beneficiosos o el impacto de pesticidas, ayudando a un manejo más sostenible.
- **Microbiomas:** estudio de biomarcadores en comunidades microbianas (intestino humano, océanos, suelos) para entender su rol en la salud, la productividad agrícola o el equilibrio ecológico.
- **Tecnología alimentaria:** detección de biomarcadores en alimentos para verificar autenticidad (ej. aceites de oliva, vinos) o identificar procesos de deterioro y garantizar calidad.

En todos estos casos, los biomarcadores actúan como cápsulas del tiempo químicas. Nos permiten leer entre líneas y conectar con historias invisibles que siguen presentes en moléculas minúsculas.

Así, cada biomarcador es una palabra escrita en un lenguaje químico. Y al descifrarlo, no solo

entendemos el pasado, también abrimos nuevas puertas y en distintas direcciones que nos permiten reinterpretar su importancia y ver nuevas perspectivas hacia el futuro.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA Y CITADA

LÓPEZ L. 2013, 2025. Biomarcadores. Aplicaciones en la geoquímica del petróleo. Universidad Central de Venezuela, Ediciones de la Biblioteca (1ª ed. 2013). Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales (2ª ed. 2025).

MADRID M. 2016. Geoquímica del Petróleo: Biomarcadores y Clasificación. <https://portaldelpetroleo.com/>

TOMÁS G J, AJ ACUÑA. 2020. Geoquímica orgánica de biomarcadores en petróleos de las Cuencas del Golfo de San Jorge y Austral. Universidad Nacional de la Patagonia Austral. Secretaría de Ciencia y Tecnología; Informes Científicos y Técnicos: 53-65.

VALENTI G. 2025. Introducción a la Geoquímica: explorando la química de la Tierra. [Temas de Biología y Geología del NOA, 15: 18-22.](#)